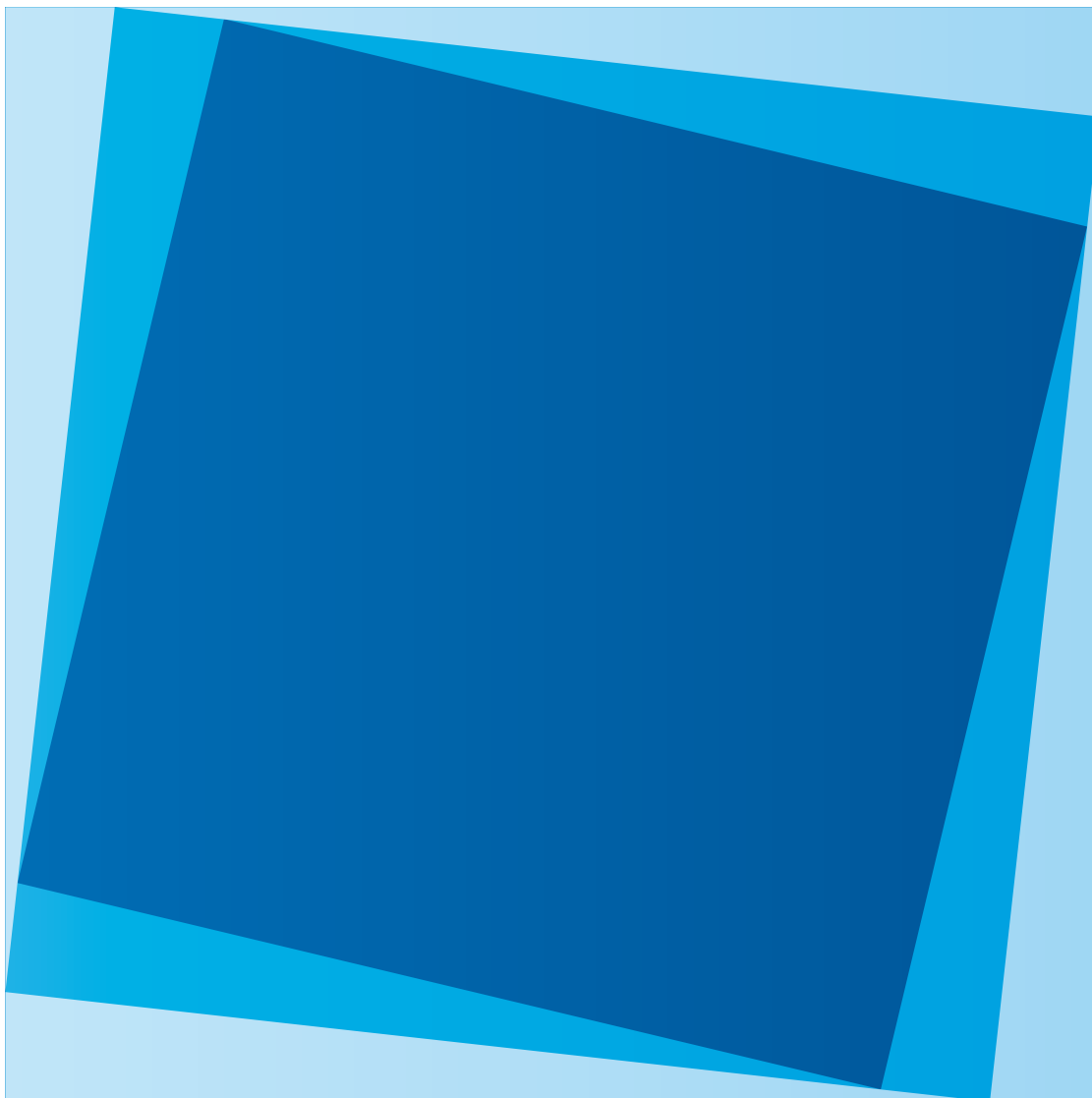


**¿Hacia una nueva
Ilustración?**



**Una década
trascendente**

Prólogo

Este libro, *¿Hacia una nueva Ilustración? Una década trascendente*, es el undécimo de la serie anual que el proyecto OpenMind de BBVA dedica a la difusión del mejor conocimiento sobre las cuestiones clave de nuestro tiempo.

Iniciamos esta serie en 2008; nuestro primer libro se tituló *Fronteras del conocimiento* y celebraba el lanzamiento de los premios del mismo nombre que otorga anualmente la Fundación BBVA y que, desde entonces, se han convertido en una referencia a nivel mundial. En aquel primer título, más de veinte grandes científicos y creadores exponían, con rigor pero con un lenguaje accesible al público general, los avances recientes más relevantes y las perspectivas de los diferentes campos científicos y artísticos reconocidos en los premios.

Desde entonces, hemos publicado un libro cada año, siguiendo el mismo modelo: colecciones de artículos escritos por figuras clave en su especialidad, que tratan diferentes aspectos o perspectivas de cuestiones fundamentales que afectan a nuestra vida y determinan nuestro futuro: desde la globalización al impacto de las tecnologías exponenciales, pasando por los grandes problemas éticos actuales, los cambios en la empresa en la era digital o el futuro de Europa.

La excelente acogida de los primeros títulos nos llevó, en 2011, a crear OpenMind (www.bbvaopenmind.com), una comunidad en línea para el debate y la difusión del conocimiento. Desde entonces, OpenMind ha crecido mucho, de forma que hoy trata un amplio espectro de materias científicas, tecnológicas, sociales y humanísticas, a través de distintos formatos además de los libros: artículos, posts, reportajes, infografías, vídeos, podcasts, con un foco creciente en los materiales audiovisuales. Y todo ello está disponible, de forma absolutamente libre, en español y en inglés.

Un activo fundamental de OpenMind son sus trescientos autores y colaboradores, especialistas de primer nivel en sus respectivas disciplinas. Y el otro es su comunidad: en 2018, OpenMind tendrá en torno a siete millones de visitas, más de cinco millones de usuarios de todo el mundo y 200.000 seguidores en las redes sociales, que, con su participación, sus comentarios y la redifusión de nuestros contenidos, dan vida a la comunidad.

En los últimos años, hemos dedicado una atención muy particular al profundo impacto de la revolución tecnológica en todos los órdenes de nuestra vida. En el libro de 2017, *El próximo paso. La vida exponencial*, se analizaba cómo esa revolución está generando transformaciones enormes en la economía, la política, la sociedad, la cultura, los valores y la vida diaria de las personas. Todo esto afecta incluso a lo que entendemos por humanidad, ante la emergencia de tecnologías que permiten mejorar enormemente las capacidades físicas y mentales de las personas, su longevidad e incluso su posición como única especie inteligente del planeta, cuestionada por la coexistencia, puede que hasta la fusión, con máquinas cada vez más inteligentes.

Todo esto abre una nueva fase que en el título del libro del año pasado denominamos *La era de la perplejidad*. Perplejidad ante cambios para los que no disponemos de guías o criterios de actuación y que se traduce en un cuestionamiento de las bases de nuestro sistema económico y político. En este último título, *¿Hacia una nueva Ilustración? Una década trascendente*, vamos un paso más allá: revisamos los cambios más importantes observados en la última década (la de la existencia de nuestro proyecto). A partir de ese análisis, miramos al futuro para entender en qué dirección nos llevan los cambios y qué decisiones debemos tomar a nivel individual y colectivo.

Para abordar esta tarea compleja, hemos contado con un grupo de veintitrés grandes especialistas, reconocidos en su campo a nivel mundial, a los que agradezco sus excelentes colaboraciones y, en general, su generoso respaldo a nuestro proyecto OpenMind.

En el libro, en primer lugar, se revisan los avances recientes y las líneas de desarrollo futuro de la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas, avances que están determinando nuestras posibilidades futuras: la cosmología y la física, la antropología y la ciencia de los datos, la nanotecnología, la inteligencia artificial y la robótica, las biotecnologías y las ciencias sociales...

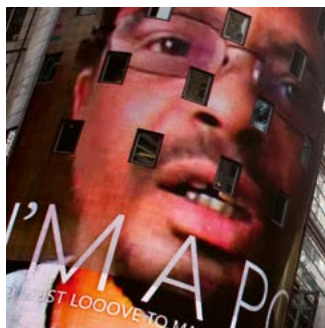
Este conocimiento nos ayuda a entender mejor las tendencias de las grandes cuestiones de nuestro tiempo: el cambio climático y la globalización, la economía y el desarrollo, la organización política y la información; las cuestiones de género; los problemas de la urbanización masiva y la ciberseguridad, que se exponen a continuación.

De este análisis pueden obtenerse dos conclusiones: primera, que el impacto final de la revolución tecnológica sobre las condiciones de vida de la humanidad, incluyendo la preservación del medioambiente, depende, fundamentalmente, de las decisiones que tomemos a partir de ahora; y, segunda, que una decisión clave es promover lo que este libro llama «una nueva Ilustración»: un amplio diálogo para establecer unas nuevas bases filosóficas y éticas que sustenten una economía, una sociedad, una cultura y una regulación adaptadas al nuevo entorno científico-tecnológico, para maximizar sus efectos positivos sobre el crecimiento y el bienestar, promover una mejor distribución y favorecer el desarrollo de iniciativas comunes para afrontar el cambio climático y el deterioro del medioambiente y de la biodiversidad. Esta será una tarea larga y difícil, pero, cuanto más pronto y más decididamente la emprendamos, mayores serán las posibilidades de éxito. La alternativa, el fracaso, es impensable, porque abre la posibilidad de las distopías que hoy algunos anuncian y muchos temen.

Francisco González
Presidente, BBVA

Francisco González
**Hacia la nueva
Ilustración digital:
el papel de la
industria financiera**

7—25



Martin Rees
**La última década
y el futuro de la
cosmología y
la astrofísica**

26—44



José Manuel Sánchez Ron
**Cuando el pasado
se hace futuro: la física
en el siglo XXI**

45—71



María Martín-Torres
**Antropología:
qué hemos aprendido
en la última década**

72—84



Alex Pentland
**Datos para una
nueva Ilustración**

85—105



Sandip Tiwari
**El espíritu en la máquina.
La nanotecnología, la
complejidad y nosotros**

106—126



Joanna J. Bryson

127 — 159

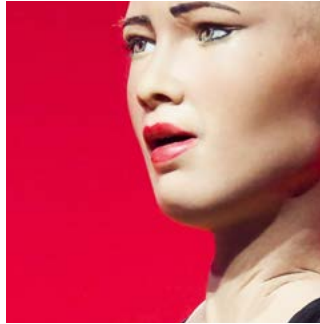
**La última década
y el futuro del impacto
de la IA en la sociedad**



Ramón López de Mántaras

160 — 174

**El futuro de la IA: hacia
inteligencias artificiales
realmente inteligentes**



José M. Mato

175 — 187

**Transformar
el conocimiento
en salud**



Daniela Rus

188 — 202

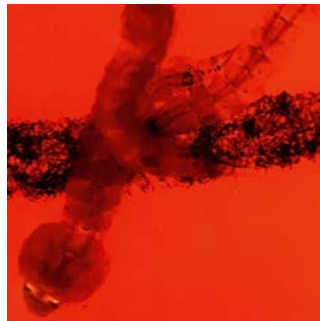
**Robótica: una
década de
transformaciones**



Samuel H. Sternberg

203 — 219

**La revolución biológica
de la edición genética
con tecnología CRISPR**



Peter Kalmus

220 — 246

**Cambio climático:
la humanidad en la
encrucijada**



Ernesto Zedillo Ponce de León

247—265

**La última década
y el futuro de la
globalización**



Victoria Robinson

266—278

**Desigualdades de
género: problemas
«pasados» y futuras
posibilidades**



Barry Eichengreen

279—295

**La última década
y el futuro de la
economía global**



Michelle Baddeley

296—310

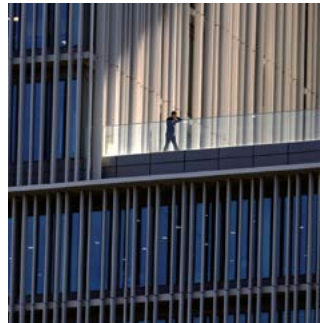
**Economía
conductual: pasado,
presente y futuro**



Nancy H. Chau y Ravi Kanbur

311—325

**Pasado, presente
y futuro del desarrollo
económico**



Vivien A. Schmidt

326—346

**La última década y el
futuro de la gobernanza y la
democracia: desafíos populistas
a la democracia liberal**



Diana Owen

347—365

La última década y el futuro de la comunicación política: la hegemonía de las redes sociales



Yang Xu y Carlo Ratti

366—380

A la conquista de las ciudades divididas



Amos N. Guiora

381—407

Ciberseguridad: un modelo de cooperación





Francisco González
Presidente, BBVA

Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales por la Universidad Complutense de Madrid, Francisco González es presidente de BBVA desde el año 2000. Es miembro del Consejo de Administración del Institute of International Finance (IIF) y de su Executive Committee. Es miembro del European Financial Services Round Table (EFR), del Institut International d'Etudes Bancaires (IIEB), del International Advisory Panel del Monetary Authority of Singapore (MAS), del International Business Council (IBC), del World Economic Forum (WEF) y del Global Advisory Council de The Conference Board (TCB), de cuyo Board of Trustees es además miembro, entre otros foros internacionales. Además, representa a BBVA en el International Monetary Conference (IMC). Es presidente de la Fundación BBVA. Previamente a la fusión del Banco Bilbao Vizcaya y Argentaria, fue presidente de Argentaria entre 1996 a 1999, donde lideró la integración, transformación y privatización de un grupo diverso de bancos públicos. Inició su carrera profesional en 1964 como programador en una empresa informática, época de la que viene su clara apuesta por transformar la banca del siglo XXI con el apoyo de las nuevas tecnologías.

Libro recomendado: AA VV (2017). *La era de la perplejidad: Repensar el mundo que conocíamos*, Madrid, OpenMind/BBVA.

La última década ha sido un periodo convulso. La crisis financiera y la incertidumbre ante los efectos de la globalización y la revolución tecnológica han llevado a un amplio cuestionamiento del orden global de democracia representativa y libre mercado. En este artículo se argumenta que para materializar el enorme potencial de crecimiento y bienestar para todos que representa la revolución tecnológica, y disipar ese clima de descontento y pesimismo, necesitamos una nueva Ilustración: una renovación de nuestras bases filosóficas y éticas y de la arquitectura política, económica y legal. Este puede ser un proceso largo y complejo, pero es posible dar pasos inmediatos, con reformas económicas y legales. La transformación digital de la industria financiera es una de estas reformas capaces de mejorar la productividad e impulsar un crecimiento más inclusivo.

Una década trascendente (y convulsa)



Vivimos un periodo convulso, en el que patrones políticos, económicos y sociales que parecían muy firmes, casi permanentes, están siendo radicalmente cuestionados. Sin duda, a ello ha contribuido mucho la crisis financiera que ha marcado la última década. Ochenta años después de la Gran Depresión, y después del periodo de mayor prosperidad global conocido, que arrancó con el fin de la Segunda Guerra Mundial y culminó con la «Gran Moderación» de los primeros años de este siglo, el mundo volvió a experimentar una profunda crisis económica de ámbito global.

La crisis, con sus secuelas de desempleo, rápido deterioro de las cuentas públicas y políticas de austeridad, ha afectado muy particularmente a los países más desarrollados. La caída del producto y de las rentas fue mayor y más prolongada; y los recortes en las políticas sociales han tenido un impacto mayor en sus poblaciones, tradicionalmente mucho más protegidas e inmersas en un proceso de rápido envejecimiento. Las dudas sobre la sostenibilidad del Estado de bienestar, que ya habían surgido anteriormente y habían dado lugar a reformas de corte liberal en muchos países, se han exacerbado. Además, estas dudas se han extendido a otros elementos clave del sistema liberal democrático. Así, han proliferado las opciones políticas populistas, las propuestas de soluciones autoritarias y se han debilitado la participación y la confianza de los ciudadanos en las instituciones y en las prácticas políticas y de representación democrática. En cambio, están en auge las soluciones populistas no intermediadas por las instituciones y los partidos tradicionales, que supuestamente representan al «pueblo» o al «verdadero pueblo» (Müller, 2017). El resultado es un aumento de la polarización política, con un debate mucho más sesgado y menos transparente, más centrado en el impacto a muy corto plazo que en la solución de los problemas y en la fabricación de enemigos y la confrontación que en la búsqueda de acuerdos. En paralelo, la información y la comunicación políticas se deterioran; las redes sociales favorecen la fragmentación de los medios y la polarización lleva al *framing* de las noticias o a formas deliberadas de desinformación, como las *fake news*.

Vivimos un periodo convulso, en el que patrones políticos, económicos y sociales que parecían muy firmes, casi permanentes, están siendo radicalmente cuestionados. A ello, sin duda, ha contribuido la crisis financiera que ha marcado la última década

En este entorno, los ciudadanos tienden a sentirse más inseguros y más pesimistas; por eso, se inclinan hacia soluciones más simples y drásticas y asumen identidades mucho más definidas y unidimensionales: nacionales, étnicas, religiosas, etcétera. El resultado de todo ello es una sociedad menos cohesionada, más dividida, y una mayor hostilidad frente a los que son percibidos como «diferentes» o «ajenos» y, particularmente, los inmigrantes. Sin embargo, estas actitudes de inseguridad y miedo (a los otros, al futuro) no se originaron con la crisis y han continuado en auge incluso durante la recuperación del crecimiento global en los últimos años. Ya en la década de 1990, el gran sociólogo Zygmunt Bauman (1998) acuñó el término *Unsicherheit* para denominar la combinación de incertidumbre, inseguridad y desprotección que percibía en las sociedades desarrolladas contemporáneas, y que él atribuyó a los efectos económicos, sociales y culturales de la globalización y a su difícil asimilación en contextos más próximos a las personas: nacionales, regionales o locales. Por otra parte, antes de la crisis, muchos economistas como Mary Kaldor (2004) explicaban fenómenos como los



llamados «nuevos nacionalismos» como reacciones frente a la globalización. Y, ciertamente, muchas de las nuevas propuestas políticas y económicas se definen, explícitamente, como antiglobalizadoras. La globalización se ve cuestionada, y ese cuestionamiento alcanza al marco geopolítico en el que se ha desarrollado.

Tras el fin de la Guerra Fría, Estados Unidos emergió como la única gran potencia hegemónica, garante de un mundo cada vez más abierto e interconectado (globalizado). Un mundo en el que parecía que el régimen liberal y democrático había triunfado y que se consolidaría progresivamente un orden mundial de democracias y economías de mercado crecientemente integradas. Pero esta visión del futuro resulta cada vez más incierta. La hegemonía de Estados Unidos ya no es tan nítida, por dos motivos principales. Primero, porque su peso en la economía global está disminuyendo, a medida que otras áreas, en especial China, crecen mucho más rápidamente. Y, segundo, porque Estados Unidos, tras la elección de Trump, ha adoptado una visión más unilateralista, centrada en sus intereses más inmediatos, en detrimento de su papel anterior como promotor de la democracia y del libre comercio. En paralelo, se están debilitando las iniciativas supranacionales de cooperación o integración económica (incluida la más ambiciosa de todas ellas, la Unión Europea), los acuerdos y organismos internacionales (como la OMC, fundamental para sostener la globalización) y los mecanismos de coordinación global de las políticas (el G8 o el G20).

Pero no se trata solo de la globalización. Sus impactos (atribuidos o contrastados, positivos o negativos) se entrelazan con los de la revolución tecnológica en marcha. Porque el avance tecnológico impulsa la globalización a través de la mejora en las telecomunicaciones y la mayor conectividad, y porque el ámbito global es el propio de la revolución tecnológica, en el que puede desarrollarse y extraer el máximo partido de su potencial. De hecho, a lo largo de la historia, los periodos de globalización y de aceleración del avance tecnológico normalmente han venido asociados.

El actual episodio de globalización se inició después de la Segunda Guerra Mundial, tras la Gran Depresión de 1929 y la reacción proteccionista y nacionalista a la que dio lugar. (Aquí, ciertamente, puede verse un paralelismo inquietante con la crisis de 2008 y la situación actual.) Y casi coincidiendo con la reorientación de la política y la economía globales arranca, en la década de 1950, la llamada «revolución de la información», que, desde entonces, se ha venido acelerando sin pausa. Esta ha sido una época de prosperidad global sin precedentes; la población mundial se ha triplicado y se han producido grandes mejoras de las condiciones de vida en la mayor parte del planeta con una reducción muy acusada del número de personas que viven en condiciones de pobreza (World Bank, 2018). Es imposible no atribuir al menos una gran parte de este buen comportamiento de la economía global a la globalización y a la revolución tecnológica, así como al fortalecimiento de las instituciones en muchos países emergentes. La extensión de los principios de libre mercado, el imperio de la ley y la mejora de la seguridad jurídica han ayudado a muchos países —sobre todo en Asia—, a dar un salto sin precedentes en su desarrollo, liderando e impulsando el crecimiento global. Al igual que siempre ha ocurrido en el pasado, la etapa de globalización y el avance tecnológico han aumentado la prosperidad y han creado más empleos que los que se han perdido (Mokyr *et al.*, 2015). ¿Por qué, entonces, estos sentimientos de inseguridad, frustración y pesimismo?

Como se ha señalado, la crisis y sus secuelas son parte de la explicación. Pero si fueran la única causa, estaríamos ante fenómenos temporales y se debería haber observado una mejora en este clima a medida que se consolidaba la recuperación poscrisis. Por eso, hay que profundizar más en los efectos de la globalización y el avance tecnológico, y uno de los más claros es el aumento de los flujos migratorios. La inmigración hacia los países desarrollados es necesaria, o incluso imprescindible para la sostenibilidad del crecimiento y de los sistemas



Reunión de emergencia en la oficina londinense de Lehman Brothers, en el distrito financiero de Canary Wharf, Londres, 11 de septiembre de 2008, cuatro días antes de la quiebra de la compañía y el inicio de la crisis financiera mundial





de protección social. Sin embargo, los inmigrantes con mucha frecuencia son vistos como competidores «desleales» por los empleos con los locales, que contribuyen a mantener bajos los salarios y «acaparan» los servicios sociales. Por otra parte, la globalización y el avance tecnológico, aunque no hayan tenido efectos negativos sobre la renta y el empleo agregados en los países desarrollados, sí han afectado a su composición y distribución. En particular, se han reducido los empleos y deprimido los salarios en los sectores manufactureros. En primer lugar, porque muchos de estos empleos se han desplazado a los países emergentes, con costes salariales más bajos; en segundo lugar, porque la automatización y la digitalización han hecho redundantes muchos empleos rutinarios y repetitivos, en gran medida concentrados en esos sectores. En cambio, han aumentado los empleos en el sector servicios, más difíciles de automatizar, pero en su mayoría de baja cualificación y remuneración y por los que compiten también los inmigrantes (Autor y Solomons, 2017). Simultáneamente, la inestabilidad del mercado de trabajo y la mayor rotación de los empleos han generado una proporción creciente de empleos a tiempo parcial, temporales o por cuenta propia, lo que se ha denominado *gig economy* (Katz y Krueger, 2016). La debilidad del crecimiento de los salarios en los países desarrollados es uno de los efectos más claramente contrastados de la globalización y el avance tecnológico. En contrapartida, ha aumentado el número (y, sobre todo, la retribución) de los empleos de alta cualificación. Y los fuertes aumentos de la productividad, así como las economías de escala y de red de los sectores más digitalizados, que impulsan el surgimiento de monopolios globales, han llevado a grandes acumulaciones de renta y riqueza por segmentos muy reducidos de la población.

El estancamiento de los salarios y el aumento de la desigualdad en los países desarrollados a los que están dando lugar la globalización y el cambio tecnológico, así como la preocupación por el futuro de los empleos, a la vista de lo ya sucedido en muchos sectores, están en la base del actual clima de incertidumbre y pesimismo

En resumen, la distribución de la riqueza generada por la globalización y el avance tecnológico ha sido muy desigual. Los ganadores han sido los más ricos, tanto en los países desarrollados como en los emergentes, y los trabajadores y las nuevas clases medias de muchos países emergentes, principalmente en China e India. Los perdedores han sido los más pobres entre los pobres (fundamentalmente en áreas como el África subsahariana). También las clases trabajadoras y medias de los países desarrollados y de muchos de los países del antiguo bloque comunista (Milanovic, 2016). El estancamiento de los salarios y el aumento de la desigualdad en los países desarrollados a los que están dando lugar la globalización y el cambio tecnológico, así como la preocupación por el futuro de los empleos, a la vista de lo ya sucedido en muchos sectores, están en la base del actual clima de incertidumbre y pesimismo (Qureshi, 2017).

Una nueva sociedad para la era digital

Al descontento por lo que ya ha ocurrido, se suma la inquietud (la perplejidad) que generan la velocidad y la magnitud del avance científico y tecnológico. La revolución en las biociencias y la revolución digital aparecen como fuerzas capaces de transformar no solo nuestra economía y nuestra sociedad, sino nuestro cuerpo y nuestra mente.



La anterior revolución industrial se basó en las máquinas para superar los límites físicos de los humanos y los animales. La actual se apoya en las tecnologías digitales y las biotecnologías para superar no solo nuestros límites físicos, sino también los intelectuales y los propios límites naturales de duración de nuestra vida. Todo esto nos obligará, más pronto que tarde, a replanteamientos radicales de nuestra economía, sociedad y cultura, nuestros principios éticos e incluso las bases filosóficas fundamentales de nuestra existencia como individuos y como especie.

La revolución en las biociencias y la revolución digital aparecen como fuerzas capaces de transformar no solo nuestra economía y nuestra sociedad, sino nuestro cuerpo y nuestra mente

Ciertamente, resulta imposible prever la naturaleza y la profundidad de los cambios ante una revolución tecnológica de tal magnitud, tan acelerada, y que se encuentra en sus inicios. Podemos temer todo tipo de distopías, pero también podemos ver en la revolución tecnológica una gran oportunidad para mejorar el bienestar de los ciudadanos de todo el mundo. A lo largo de la historia humana, el progreso económico y el bienestar social han venido siempre de la mano del avance técnico. Y esta vez no tiene por qué ser una excepción. Sin embargo, esos efectos positivos se manifestaron tras un proceso de transición largo y difícil, con ganadores y perdedores. Cabe recordar, por ejemplo, la suerte de los jornaleros agrícolas y de los pequeños propietarios, las pésimas condiciones salariales y de trabajo en las fábricas, la explotación infantil y de las colonias en los comienzos de la primera revolución industrial. Aún más, todas las revoluciones tecnológicas, desde el Neolítico, que trajo la agricultura y la urbanización, han requerido largos y profundos procesos de cambio en distintos ámbitos. Por ejemplo, para que se desarrollara la primera revolución industrial en Inglaterra a partir de mediados del siglo XVIII fue necesario que se sucedieran numerosas innovaciones tecnológicas relevantes, de las cuales la primera, y quizá más importante, fue la imprenta ¡tres siglos antes! También fueron necesarios los grandes descubrimientos de finales del siglo XV y el siglo XVI, que aumentaron los recursos disponibles en Europa Occidental y, sobre todo, cambiaron la visión del mundo. Otro elemento imprescindible fue la revolución científica en los siglos XVI y XVII: Bacon, Galileo, Newton, Leibniz y tantos otros hicieron posible el surgimiento de la ciencia tal y como hoy la entendemos. En paralelo, se fue produciendo un cambio en los sistemas políticos con el nacimiento y el desarrollo de los Estados nación, la transición hacia las primeras (y limitadas) democracias parlamentarias y, posteriormente, las revoluciones americana y francesa.

Todo ello fue configurando un cambio radical respecto al pensamiento hasta entonces dominante. El nuevo modelo, que se sintetizó en lo que llamamos la Ilustración dio el gran paso desde una mentalidad básicamente religiosa y estamental, a otra basada en la razón y en los hechos, que reconocía los derechos individuales de todas las personas, fuera cual fuera su rango. Este cambio filosófico fundamental sustentó los procesos de modernización económica, política, social, cultural, jurídica e institucional que condujeron a las democracias parlamentarias contemporáneas y al régimen económico de libertad de mercado que, tras décadas de éxito creciente, y tras haber superado la alternativa comunista, ahora se ve cuestionado.

Hoy, asistimos a una nueva revolución científica y tecnológica, la que se ha denominado la Cuarta Revolución Industrial (Schwab, 2016). Tenemos los recursos económicos y humanos



Activistas de Oxfam se manifiestan durante la reunión del G20 de julio de 2017, cubriendo sus rostros con las máscaras de las caras de líderes políticos (en la imagen, Vladimir Putin y el anterior primer ministro italiano Paolo Gentiloni) que se dieron cita en Hamburgo, Alemania





para hacerla avanzar. Sin embargo, esta revolución está operando sobre unas bases que, en lo esencial, corresponden a la época industrial. Esas bases deben ser renovadas para impulsar la Cuarta Revolución Industrial, para encauzarla, limitar sus riesgos y maximizar y hacer partícipe de sus beneficios al conjunto de la población global. Necesitamos, en suma, una nueva Ilustración, que organice los avances científicos y tecnológicos en un nuevo marco filosófico, nos ayude a ajustar nuestros criterios éticos y oriente cambios legales y políticos. Sin duda, este es un proceso muy complejo. Completarlo podría llevar décadas y, desde luego, desborda la capacidad de cualquier estado u organización supranacional.

Nos esperan años de profundo debate entre visiones diferentes y a menudo opuestas. Pero debemos estimular este proceso y acelerarlo en la medida de lo posible. ¿Cómo? Impulsando la conversación, la confluencia de las ciencias «duras» y la tecnología con las ciencias sociales y las «humanidades»: filosofía, ética, incluso las artes. Hoy tenemos las herramientas para que este debate sea verdaderamente transparente y global y esté abierto a todos los que puedan aportar. En paralelo, y mientras este proceso discorra, es importante concentrarse en aquello que se puede ya revisar y adaptar a nuevas situaciones; esto se traduce, principalmente, en trabajar en dos áreas, a su vez, estrechamente conectadas: la económica y la jurídica.

Una nueva economía política, una nueva arquitectura legal

En el ámbito de la política económica, es importante, primero, impulsar y potenciar los efectos positivos de la tecnología digital, con reformas que fomenten la investigación, el desarrollo y la innovación, apoyen el emprendimiento, impulsen la transparencia y la competencia en los mercados y, finalmente, favorezcan las infraestructuras necesarias para el despliegue y la adopción de las tecnologías digitales.

El mercado de trabajo, como se desprende de las páginas anteriores, es otra prioridad. Es preciso desarrollar mejores políticas frente al desempleo. Políticas que ofrezcan una adecuada protección social, pero que no desalienten la búsqueda de trabajo en un entorno de alta rotación del empleo. También fortalecer las políticas activas, que favorezcan el reciclaje y la movilidad de las personas. Es imprescindible, además, modernizar la regulación para afrontar mejor las cuestiones que plantea una diversidad mucho mayor de situaciones laborales: autónomos, trabajadores a tiempo parcial... Pero, seguramente, el elemento más importante de todos es la educación. Porque es la herramienta más poderosa para asegurar la igualdad de oportunidades y la movilidad social. En definitiva, necesitamos más y mejor educación para cerrar la brecha hasta ahora creciente de la desigualdad. Sin duda, la revolución tecnológica va a demandar mejoras en la formación técnica así como proporcionar destrezas que sean complementarias, y no sustitutivas, con los avances tecnológicos. Y, por supuesto, impulsar la formación continua y el reciclaje. Pero esto no es lo único; ni siquiera lo más importante: vivimos y vamos a seguir viviendo en un mundo de cambio acelerado. Por eso, es fundamental que la educación promueva ciertos valores y actitudes: la valentía frente al cambio, el espíritu emprendedor, la resiliencia y la capacidad de adaptación y el trabajo en equipo, entre otros.

El extraordinario avance de las biotecnologías y las tecnologías de la información plantea también retos muy complejos a la actual arquitectura regulatoria y legal existente. Al afrontar estos retos, es fundamental buscar un equilibrio: controlar los riesgos de la tecnología, sin obstaculizar indebidamente la innovación ni limitar sus efectos positivos, en forma de mejoras de la productividad, el crecimiento y la calidad de vida. Y, además, todo ello debe hacerse de la forma más coordinada posible a nivel global. Potencialmente, la regulación de todas las actividades o esferas de la vida habrá de ser revisada. Sin embargo, se pueden




destacar como prioritarios cinco ámbitos, muy estrechamente interrelacionados. El primero es el de la privacidad. Ya hay importantes iniciativas, como la Regulación General de Protección de Datos de la Unión Europea (GDPR, por sus siglas en inglés). Este es un buen primer paso, que en los próximos años habría que ir desarrollando y perfeccionando. Por otra parte, alcanza solo a los europeos. En última instancia, habrá que ir avanzando a nivel global hacia definiciones más precisas de los derechos de las personas sobre sus datos y mecanismos más sencillos y eficaces para proteger y hacer valer esos derechos.

El segundo aspecto es el poder de mercado. Las tecnologías digitales conllevan enormes economías de escala y de alcance y, por consiguiente, una tendencia «natural» hacia el monopolio. En la actualidad, por ejemplo, Apple y Google mantienen un duopolio en el mercado de sistemas operativos para teléfonos inteligentes. Facebook y Google, por su parte, dominan el mercado de la publicidad digital. Amazon se está volviendo cada vez más dominante en la distribución en línea y en la infraestructura de centros de datos. Estos son solo algunos ejemplos de fenómenos similares que podemos ver en otros muchos sectores como el transporte de pasajeros en las ciudades, la distribución de contenidos audiovisuales, etcétera. A este respecto, existe un elemento de preocupación. ¿Están las nuevas tecnologías socavando las estructuras de competencia que impulsaron el crecimiento en el siglo XX? Más allá del fenómeno de las plataformas antes citadas, distintas evidencias macroeconómicas muestran una creciente polarización de la productividad y las ventas en diferentes industrias (Van Reenen, 2018). La producción se estaría concentrando en un número pequeño de empresas con altos márgenes de beneficios.

En contrapartida, se argumenta que las nuevas tecnologías no estarían deteriorando los mecanismos de la competencia, sino simplemente cambiándolos; la concentración no estaría reduciendo los incentivos y las oportunidades para que todos compitan en condiciones de igualdad con el objetivo de convertirse, a su vez, en grandes empresas de éxito a nivel global. ¿Cómo podría ocurrir esto? Se argumenta que las nuevas tecnologías son fácilmente escalables y replicables. Esto debería favorecer la difusión de innovaciones generadas por cualquier empresa (incluidas las pequeñas) y limitar el abuso de poder por parte de los gigantes de la red. De hecho, aunque haya episodios de abuso de poder de mercado, por el momento no hay síntomas de colusión sistemática: los grandes de la red compiten entre sí por la captación de clientes y la expansión en nuevas actividades y mercados. Esta cuestión no está cerrada. Pero, en todo caso, el riesgo de una reducción permanente de la eficiencia en múltiples mercados debería llevarnos a diseñar políticas adecuadas de fomento de la competencia en el entorno digital.

Otro aspecto importante es la concentración de la renta y la riqueza en un número reducido de personas vinculadas a las grandes compañías tecnológicas. Al tiempo, los salarios a nivel general han crecido muy moderadamente —o no han crecido en absoluto durante años—. Esto crea una sensación de agravio que aumenta cuando se percibe que esas grandes compañías maximizan a nivel global su contribución fiscal, pagando impuestos donde les resulta más conveniente. Ciertamente, hay que mejorar el control de los ingresos y beneficios de estas compañías, al igual que el reparto de los impuestos entre las diversas jurisdicciones donde tienen clientes o actividad. No obstante, esto requiere un alto grado de coordinación internacional y mantener los incentivos adecuados a la innovación.

También deben abordarse los problemas que han surgido en el ámbito de la información; la irrupción de nuevos medios digitales, incluidas las redes sociales, ha tenido un efecto distorsionador sobre la difusión de las noticias y la transparencia informativa. Y, por último, debe asignarse una alta prioridad a la ciberseguridad, que abarca desde los delitos cometidos a través de las redes sociales hasta las amenazas a la seguridad nacional de los países.



La educación es la herramienta más poderosa para asegurar la igualdad de oportunidades y la movilidad social. Necesitamos más y mejor educación para cerrar la brecha hasta ahora creciente de la desigualdad

Biblioteca del campus del Indian Institute of Management Bangalore (IIMB), diseñado por el arquitecto indio Balkrishna Doshi



AA-AR





Varios manifestantes muestran pancartas durante una votación municipal en Seattle, pidiendo que graven un nuevo impuesto a las multinacionales con sede en la ciudad, entre otras a Amazon, como forma de combatir la subida de los precios de la vivienda





Todos estos elementos habrán de tenerse en cuenta en el futuro de las políticas tecnológicas y en su regulación. Se trata de una tarea extraordinariamente compleja, pero fundamental si queremos que la revolución tecnológica genere prosperidad y bienestar a la altura de su potencial.

Y más allá de la regulación, que inevitablemente irá con retraso respecto a los desarrollos tecnológicos y de negocio, necesitamos definir y extender un enfoque ético a la generación y aplicación de los avances científicos y tecnológicos. Un enfoque que integre valores morales y culturales en desarrollos como las aplicaciones biotecnológicas o la inteligencia artificial. Por ejemplo, si pensamos que el sistema político democrático merece perdurar para las próximas generaciones, los sistemas de información que utilicen los gobiernos democráticos deben estar diseñados para favorecer los derechos humanos, el pluralismo, la división de poderes, la transparencia, la equidad y la justicia. De la misma forma, debemos velar porque los algoritmos de inteligencia artificial utilizados para el contacto con personas en cualquier negocio o actividad no estén sesgados, no discriminen en contra de ciertos grupos y no interfieran indebidamente en la libertad de sus procesos de decisión.

Para todo ello, necesitamos cambiar la forma en la que trabajamos con la tecnología, generando ecosistemas más abiertos, participativos y pluridisciplinarios, en los que más personas puedan aportar ideas, talento y recursos. Tenemos, sin duda, la capacidad de desarrollar tecnología que no nos esclavice y que, en cambio, nos ayude a vivir mejor. Pero para eso, tenemos que incorporar valores éticos al diseño de esa tecnología. Si lo conseguimos, la Cuarta Revolución Industrial podría, efectivamente, ser mucho menos perturbadora y más inclusiva que las anteriores, una fuente de prosperidad y bienestar para todos.

Una nueva banca para una nueva sociedad

A este objetivo puede contribuir mucho un sistema financiero «digital», mucho más ágil y eficiente, capaz de mejorar la vida de las personas e impulsar un crecimiento más inclusivo. Las tecnologías digitales tienen un enorme potencial para impulsar esa transformación, con enormes beneficios para los consumidores individuales y las empresas, en términos de calidad, variedad, conveniencia y precio de los productos. Y permitirá, también, que miles de millones de personas de todo el mundo, pertenecientes a los estratos más bajo de ingresos, tengan, por fin, acceso a los servicios financieros, aumentando sus posibilidades de prosperar.

La última década ha sido un periodo muy difícil para la banca. Después del impacto durísimo de la crisis financiera, con la caída de muchos bancos y un efecto muy negativo sobre la reputación de la industria, esta afronta un periodo de crecimiento menor del negocio y de rentabilidad más baja, en un entorno de tipos de interés muy bajos y mayores requerimientos de capital. Al tiempo, los clientes han cambiado y demandan productos y servicios diferentes y nuevas formas de acceder a ellos. Y miles de nuevos proveedores (*start-ups* o, en algunos servicios, grandes compañías digitales) están atendiendo ya a estas demandas (Lipton, Shrier, y Pentland, 2016). Por tanto, en la transformación digital de la banca aparece un caso tanto de conveniencia para el bien general, como de necesidad del propio sector.

El panorama en el que se va a desarrollar esa transformación es muy complejo. A nivel global, el sector se está fragmentando por la entrada, cada año, de cientos de competidores que se suman a los 20.000 bancos que hay en el mundo. Al tiempo, la industria también se está desagregando; la inmensa mayoría de estos nuevos competidores rompen la cadena de valor de la banca, ofreciendo productos y servicios muy especializados. Pero esta tendencia tenderá a revertir en el futuro. Primero, porque la banca ya era un sector con sobrecapacidad,



que ahora se está agudizando. Por tanto, es previsible que muchos bancos desaparezcan, junto con multitud de *start-ups*, cuya tasa de mortalidad es siempre muy alta. Por otro lado, la conveniencia de los usuarios demanda soluciones completas e integradas y, apunta, por tanto, a una reagregación de la oferta.

A la vista de lo ocurrido en otros sectores, lo más probable es que esta reagregación se consiga por medio de plataformas donde diferentes proveedores competirán y, a menudo, también cooperarán para hacer la mejor oferta a los clientes (González, 2017). Los «dueños», gestores de estas plataformas, controlarán la información que se genere en las transacciones y los accesos a los clientes finales, lo que representa un gran caudal de valor.

¿Qué tipo de empresas conseguirán esta posición? Quizá algunas *start-ups* especialmente exitosas; seguramente, alguna(s) de las grandes compañías digitales actuales y, probablemente, también, aquellos (pocos) bancos que sepan transformarse y adaptarse a este nuevo entorno.

Los bancos tienen una buena oportunidad para competir con éxito porque conocen su negocio, están acostumbrados a operar en entornos regulados y tienen la confianza de los clientes en una materia tan delicada como es el dinero. Y sobre esa confianza, y la información que tienen sobre sus clientes, pueden construir una plataforma que incorpore muchos más servicios. Sin embargo, el proceso de transformación necesario no estará al alcance de la mayoría. La competencia será muy dura.

Pero esa competencia es, precisamente, la que puede llevar a un sistema financiero mucho mejor, más eficiente y productivo, capaz de ofrecer mejores soluciones para un mayor número de usuarios —incluyendo los miles de millones que hoy no pueden acceder a los servicios financieros— y capaz, por tanto, de apoyar el crecimiento y un aumento del bienestar que incluya a todos.

Sobre la confianza de los clientes y la información que tienen de ellos los bancos pueden construir una plataforma que incorpore muchos más servicios. Sin embargo, el proceso de transformación necesario no estará al alcance de la mayoría

Ahora bien, en el ámbito financiero, como en otros, materializar el impacto positivo de la tecnología depende en gran medida de las decisiones que tomemos, tanto los agentes privados como los poderes públicos (y, en este caso, y muy fundamentalmente, los reguladores y supervisores). Porque el avance tecnológico, al tiempo que ofrece grandes oportunidades, entraña riesgos. Y una perturbación grave en el sistema financiero tiene efectos negativos muy importantes sobre el crecimiento, el empleo y el bienestar. Esta, precisamente, es la razón por la que el sistema financiero ha estado sujeto a una regulación particularmente detallada y estricta. Y, en esta ocasión, los reguladores financieros afrontan una tarea especialmente difícil. Primero, porque digital significa global y el nuevo marco regulatorio deberá tener un grado de homogeneidad internacional mucho mayor que el actual. Y, segundo, porque los procesos de consolidación y reagregación que antes señalaba, en un contexto de márgenes y precios a la baja (tal y como impone el mundo digital), nuevos competidores no acostumbrados a operar en un marco altamente regulado, modelos de negocio en continua transformación y cambio tecnológico incesante, van a incrementar grandemente el número de entidades fallidas y la probabilidad de problemas sistémicos (Corbae y Levine, 2018).

El esquema de regulación y supervisión financiera actual, que se concentra en la protección del consumidor y en requerimientos de capital y liquidez, no es adecuado para afrontar



los retos de la innovación digital en la industria en tres áreas principales: la protección de los consumidores, la estabilidad financiera y el mantenimiento de un marco de competencia equilibrado. Es preciso construir una nueva regulación financiera sobre bases muy distintas. Una regulación que no se centre en cierto tipo de entidades, sino en las actividades y los riesgos que implican, cualquiera que sea la entidad que las realice; una regulación holística, es decir, que considere también la protección de datos, la ciberseguridad y la competencia. Y debe hacerlo teniendo en cuenta los diferentes ángulos de la cuestión (tecnológico, jurídico, financiero y competitivo). Una regulación transversal, fundamentada en una estrecha coordinación entre autoridades de diferentes sectores y países, que involucre al sector privado desde el comienzo del proceso de diseño de la regulación. Y, por último, flexible, capaz de adaptarse a un entorno cambiante, tanto lo que se refiere a la tecnología como en lo relativo a los modelos de negocio.

Ciertamente, este es un programa muy ambicioso, pero que puede abordarse de manera pragmática, a partir de seis prioridades: la protección de los datos y el acceso a los mismos, el desarrollo de la computación en la nube para la industria financiera, el cibercrimen, los nuevos desarrollos en el área de pagos, la facilitación de la innovación, permitiendo el desarrollo de innovaciones en entornos controlados (*sandboxes*) y, por último, la construcción de un terreno equilibrado, tanto para los nuevos entrantes como para las entidades ya establecidas.

En lo relativo a los datos, sin embargo, la regulación financiera es una prolongación de una regulación mucho más general del conjunto de los datos de las personas, incluyendo aspectos tan delicados como los médicos. Por eso, su desarrollo debe ligarse a los progresos que se están haciendo en el ámbito más general. Diferentes autoridades, incluyendo el FMI, el Comité de Supervisión Bancaria de Basilea y la Autoridad Bancaria Europea, ya están analizando estas cuestiones; sin embargo, su alcance es limitado y parcial, y ante la falta de coordinación global, las autoridades nacionales están abordando estos temas con enfoques diferentes.

Es imprescindible abrir un debate internacional sobre los temas clave y definir un conjunto común de principios. Este va ser un proceso largo y complejo, en el que los avances van a ser lentos, muchas veces parciales y siempre sujetos a revisión a medida que la tecnología y los modelos de negocio cambian. Pero es una tarea imprescindible para construir un mejor sistema financiero global.

Es preciso construir una nueva regulación financiera que se centre en las actividades y los riesgos que implican, cualquiera que sea la entidad que las realice; una regulación holística, es decir, que considere también la protección de datos, la ciberseguridad y la competencia

Y, además, o incluso por encima de una nueva (buena) regulación, necesitamos principios y valores éticos sólidos. La reputación, la confianza del cliente es, en este mundo digital, un activo tan valioso (o más valioso) que la mejor tecnología. Estos valores tienen que estar plenamente integrados en la cultura de las entidades que quieren tener éxito en la era digital. Y aquí es posible que los bancos, a pesar de sus errores pasados y los problemas de reputación que ha tenido la industria, tengamos una ventaja sobre otros competidores que provienen de otros sectores: los bancos siempre hemos sabido el valor de la reputación y hemos aprendido mucho en estos últimos años tan duros.



BBVA comenzó su transformación digital, o «largo viaje digital», en 2007, hace ya más de diez años. No arrancamos de la nada. Desde el comienzo teníamos muy clara la visión de que la tecnología iba a transformar radicalmente nuestra industria. No se trataba, simplemente, de mejorar, incluso de manera drástica, la eficiencia de los bancos o de dotarles de nuevos canales «remotos» de distribución. Se trataba de convertir a los bancos en otro tipo de compañías diferentes, capaces de competir en un ecosistema completamente nuevo, con clientes diferentes de los del pasado y con competidores de otras especies.

Emprendimos entonces la ejecución de esa visión: una transformación profunda, que se basó en tres pilares: principios, personas e innovación. Empezamos a dotarnos de la mejor tecnología y a aplicarla a nuestras operaciones, a nuestro negocio. Pero siempre tuvimos presente que la tecnología es una herramienta al servicio de las personas: los clientes y, por supuesto, el equipo humano de BBVA. Pronto comprendimos que para ejecutar esa transformación hacía falta contar con el mejor talento. Y aplicar ese talento y esa tecnología para ofrecer las mejores soluciones a nuestros clientes y establecer una relación duradera con ellos, basada en la confianza. No solo su confianza en nuestra competencia técnica, sino, sobre todo, su confianza en que iban a ser tratados con honestidad. Disponer del mejor equipo humano y de una excelente reputación entre los clientes es clave en la banca. Por eso, siempre hemos dado el máximo peso a los valores: la prudencia, la transparencia, la integridad.

Los años transcurridos desde entonces han sido muy difíciles para la industria. Hemos atravesado la crisis y el periodo sucesivo de reforzamiento de la regulación y la supervisión, con el aumento correspondiente de las exigencias de capital y de caída de rentabilidad de la industria. La solidez de nuestros principios nos ha permitido salir fortalecidos de este duro periodo, sin ninguna inyección de capital público, ni siquiera de ampliar capital por razón de la crisis, como tuvieron que hacer tantos de nuestros pares.

Al tiempo, el avance tecnológico y su adopción por la industria han seguido acelerándose. Cuando iniciamos nuestro proyecto de transformación de telefonía inteligente estaba muy poco extendida —y las capacidades de los aparatos eran muy inferiores a las de ahora—. En 2007, Apple lanzó el primer iPhone y, en una década, el teléfono se ha convertido en el principal vehículo de interacción de los clientes con los bancos.

En BBVA hemos realizado una profunda transformación cultural; los principios básicos no han cambiado, pero sí las formas de trabajo, las estructuras de organización, los talentos y las actitudes que había que promover: la actitud positiva frente al cambio, la flexibilidad, el trabajo en equipo, la obsesión por el cliente, por mejorar siempre su experiencia

También esta ha sido la época de la eclosión de la computación en la nube y el *big data*. Y más recientemente, los desarrollos de inteligencia artificial y las tecnologías de registros distribuidos (*distributed ledgers*), base de *blockchain*, pueden ser la base de transformaciones aún más profundas y hoy en buena parte imprevisibles, en la industria durante los próximos años. Todos estos desarrollos han afectado a nuestro proyecto y nos han obligado a introducir cambios en su diseño original (algunos de mucho calado).



Equipo trabajando con metodología de trabajo
Agile, en BBVA





Otro aspecto clave es la configuración del equipo. Para ejecutar con éxito un proyecto pionero se necesita el mejor talento. Y durante un tiempo resultó difícil atraer talento digital porque un banco convencional no parecía un destino obvio; esto, a su vez, retrasaba los avances creando un círculo vicioso. Pero con mucho esfuerzo nos fuimos convirtiendo en un lugar mucho más atractivo para trabajar, una mezcla exitosa de talento digital y talento financiero (que ya teníamos en abundancia) ha conseguido invertir la situación para desembocar en un círculo continuo en el que los avances en nuestro proyecto atraen más talento que nos ayuda a progresar aún más. Y en relación con el equipo humano, es clave la configuración de un grupo de dirección excelente, que entienda el proyecto, lo comparta y sea capaz de impulsarlo.

Por último, pero no menos importante, hemos venido trabajando en una profunda transformación cultural; los principios básicos no han cambiado, pero sí las formas de trabajo, las estructuras de organización, los talentos y las actitudes que había que promover: la actitud positiva frente al cambio, la flexibilidad, el trabajo en equipo, la obsesión por el cliente, por mejorar siempre su experiencia, el foco en la ejecución, la ambición por mejorar siempre, por plantearse grandes metas y perseguirlas con tesón.

A lo largo de esta década, nos hemos equivocado muchas veces: con la tecnología, con ciertos equipos, pero hemos aprendido de nuestros errores y hemos seguido trabajando. Hoy tenemos una tecnología puntera en la industria, pero, sobre todo, tenemos los equipos, los talentos, una organización (*agile*), el liderazgo y la cultura que nos permiten avanzar cada vez más rápidamente. Y todo esto se ha traducido en resultados muy importantes:

—Nuestra aplicación de banca móvil en España ha sido considerada por Forrester como la mejor del mundo en 2017 y 2018 (y la segunda mejor la de nuestro banco en Turquía, Garanti).

—En junio de 2018 el 46% de nuestros clientes eran digitales y el 38% móviles. En 2019 serán más del 50%. Y las ventas digitales se aproximan al 50% del total.

—Y lo que es más importante: la satisfacción de nuestros clientes digitales es muchísimo más alta que la de los convencionales. En gran medida, por eso nuestro índice global de satisfacción de los clientes está subiendo continuamente y ya somos líderes en la mayor parte de los países en los que operamos.

Hoy, BBVA está en la vanguardia del sistema financiero global. Queda mucho por hacer: la tecnología cambia constantemente, surgen nuevas ideas, nuevos modelos de negocio, nuevos competidores cada vez más fuertes. Pero esa competencia es la que nos permite cada día «poner al alcance de todos las oportunidades de esta nueva era», tal y como establece nuestro propósito, y contribuir a mejorar el sistema financiero global.

Bibliografía

- Autor, D. y Salomons, Anna (2017): «Does productivity growth threaten employment?». Artículo redactado para el Foro del BCE sobre banca central, Sintra, junio 2017.
- Bauman, Zygmunt (1998): *Globalization. The Human Consequences*, Nueva York, Columbia University Press. [Ed. esp. (1999): *La Globalización. Consecuencias Humanas*, México, Fondo de Cultura Económica.]
- Corbae, D. y Levine, Ross (2018): «Competition, stability, and efficiency in financial markets». Presentado en el simposio en Jackson Hole del Federal Reserve Bank de Kansas City del 23 al 25 de agosto.
- González, F. (2017): «De la era de la perplejidad a la era de las oportunidades: Finanzas para el crecimiento», en AA VV, *La era de la perplejidad: Repensar el mundo que conocíamos*, Madrid, OpenMind/BBVA.
- Kaldor, Mary (2004): «Nationalism and Globalization», en *Nations and Nationalism*, n.º 10, pp. 161-177.
- Katz, Lawrence F. y Krueger, Alan B. (2016): *The Rise and Nature of Alternative Work Arrangements in the United States 1995-2015*, Cambridge, National Bureau of Economic Research.
- Lipton, A.; Shrier, David y Pentland, Alex (2016): *Digital Banking Manifesto: The End of Banks?*, Cambridge, MIT.
- Milanovic, Branko (2016): *Global Inequality. A New Approach for the Age of Globalization*, Cambridge, Harvard University Press.
- Mokyr, Joel; Vickers, Chris y Ziebarth, Nicolas L. (2015): «The history of technological anxiety and the future of economic growth: is this time different?», en *Journal of Economic Perspectives*, n.º 293, pp. 31-50.
- Müller, J. W. (2017): «El auge ¿imparable? del populismo», en AA VV, *La era de la perplejidad: Repensar el mundo que conocíamos*, Madrid, OpenMind/BBVA.
- Qureshi, Zia (2017): «Una tecnología avanzada, pero crecimiento más lento y desigual: paradojas y políticas», en AA VV, *La era de la perplejidad: Repensar el mundo que conocíamos*, Madrid, OpenMind/BBVA.
- Schwab, Klaus (2016): *The Fourth Industrial Revolution. What it Means, How to Respond*, Ginebra, World Economic Forum. [Ed. esp. (2016): *La Cuarta Revolución Industrial*, Barcelona, Debate.]
- Van Reenen, John (2018): «Increasing differences between firms: market power and the macro-economy». Presentado en el simposio en Jackson Hole del Federal Reserve Bank de Kansas City del 23 al 25 de agosto.
- World Bank (2018). Disponible en <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=poverty-and-equity-database> [consultado el 06/10/2018].



Martin Rees
University of Cambridge

Martin Rees es cosmólogo y científico espacial. Estudió en la Universidad de Cambridge, a la que regresó como profesor después de desempeñar varios puestos dentro y fuera de Reino Unido. Es director del Instituto de Astronomía y rector del Trinity College. Sus aportaciones nos han ayudado a entender mejor fenómenos como la formación de galaxias, los agujeros negros, la energía del cosmos y el concepto de multiverso. Sus investigaciones han sido reconocidas internacionalmente. Como miembro de la Cámara de los Lores británica, presidente de la Royal Society (entre 2005-2010) y miembro de la Academia de Ciencias de Reino Unido y la Commonwealth, ha participado en la elaboración de políticas científicas. A sus investigaciones suma la labor de divulgador científico en libros y conferencias. Es autor de ocho libros, el más reciente de los cuales es *On the Future* [Sobre el futuro] (Princeton, Princeton University Press, 2018).

Libros recomendados: Rees, Martin (2012): *Universe* [Universo], Londres, Dorling Kindersley; Rees, Martin (2018), *On the Future*, Princeton, Princeton University Press

En la última década se han hecho progresos espectaculares en la exploración del cosmos. Los hitos incluyen estudios detallados de los planetas y lunas de nuestro sistema solar y la constatación (más espectacular aún), de que la mayoría de las estrellas están orbitadas por planetas y de que en nuestra galaxia hay millones de planetas similares a la Tierra. A una escala todavía mayor, hemos mejorado nuestro entendimiento de cómo se han desarrollado las galaxias a lo largo de 1.380 millones de años de historia cósmica, desde las fluctuaciones primigenias. Es posible que estas fluctuaciones se generaran por efectos cuánticos cuando todo el cosmos era de tamaño microscópico. La teoría de Einstein se vio de nuevo confirmada con la detección de la onda gravitacional, un monumental logro tecnológico. Los avances futuros dependerán de la disponibilidad de instrumentos más potentes, que podrían arrojar pruebas de que hay vida en los exoplanetas y brindar una mejor comprensión del *big bang*, el hecho científico por excelencia de nuestro cosmos.

Introducción

La astronomía es la más ambiciosa de las ciencias ambientales y la más universal: el cielo es, de hecho, el único elemento de nuestro entorno común que ha maravillado por igual a todas las culturas a lo largo de la historia. Hoy es un campo de estudio que comprende una amplia variedad de disciplinas: matemáticas, física e ingeniería, por supuesto. Pero también otras.

Los astrónomos buscamos cartografiar y examinar las distintas entidades —planetas, estrellas, galaxias, agujeros negros, etcétera— presentes en el cosmos. A continuación usamos nuestros conocimientos de física para intentar comprender los objetos exóticos que revelan nuestros telescopios. Un objetivo más ambicioso es comprender cómo el cosmos en su totalidad, del que somos parte, surgió de los inicios densos y ardientes del universo.

El ritmo de progreso se ha acelerado antes que ralentizado; los instrumentos y la capacidad informática han mejorado de manera inmensa y veloz. En la última década en concreto se han producido avances asombrosos. Y la promesa del futuro es más esplendorosa aún: la astronomía brinda excelentes oportunidades a los jóvenes investigadores que quieren entrar en un campo vibrante.

En este capítulo me centraré en tres temas: en primer lugar, los planetas y exoplanetas relativamente «locales» a una escala cósmica; en segundo, en la gravedad y los agujeros negros del ámbito extragaláctico, y en tercer y más hipotético lugar, en algunos conceptos que buscan comprender el cosmos en su totalidad.

Planetas, exoplanetas y vida

Los vuelos espaciales humanos han languidecido hasta cierto punto desde aquellos años en los que quienes hoy somos de mediana edad nos sentimos inspirados por el programa *Apollo* y los aterrizajes en la Luna.

Pero en lo referido a comunicación, monitorización ambiental, navegación por satélite, etcétera, la tecnología espacial ha madurado. Dependemos de ella cada día. Y para los astrónomos ha abierto nuevas «ventanas»: telescopios en el espacio nos muestran un remoto cielo de rayos infrarrojos, UVA, X y gamma. Aunque los seres humanos no se han aventurado más allá de la Luna, sondas no tripuladas a otros planetas nos han devuelto imágenes de mundos variados y peculiares.

Entre los momentos estelares de la pasada década, la misión Rossetta de la Agencia Espacial Europea logró aterrizar una pequeña sonda alrededor de un cometa para comprobar, por ejemplo, que las mediciones isotópicas del hielo del cometa eran las mismas que las del agua de la Tierra. Esto es crucial para averiguar el origen de esa agua. La sonda New Horizons de la NASA ha dejado ya atrás Plutón y se dirige ahora al cinturón Kuiper, repleto de planetas menores.

Rossetta tardó cerca de diez años en llegar a su destino y fueron necesarios casi otros diez para planearla y construirla. Su tecnología robótica data de la década de 1990, lo que es fuente de gran frustración para el equipo que desarrolló el proyecto, porque los diseños actuales tendrían capacidades mayores. Lo mismo puede decirse de New Horizons, que sin embargo nos devolvió imágenes en alta definición de Plutón, diez mil veces más lejos de la Tierra que la Luna. Y la sonda Cassini, que estuvo trece años explorando Saturno y sus lunas, es más antigua todavía: entre su lanzamiento y su llegada a Saturno, a finales de 2017, transcurrieron veinte años.

Sabemos cómo han cambiado los teléfonos móviles en los últimos quince o veinte años, así que imaginemos lo sofisticado que puede llegar a ser hoy la continuación de estas misio-





nes. Durante este siglo el sistema solar en su totalidad —los planetas, las lunas y los asteroides— serán explorados y cartografiados por flotillas de diminutas tripulaciones robóticas que interactuarán igual que bandadas de pájaros. Fabricadores robóticos gigantes serán capaces de construir, en el espacio, inmensos captadores solares y otros artefactos. Los sucesores del telescopio Hubble, con enormes espejos tan delgados como una gasa ensamblados en gravedad cero, ampliarán aún más nuestra visión de las estrellas, las galaxias y el cosmos en general. El paso siguiente podría ser la minería y fabricación espacial (y fabricar en el espacio supondría un uso más eficiente de los materiales extraídos de asteroides que traerlos hasta la Tierra).

Serán robots, no seres humanos, los que construirán estructuras gigantescas en el espacio. Y estos sofisticados robots explorarán planetas exteriores; tendrán que emplear técnicas de aprendizaje profundo e inteligencia artificial para tomar decisiones autónomas: el tiempo que tarda en viajar una señal de radio a los planetas exteriores se mide en horas, e incluso días, así que el control directo desde la Tierra no es posible. Estos robots serán humanoides. Los humanos están adaptados al entorno de la Tierra. Para la gravedad de Plutón o de los asteroides, en cambio, sería más práctica una apariencia más arácnida.

Pero ¿habrá un papel para los humanos en estas empresas? No se puede negar que *Curiosity*, el vehículo de la NASA del tamaño de un coche pequeño que lleva recorriendo los cráteres de Marte desde 2011 puede pasar por alto importantes descubrimientos que sí detectaría un geólogo humano. El aprendizaje de las máquinas avanza a gran velocidad, lo mismo que la tecnología por sensores; sin embargo, la diferencia de costes entre misiones tripuladas y no tripuladas sigue siendo abismal.

Los avances en robótica sin duda reducirán la necesidad de viajes espaciales tripulados por humanos. No obstante tengo la esperanza de que a los robots los sigan hombres, aunque habrán de ser aventureros movidos por el amor al peligro antes que por un objetivo práctico. Los avances más prometedores están impulsados por compañías privadas. Por ejemplo, SpaceX, liderado por Elon Musk, que también fabrica los coches eléctricos de Tesla, ha lanzado cohetes con carga útil sin tripular y que se han acoplado con la estación espacial. Musk confía en poder ofrecer pronto viajes orbitales a pasajeros de pago.

Serán robots, no seres humanos, los que construirán estructuras gigantescas en el espacio. Y estos sofisticados robots explorarán planetas exteriores; tendrán que emplear técnicas de conocimiento profundo e inteligencia artificial para tomar decisiones autónomas

De hecho, creo que el futuro de los viajes espaciales tripulados, incluso a Marte, está en manos de aventureros con financiación privada, preparados para participar en programas de bajo coste mucho más arriesgados de los que autorizaría ningún gobierno con participación de civiles, quizá incluso viajes solo de ida (La expresión «turismo espacial» debe sin duda evitarse. Anima a la gente a creer que emprendimientos de estas características son algo rutinario y poco peligroso y, de ser esa la percepción, los inevitables accidentes serán tan traumáticos como lo fueron los del transbordador espacial estadounidense. En lugar de ello, estas aventuras de bajo coste deben «venderse» como deportes peligrosos o exploraciones intrépidas).

Para 2100 es posible que grupos de pioneros hayan establecido bases independientes de la Tierra, en Marte o quizá en asteroides. Pero no debemos esperar emigraciones en masa de la Tierra. Ningún punto de nuestro sistema solar cuenta con un entorno tan clemente como

la Antártida o la cima del Everest. El espacio no es una solución a los problemas de la Tierra. Abordar el cambio climático en la Tierra es un juego de niños comparado con la terraformación de Marte.

¿Cuáles son las esperanzas a largo plazo de los viajes espaciales? El obstáculo crucial ahora mismo deriva de la ineficiencia intrínseca del combustible químico, que obliga a transportar una carga de combustible que excede con mucho la carga útil. Pero mientras dependamos de combustibles químicos, los viajes interplanetarios seguirán siendo un desafío. Un ascensor espacial ayudaría. Y la energía nuclear podría ser transformadora. Al permitir velocidades mucho mayores, recortaría de manera drástica los tiempos necesarios para llegar a Marte o a los asteroides (reduciendo no solo el aburrimiento de los astronautas, también su exposición a radiaciones nocivas).

La pregunta que con mayor frecuencia se hace a los astronautas es: «¿Hay vida ahí fuera? ¿Qué pasa con los extraterrestres de la ciencia ficción?». En este sentido, el panorama en nuestro sistema solar se presenta desolador, aunque el descubrimiento de formas de vida siquiera muy vestigiales —en Marte, en océanos bajo el hielo de Europa (una de las lunas de Júpiter) o en Encélado (una luna de Saturno)— sería de crucial importancia, sobre todo si se demostrara que esta vida tiene un origen independiente.

Pero las perspectivas mejoran si ampliamos nuestro horizonte a otras estrellas, mucho más allá del alcance que cualquier sonda actual permite imaginar. Ahora mismo el tema candente en astronomía es la constatación de que muchas otras estrellas —quizá incluso la mayoría de ellas— cuentan con un séquito de planetas que orbitan a su alrededor, lo mismo que el Sol. Estos planetas no se han observado directamente, pero su existencia se deduce a partir de mediciones precisas de su estrella anfitriona. Existen dos métodos:

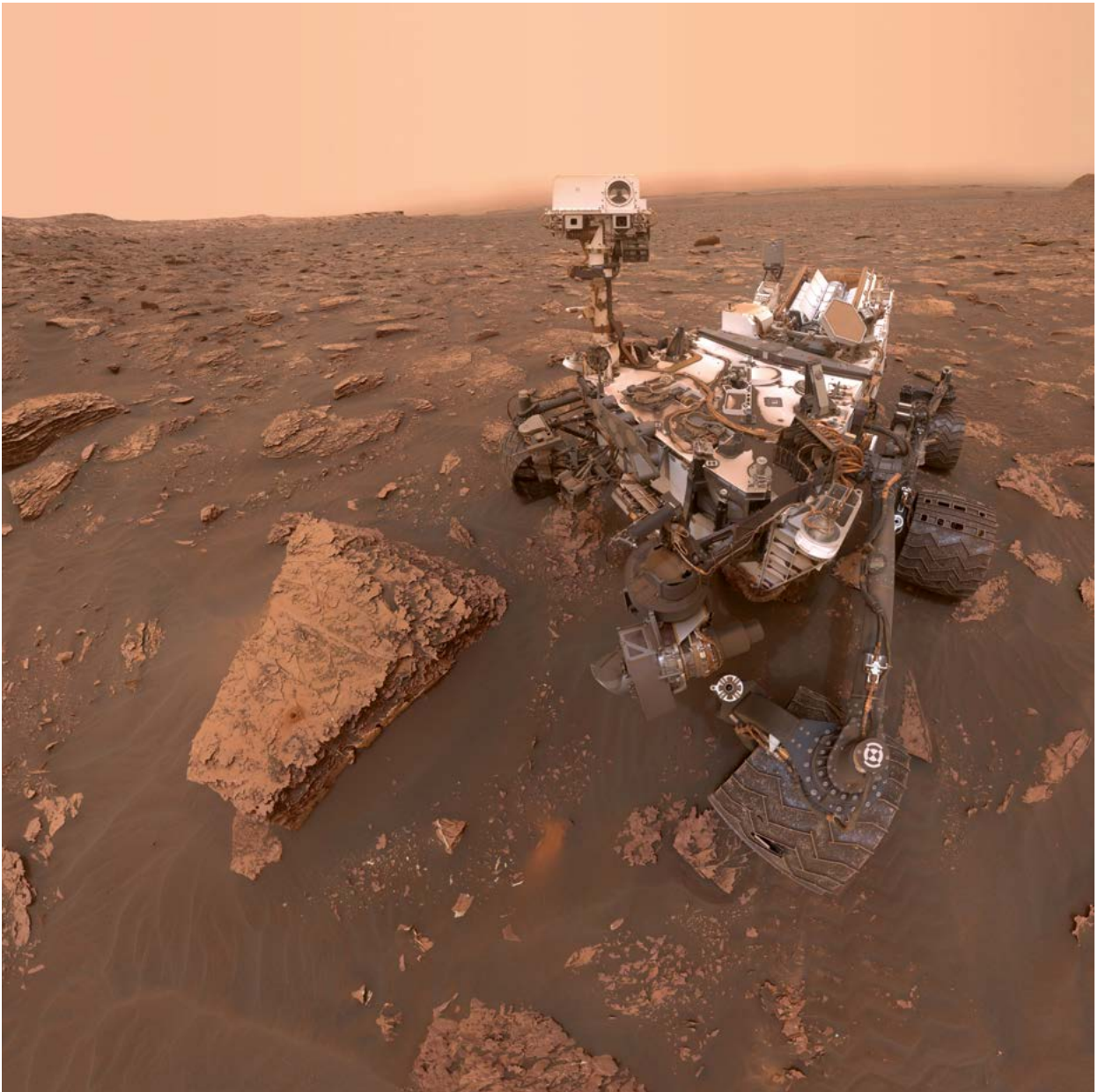
1. Si la estrella tiene un planeta orbitando a su alrededor, entonces tanto el planeta como la estrella se mueven alrededor de su centro de masa, el baricentro. La estrella, al ser de mayor tamaño, se mueve más despacio. Pero los diminutos cambios periódicos en el efecto Doppler de las estrellas pueden detectarse con un espectroscopio de alta precisión. A estas alturas se ha deducido con este método la existencia de más de quinientos planetas exosolares. Podemos inferir su masa, la longitud de su «año» y la forma de su órbita. Esta información se limita a planetas «gigantes», objetos del tamaño de Saturno o de Júpiter. Detectar planetas semejantes a la Tierra, es decir, cientos de veces más pequeños, es extremadamente difícil, puesto que provocan movimientos de meros centímetros por segundo en su estrella anfitriona.

2. Existe una segunda técnica que funciona mejor con planetas de menores dimensiones. Una estrella se atenúa levemente cuando un planeta «transita» delante de ella. Un planeta del tamaño de la Tierra que transitara delante de una estrella similar al Sol causaría un oscurecimiento mínimo, de cerca de una parte por cada 10.000, que se repetiría una vez cada órbita. La nave espacial Kepler estuvo más de tres años apuntando a un área de cielo de 7 grados de diámetro, registrando la luminosidad de más de 150.000 estrellas, al menos dos veces cada hora, con una precisión de una parte por cada 100.000. Ha encontrado más de 2.000 planetas, muchos de ellos no mayores que la Tierra. Y por supuesto solo detecta el tránsito de aquellos cuyo plano orbital casi coincide con nuestra línea de visión. Nos interesan de modo especial posibles «gemelos» de la Tierra, planetas del mismo tamaño que el nuestro, en órbitas con temperaturas en las que el agua ni hierva ni esté siempre congelada. Ya se han identificado algunos en la muestra tomada, lo que sugiere que en la galaxia hay miles de millones de planetas similares a la Tierra.





Por lo tanto, el robot explorador de la NASA Curiosity, el cual se lanzó el 6 de agosto de 2012 (15 de junio de 2013), ya no es el primer robot que se ha enviado a Marte. En realidad, ya se han enviado otros robots a Marte, pero ninguno de ellos ha sobrevivido a la travesía. El primer robot que se envió a Marte fue el Mars Pathfinder, el cual se lanzó el 4 de diciembre de 1996. Este robot se cayó en un agujero, resultado de la perforación de este en un objetivo llamado *Duluth*.





El verdadero reto es ver los planetas directamente, en lugar de deducir su existencia a partir de su estrella anfitriona. Pero eso es difícil. Para ilustrar la dificultad, imaginemos un astrónomo extraterrestre observando la Tierra con un telescopio desde (digamos) 30 años luz, la distancia a que está una estrella cercana. Nuestro planeta sería, en palabras de Carl Sagan «un punto azul pálido»,¹ muy cercano a una estrella (nuestro Sol) que tiene un resplandor miles de millones de veces mayor que él: como una luciérnaga comparada con una linterna. El tono de azul variaría ligeramente dependiendo de si lo que estaba delante era el océano Pacífico o la masa terrestre de Eurasia. Los astrónomos alienígenas deducirían la duración de nuestro «día», las estaciones, la topografía general y el clima. Al analizar esa luz tenue, deducirían que tenía una biosfera.

En un plazo de diez a quince años, el Telescopio Extremadamente Grande (ELT, por sus siglas en inglés) que está construyendo el Observatorio Europeo del Sur en una montaña de Chile con un espejo principal segmentado de 39 metros de diámetro, hará deducciones de este tipo respecto a planetas del tamaño de nuestra Tierra que orbiten alrededor de estrellas similares a nuestro Sol. Pero lo que la mayoría de la gente quiere saber es: ¿Podría haber en ellos vida? ¿Vida inteligente incluso? A este respecto, seguimos aún en el ámbito de la ciencia ficción.

Sabemos demasiado poco de cómo empezó la vida en la Tierra para formular hipótesis fiables. ¿Qué desencadenó la transición de moléculas complejas a entidades capaces de metabolizar y reproducirse? Es posible que interviniera un azar tan anómalo que solo se ha dado una vez en toda la galaxia. Por otro lado, esta transición crucial pudo ser casi inevitable, dado lo «favorable» del entorno. Lo cierto es que lo desconocemos, como tampoco sabemos si la composición química ADN-ARN de la vida terrestre es la única posibilidad, o solo una base química de entre muchas posibles que podrían darse en otra parte.

Más aún, incluso si existe vida simple, no podemos calcular las posibilidades que tiene de evolucionar a una biosfera compleja. E incluso si lo hiciera, podría ser distinta, hasta el punto de resultar indetectable. No quiero hacerme demasiadas ilusiones, pero el programa de Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre (SETI, por sus siglas en inglés) es una apuesta que merece la pena, porque, de tener éxito, nos traería el estimulante mensaje de que los conceptos de lógica y física no se limitan a lo que puede contener el cerebro humano.

Ahora mismo el tema candente en astronomía es la constatación de que muchas otras estrellas —quizá incluso la mayoría de ellas— cuentan con un séquito de planetas que orbitan a su alrededor, lo mismo que el Sol

Y, por cierto, es demasiado antropocéntrico limitar el interés a planetas similares a la Tierra, aunque empezar por ellos sea una estrategia prudente. Los autores de ciencia ficción tienen ideas distintas: criaturas semejantes de globos que flotan en las densas atmósferas de planetas tipo Júpiter, enjambres de insectos inteligentes, etcétera. Quizá la vida pueda prosperar incluso en un planeta catapultado a la gélida oscuridad del espacio interestelar, cuya principal fuente de calor procede de radioactividad interna (el proceso que calienta el núcleo terrestre). También deberíamos tener en cuenta que señales en apariencia artificiales podrían proceder de ordenadores superinteligentes (aunque no necesariamente conscientes), creados por una raza de seres alienígenas ya extinta. De hecho, esta es la hipótesis más viable.



Es posible que en este siglo averigüemos si la evolución biológica es algo exclusivo de nuestra Tierra o si el cosmos en su totalidad rebosa de vida, de inteligencia incluso. No podemos calcular las probabilidades de que esto ocurra. Incluso si la vida simple está extendida, sus probabilidades de evolucionar a algo que podemos identificar como inteligente o complejo es algo bien distinto. Podría ocurrir a menudo. O casi nunca. Esta última opción sería deprimente para los investigadores. Pero nos permitiría ser menos modestos desde un punto de vista cósmico: la Tierra, aunque diminuta, podría ser la entidad más compleja e interesante de toda la Galaxia.

El Telescopio Extremadamente Largo descubrirá exoplanetas, pero solo como puntos de luz. Pero para mediados de siglo es posible que haya espejos gigantes en el espacio capaces de proporcionarnos una imagen de mundos del tamaño de nuestra Tierra orbitando otra estrella. Quizá haya en ellos indicios de vegetación o de otra forma de vida. Hemos tenido, desde 1968, la famosa imagen —icónica entre los ambientalistas desde entonces— de nuestra Tierra tomada por los astronautas del *Apollo* orbitando la Luna. Quizá para cuando llegue su centenario, en 2068, tengamos una imagen aún más asombrosa: la de otra Tierra, es posible incluso que con biosfera.

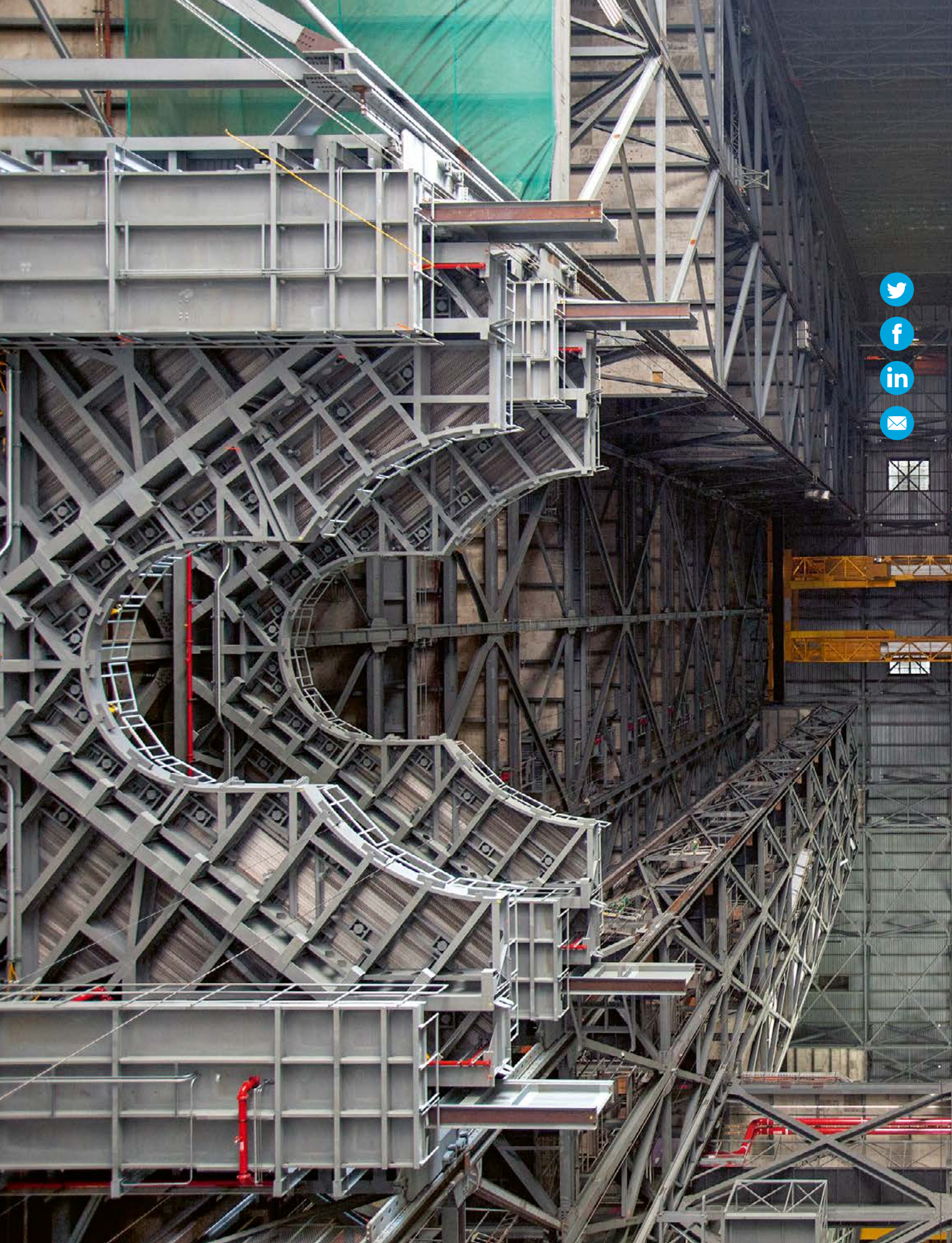
Gravedad fuerte y el cosmos a gran escala

Vayamos ahora al mundo, mucho más sencillo e inanimado, de la física y la química. Lo que más ha sorprendido de los sistemas planetarios recién descubiertos es su gran variedad. No nos ha sorprendido, en cambio, la ubicuidad de los exoplanetas. Hemos aprendido que las estrellas se forman mediante la contracción de nubes de gas y polvo; y si la nube tiene algún tipo de impulso angular, rotará a la misma velocidad a la que se contrae y saldrá de ella un disco polvoriento que girará alrededor de la protoestrella. En este disco, el gas se condensará en las partes exteriores, más frías; en las zonas más cercanas al polvo menos volátil, se aglomerará hasta formar rocas y planetas. Este debería ser el proceso genérico de la mayoría de protoestrellas.

La fuerza crucial que permite que se formen las estrellas y mantiene a los planetas en órbita a su alrededor es, por supuesto, la fuerza de la gravedad. Y la descripción más precisa del comportamiento de la gravedad hay que buscarla en la teoría de la relatividad de Einstein. Einstein no «destronó» a Newton, pero su teoría tenía una aplicación más amplia que la de este y ofrecía una comprensión más profunda de la gravedad en términos de espacio y tiempo. En palabras del gran físico J. A. Wheeler, «El espacio le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio cómo curvarse».² Esta magnífica teoría se propuso en 1915, pero durante los cincuenta años siguientes a su descubrimiento la relatividad estuvo de alguna manera aislada de la física y la astronomía convencionales. Los efectos gravitacionales que gobiernan las estrellas y las galaxias corrientes eran tan débiles que podían describirse mediante la teoría newtoniana. La relatividad general no era más que una enmienda minúscula.

Esta situación cambió en 1963 con el descubrimiento de los cuásares, cuerpos hiperluminosos situados en el centro de algunas galaxias, lo bastante compactos para variar en horas o días, pero que brillan mucho más que su galaxia anfitriona. Los cuásares revelaron que las galaxias contenían algo más que estrellas. Ese «algo» es un inmenso agujero negro situado en su centro. Los cuásares son tan brillantes porque, tal y como ahora sabemos, reciben energía de la emisión de gas magnetizado que se desplaza en un remolino hacia un agujero negro central.

Los cuásares fueron un importante estímulo para el nacimiento de la «astrofísica relativista», pero no el único. En concreto, otra sorpresa fue la detección de estrellas de neutrones.





La expansión cósmica puede continuar incluso tras la muerte del Sol. La hipótesis más probable es que tenemos por delante casi una eternidad: un cosmos más frío y más vacío todavía

Bahía Principal 3 dentro del Edificio de Ensamblaje de Vehículos del Centro Espacial Kennedy de la NASA, en Florida, Estados Unidos. La plataforma recién instalada completará el segundo de los diez niveles de plataformas de trabajo que rodearán y darán acceso al cohete SLS y la nave espacial *Orión* para la Misión de Exploración 1



Otro de los objetos mejor conocidos del cielo es la Nebulosa del Cangrejo: restos en expansión de una supernova identificados por astrónomos chinos en el 1054 d.C. Durante mucho tiempo fue un rompecabezas sin resolver que no dejaba de brillar, azul y reluciente. La respuesta llegó cuando se descubrió que la estrella de aspecto inocuo que había en su centro era cualquier cosa menos normal. En realidad se trataba de una estrella de neutrones que giraba a 30 revoluciones por segundo y emitía un viento de electrones rápidos, responsable de generar la luz azul. En las estrellas de neutrones, los efectos de la relatividad son del 10-20%, lo que supone algo más que una minúscula enmienda a la teoría de Newton.

Las supernovas son de crucial importancia para nosotros; de no ser por ellas no estaríamos aquí. Para cuando concluye la vida de una estrella gigante, la fusión nuclear ha dado lugar a una estructura de piel de cebolla, con capas interiores más calientes en puntos cada vez más altos de la tabla periódica. Este material sale despedido durante la explosión de la supernova. La basura espacial a continuación se mezcla en el medio interestelar y se recondensa en nuevas estrellas orbitadas por planetas.

El concepto lo desarrollaron primero Fred Hoyle y sus colaboradores. Analizaron las reacciones nucleares específicas del proceso y lograron comprender cómo habían nacido la mayoría de los átomos de la tabla periódica y por qué el oxígeno y el carbono (por ejemplo) son abundantes, mientras que el oro y el uranio escasean. Algunos elementos se forman en entornos más exóticos, por ejemplo, el oro se forma en las colisiones cataclísmicas de estrellas de neutrones, un fenómeno que no se observó hasta 2017, cuando una señal de onda gravitacional, interpretada como la fusión de dos estrellas de neutrones, se observó mediante telescopios que detectaron el fenómeno en muchas bandas distintas.

Nuestra galaxia es un gigantesco sistema ecológico donde el gas se recicla mediante generaciones sucesivas de estrellas. Cada uno de nosotros contenemos átomos forjados en docenas de estrellas distintas dispersas por la Vía Láctea que vivieron y murieron hace más de 4.500 millones de años contaminando la nube interestelar en la que se condensó el sistema solar.

En la década de 1960 se hicieron por primera vez verdaderos progresos en la comprensión de los agujeros negros desde que Julius Robert Oppenheimer y sus colaboradores aclararon, a finales de la de 1930, lo que ocurre cuando algo cae en un agujero negro y desaparece del mundo exterior (y es interesante hacer conjeturas sobre cuánto habría avanzado el trabajo de Oppenheimer si la Segunda Guerra Mundial no hubiera estallado exactamente el mismo día, el 1 de septiembre de 1939, que se publicó su artículo en *Physical Review*).

Los teóricos de la década de 1960 se sorprendieron cuando sus cálculos demostraron que todos los agujeros negros que se habían instalado en un estado estacionario eran objetos «estándares», definidos tan solo por dos números: su masa y su momento cinético. Ningún otro parámetro. Esta constatación impresionó mucho al gran teórico Subrahmanyan Chandrasekhar, quien escribió: «En toda mi vida científica, la experiencia más abrumadora ha sido constatar que la solución exacta a las ecuaciones de Einstein [...] proporciona la representación absolutamente exacta del número incalculable de agujeros negros que pueblan el universo».³

En el centro de la mayoría de las galaxias hay un cuásar muerto: un gigantesco agujero negro inactivo. Lo que es más, existe una correlación entre la masa del agujero y la de su galaxia anfitriona. Nuestra galaxia alberga un agujero de alrededor de cuatro millones de masas solares, un tamaño modesto comparado con los agujeros que hay en el centro de gigantescas galaxias elípticas, que pesan miles de millones de masas solares.

Einstein saltó a la fama mundial en 1919. El 29 de mayo de ese año hubo un eclipse solar. Un grupo encabezado por el astrónomo de Cambridge Arthur Eddington observó que durante el eclipse aparecían estrellas cerca del Sol. Las mediciones mostraban que dichas estrellas eran desplazadas de sus ubicaciones habituales y que la gravedad de Sol curvaba la trayectoria de su



luz. Esto confirmaba una de las predicciones clave de Einstein. Cuando se informó de los resultados a la Royal Society londinense, la prensa mundial difundió la noticia. «El cielo se llena de estrellas torcidas; Newton ha sido destronado»⁴ fue el desmesurado titular de *The New York Times*.

Y en febrero de 2016, casi cien años más tarde, se produjo otro anuncio igual de crucial, esta vez desde el Club de la Prensa de Washington, que proporcionaba la defensa más reciente y sólida de la teoría de Einstein. Se trataba de la detección de ondas gravitacionales por parte del Observatorio de Interferometría Láser de Ondas gravitacionales (LIGO, por sus siglas en inglés). Einstein había concebido la fuerza gravitatoria como una «curvatura» del espacio. Cuando los objetos gravitatorios cambian de forma, generan perturbaciones. Cuando una de estas perturbaciones atraviesa la Tierra, el espacio de alrededor «vibra»: se estira y se contrae alternativamente a medida que lo cruzan las ondas gravitacionales. Pero el efecto es minúsculo. Por esta razón, básicamente, la gravedad es una fuerza tan débil. La fuerza gravitatoria entre objetos de la vida diaria es diminuta. Si movemos dos mancuernas emitiremos ondas gravitacionales, pero de potencia infinitesimal. Ni siquiera planetas que orbitan alrededor de estrellas o parejas de planetas que orbitan uno alrededor del otro emiten a un nivel detectable.

En febrero de 2016 se produjo un anuncio crucial: la detección de ondas gravitacionales por parte del Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO) que proporcionaba la defensa más reciente y sólida de la teoría de Einstein

Los astrónomos coinciden en que las fuentes que el LIGO pueda detectar deben tener una gravedad mucho mayor que la de los planetas y estrellas corrientes. Los candidatos más probables son los agujeros negros y las estrellas de neutrones. Si dos agujeros negros forman un sistema binario, poco a poco empezarán a girar juntos. A medida que se acercan, el espacio que los rodea se va distorsionando hasta que se fusionan en un único agujero rotatorio. Este agujero se bambolea y «silba», generando nuevas ondas hasta que se estabiliza, convertido en un único agujero negro estático. Este «chirrido», una sacudida del espacio que se acelera y cobra fuerza hasta el momento de la fusión, y a continuación muere, es lo que detecta el LIGO. Estos cataclismos ocurren menos de una vez en un millón de años en nuestra galaxia. Pero aunque se produzcan a una distancia de miles de millones de años luz, emitirían una señal detectable por el LIGO y hay millones de galaxias que están más cerca que eso.

Detectar los fenómenos más importantes requiere instrumentos asombrosamente sensibles y muy costosos. En los detectores LIGO, rayos láser de gran intensidad se proyectan a lo largo de brazos de cuatro kilómetros de longitud y se reflejan en espejos situados al final de ellos. Analizando los rayos de luz, es posible detectar cambios en la distancia entre los espejos, que aumenta y decrece a medida que el «espacio» se expande y se contrae. La magnitud de esta vibración es pequeñísima, de alrededor de 0,000000000001 centímetros, es decir, millones de veces menor que un átomo. El proyecto del LIGO prevé dos detectores similares separados entre sí unos tres mil kilómetros, uno en el estado de Washington, el otro en Luisiana. Un único detector podría registrar acontecimientos microsísmicos, tráfico de vehículos, etcétera, y con objeto de excluir estas falsas alarmas, los experimentadores tomarán nota solo de los acontecimientos que aparezcan en los dos detectores.



Esta detección es de suma importancia, uno de los grandes descubrimientos de la década. El escepticismo residual sobre la validez de las ecuaciones de Einstein se disipó cuando LIGO detectó acontecimientos atribuibles a la fusión de dos agujeros negros. Los «chirridos» detectados, complejos patrones de oscilaciones, encajan a la perfección en modelos computacionales basados en la teoría de Einstein.

Los agujeros detectados por LIGO suman hasta 30 masas solares, restos de estrellas de gran tamaño. Pero se esperan acontecimientos aún más enérgicos. Cuando se fusionen dos galaxias (tal y como harán Andrómeda y la Vía Láctea dentro de aproximadamente 4.000 millones de años), los agujeros negros en el centro de las mismas orbitarán juntos en espiral formando un sistema binario, que se encogerá liberando radiación gravitacional y emitirá un fuerte chirrido cuando los dos agujeros se fusionen. La mayoría de las galaxias han crecido mediante una sucesión de fusiones y adquisiciones. Las coalescencias fruto de estos agujeros negros supergigantes pueden liberar ondas gravitacionales de frecuencias mucho más bajas de las que pueden captar detectores terrestres como LIGO. Pero hay acontecimientos de primer orden a los que sí podrían ser sensibles detectores orbitando en el espacio. Y la ESA tiene un proyecto llamado LISA destinado a detectar estas poderosas «alteraciones» de baja frecuencia en el espacio-tiempo.

Más allá de las galaxias. Horizontes cósmicos

Sabemos que las galaxias —con forma de disco algunas, similares a nuestra Vía Láctea o a Andrómeda, otras «elipses» amorfas— son los componentes básicos de nuestro universo en expansión. Pero ¿hasta qué punto podemos en realidad comprender de esas galaxias? Los físicos que estudian las partículas pueden testarlas y hacerlas chocar en aceleradores del CERN. Los astrónomos no pueden hacer chocar galaxias. Y las galaxias cambian tan despacio que, en el transcurso de una vida humana, solo vemos una instantánea de cada una. Pero ya disponemos de opciones: podemos llevar a cabo experimentos en un «universo virtual» mediante simulaciones informáticas que incorporan gravedad y dinámica de gases.

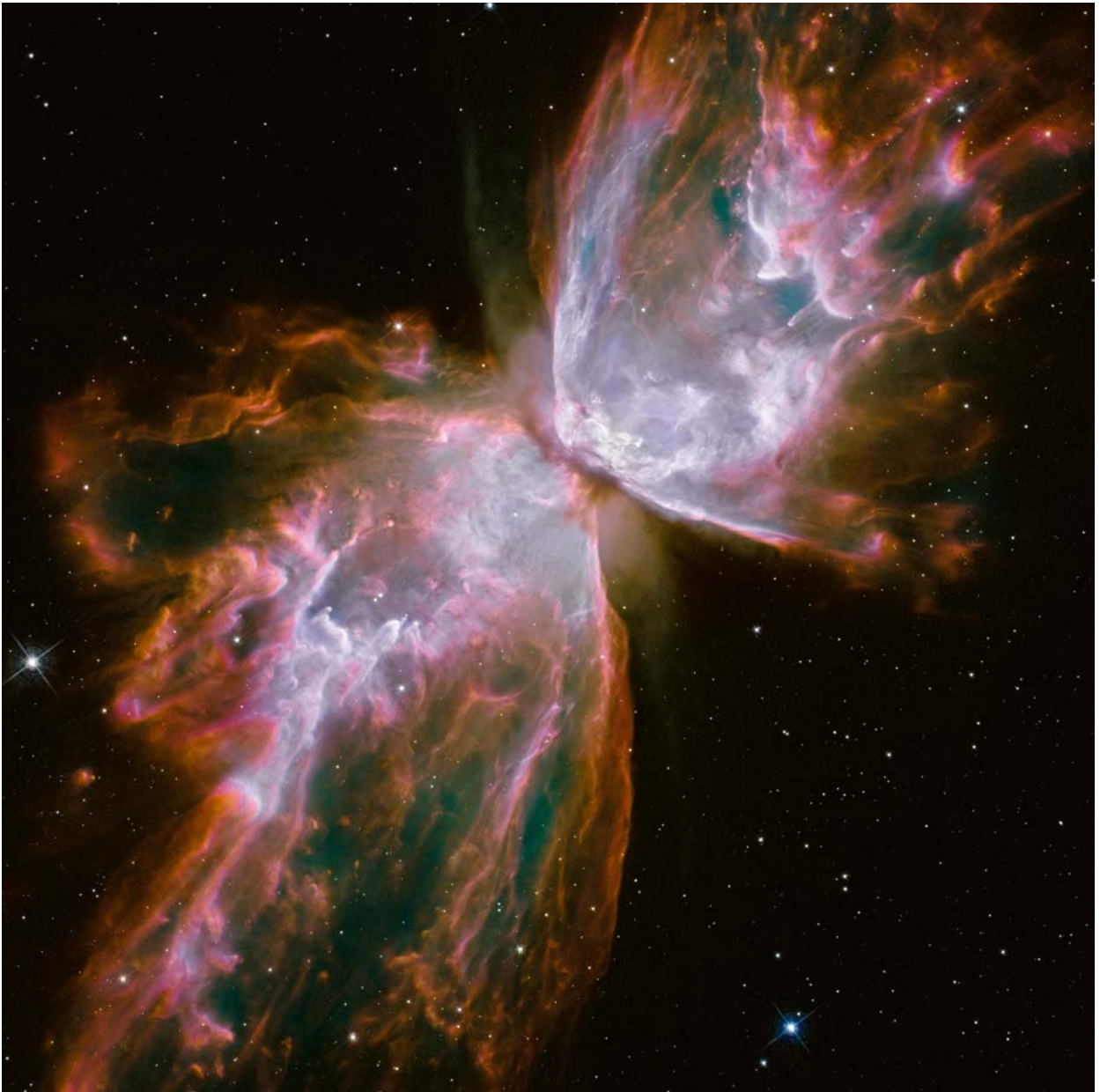
Podemos rehacer estas simulaciones partiendo de distintas hipótesis respecto a la masa de estrellas y gas de cada galaxia, etcétera, y ver cuáles casan mejor con los datos. Lo importante es que este y otros métodos nos permiten descubrir que todas las galaxias se mantienen unidas por la gravedad de no solo lo que vemos. Están insertas en un enjambre de partículas que son invisibles, pero que juntas aportan unas cinco veces la masa del átomo ordinario: se trata de la materia oscura.

Y podemos poner a prueba ideas sobre cómo evolucionan las galaxias observándolas cuando eran jóvenes. Se han empleado telescopios gigantes, en el espacio y en la Tierra, para estudiar «campos profundos», cada uno de los cuales abarca un sector diminuto de cielo. Un sector de un diámetro de solo unos pocos minutos de arco, ampliado por estos telescopios, revela cientos de leves manchas: son galaxias, algunas iguales a la nuestra, pero situadas tan lejos que su luz empezó a viajar hace más de 10.000 millones de años. Las estamos viendo recién formadas.

Pero ¿qué ocurrió antes de eso?, ¿antes incluso de que hubiera galaxias? La prueba clave aquí se remonta a 1965, cuando Penzias y Wilson descubrieron que el espacio intergaláctico no es completamente frío. Lo calientan hasta 3 °C unas débiles microondas, de las que ahora sabemos que tienen un espectro que coincide casi exactamente con un cuerpo negro. Se trata del «eco de la creación», el vestigio adiabáticamente enfriado y diluido de una era en que todo era caliente y denso. Es una de las varias líneas de evidencia científica que nos han permitido suscribir el modelo del «*big bang* caliente».



Este objeto celestial parece una delicada mariposa, pero nada más lejos. Lo que serían las alas de la mariposa son chorros de gas calentado a una temperatura que supera los 200.000 °C. El gas atraviesa el espacio a alrededor de un millón de km/h, lo bastante rápido para viajar de la Tierra a la Luna en 24 minutos. Esta imagen fue tomada por la Gran angular 3 (WFC3 en inglés), una nueva cámara instalada por la NASA en el telescopio espacial Hubble, en mayo de 2009





Pero abordemos una cuestión que puede parecer desconcertante. Nuestro complejo cosmos actual presenta un amplísimo abanico de temperaturas y densidades: desde las estrellas ardientes a la oscuridad del cielo nocturno. Hay personas a quienes les preocupa cómo pudo surgir esta intrincada complejidad de una bola de fuego amorfa. La hipótesis parece violar la segunda ley de la termodinámica, que describe una tendencia inexorable de patrones y estructuras a desintegrarse o dispersarse.

La respuesta a esta paradoja parece residir en la fuerza de la gravedad. La gravedad acentúa los contrastes de densidad antes que eliminarlos. Cualquier región surgida con una densidad ligeramente superior a la media podría desacelerarse más porque acusa más la gravedad; su expansión se retrasa más y más, hasta que llega un momento en que deja de expandirse y se separa. Se han hecho numerosas simulaciones de partes de un «universo virtual»: creando un modelo de un ámbito lo bastante grande para generar miles de galaxias. Los cálculos, cuando se exponen como si fueran una película, ilustran con claridad cómo estructuras incipientes aparecen y evolucionan. Dentro de cada cúmulo de escala galáctica, la gravedad acentúa aún más los contrastes, atrae gas que se comprime hasta formar estrellas.

Y hay algo muy importante. Las fluctuaciones iniciales que se introducen en los modelos informáticos no son arbitrarias, sino derivadas de las variaciones que se registran en el cielo de la temperatura de la radiación de fondo de microondas, recogida con hermosa precisión por el satélite artificial Planck del ESA. Este cálculo, que tiene en cuenta las dinámicas de la gravedad y del gas, revela, una vez se ha producido la expansión por 1.000 después de la última dispersión de fotones, un cosmos que encaja bastante desde el punto de vista estadístico con las estructuras visibles actuales y permite calcular la densidad promedio, la edad y la tasa de expansión del universo con un escaso porcentaje de error.

La coincidencia entre el espectro de fluctuación medido por el satélite espacial Planck (en escalas angulares de hasta pocos minutos de arco) y un modelo de seis parámetros —así como la constatación de que estas fluctuaciones evolucionan, por acción de las dinámicas de gravedad y gas, hasta convertirse en galaxias y cúmulos con propiedades que coinciden con nuestro cosmos habitual— supone un inmenso triunfo. Cuando se escriba la historia de la ciencia de estas décadas, este será uno de los grandes hitos, y me refiero a un hito de toda la ciencia: a la misma altura de la tectónica de placas, el genoma y muy pocas más.

El universo temprano: más hipótesis

¿Y qué hay del futuro lejano? Las criaturas que asistan a la muerte del Sol dentro de 6.000 millones de años no serán humanas; se parecerán a nosotros lo mismo que se parece un hombre a un insecto. La evolución poshumana, aquí en la Tierra y más allá, podría prolongarse tanto como la evolución darwinista que ha conducido hasta nosotros... y ser más asombrosa aún. Y por supuesto la evolución se produce ahora más deprisa, a una escala temporal tecnológica, opera a mayor rapidez que la selección natural y está impulsada por avances en genética y en inteligencia artificial (AI). No sabemos si el futuro a largo plazo residirá en vida orgánica o en vida basada en el silicio.

Pero ¿qué sucederá más adelante todavía? En 1998 los cosmólogos se llevaron una gran sorpresa. Por entonces se sabía bien que la gravedad de la materia oscura dominaba a la de la materia ordinaria, pero también que la materia oscura sumada a la materia ordinaria aportaba solo alrededor del 30% de la llamada densidad crítica. Se creía que esto suponía que vivíamos en un universo cuya expansión se estaba desacelerando, aunque no lo bastante para detenerse por completo. Pero, en lugar de desacelerarse, la relación entre corrimiento al



rojo y distancia para una categoría concreta de estrella en explosión —una supernova de tipo Ia— reveló precisamente que la expansión se estaba acelerando. La atracción gravitacional parecía superada por una fuerza nueva y misteriosa latente en el espacio vacío que aleja a unas galaxias de otras.

La expansión cósmica puede continuar incluso después de la muerte del Sol. Las predicciones a largo plazo rara vez son fiables, pero la hipótesis más segura y «conservadora» es que tenemos por delante casi una eternidad: un cosmos más frío y más vacío todavía. Las galaxias se separan y desaparecen detrás de un «horizonte de sucesos», más o menos al revés de lo que sucede cuando las cosas caen en un agujero negro. Todo lo que quedará serán los restos de nuestra galaxia, Andrómeda y sus vecinas de menor tamaño. Es posible que los protones se degraden, las partículas de materia oscura se destruyan y que haya algún que otro resplandor a medida que se evaporen los agujeros negros. A continuación, silencio.

Es muy posible que dentro de una década se conozca la naturaleza de la materia oscura, pero esta energía —latente en el espacio vacío mismo— plantea un misterio más profundo aún. No será entendida hasta que no tengamos un modelo de la microestructura del espacio. No tengo demasiadas esperanzas de que esto ocurra pronto: todos los teóricos sospechan que implicará fenómenos en la llamada «longitud de Planck», la escala a la que se superponen los efectos cuánticos y la gravedad. La escala es un billón de billones más pequeña que un átomo. La energía negra puede ser el interrogante más importante que presenta ahora mismo el universo.

Pero volvamos al pasado. La radiación de fondo es un mensaje directo de una era en que el universo solo tenía unos pocos cientos de años (desde entonces los fotones han viajado en gran medida sin interrupción, sin dispersarse). Pero tenemos sólidos conocimientos que nos permiten hacer extrapolaciones a épocas aún más remotas, a eras más calientes y densas. Sin duda podemos extrapolar hasta el primer segundo, porque las proporciones calculadas de helio y deuterio producidas (para una densidad nuclear que se ajuste a otros datos) casan a la perfección con lo observado. De hecho, probablemente podemos extrapolar hasta el primer nanosegundo: fue entonces cuando cada partícula tenía 50 gigaelectronvoltios, una energía que puede replicarse en el GCH o Gran Colisionador de Hadrones del CERN de Ginebra, y el universo entero tenía el tamaño de nuestro sistema solar.

Pero preguntas tales como ¿de dónde vinieron las fluctuaciones? O ¿por qué contenía el universo primordial la mezcla que observamos de protones, fotones y materia oscura? nos retrotraen a los aún más breves instantes en que nuestro universo estaba todavía más comprimido, en un contexto de energía ultraelevada en el que los experimentos no ofrecen una guía directa a la física pertinente.

Durante cerca de cuarenta años hemos tenido el llamado «paradigma inflacionario», que propone una era en que el radio de Hubble era mil millones de veces más pequeño que un núcleo atómico. Se trata de una extrapolación al pasado de lo más audaz, a una era en que la física era extrema y no puede ser testada mediante experimentos. Ya existen algunas pruebas que parecen apoyan este paradigma. Sea como sea, puede resultar útil resumir los requisitos esenciales que es necesario explicar si queremos comprender la aparición de nuestro cosmos complejo y estructurado a partir de unos orígenes amorfos:

1. El primer requisito es, por supuesto, la existencia de la fuerza de la gravedad que (tal y como ya se ha explicado), acentúa los contrastes de densidad a medida que el universo se expande, permitiendo que estructuras cohesionadas se condensen a partir de irregularidades de pequeña amplitud inicial. Se trata de una fuerza muy débil. A escala atómica, es

10^{40} veces más débil que la fuerza eléctrica entre el electrón y el protón. Pero en cualquier objeto de gran tamaño, las cargas positiva y negativa se anulan entre sí casi exactamente. En cambio, todo tiene el mismo «signo» de carga gravitatoria, de manera que cuando se unen los átomos suficientes, la gravedad gana. Pero las estrellas y los planetas son tan grandes porque la gravedad es débil. Si fuera más fuerte, aplastaría objetos del tamaño de los asteroides (o incluso de un terrón de azúcar). Así pues, aunque la gravedad es crucial, también es crucial que sea muy débil.

2. Tiene que haber un exceso de materia frente a antimateria.

3. Otro requerimiento para que haya estrellas, planetas y biosferas es que la química no sea trivial. Si el hidrógeno fuera el único elemento, la química sería aburrida. Una tabla periódica de elementos estables requiere un equilibrio entre las dos fuerzas más importantes del micromundo: la fuerza de cohesión nuclear (las «interacciones fuertes») y la fuerza de repulsión eléctrica responsable de separar los protones.

4. Tiene que haber estrellas: átomos ordinarios suficientes frente a materia oscura (de hecho, tiene que haber al menos dos generaciones de estrellas: una para generar los elementos químicos y la segunda para estar rodeada de planetas).

5. El universo debe expandirse al ritmo «adecuado», no implosionar demasiado pronto ni expandirse tan deprisa que impida a la gravedad dar cohesión a las estructuras.

6. Tiene que haber fluctuaciones que permitan actuar a la gravedad: de la suficiente amplitud que favorezcan la aparición de estructuras. De otro modo, el universo sería hidrógeno ultradifuso. No habría estrellas, no habría elementos pesados ni planetas ni personas. En nuestro universo actual, las fluctuaciones iniciales en la curvatura cósmica tienen una amplitud de 0,00001. Según los modelos inflacionarios, dicha amplitud la determinan fluctuaciones cuánticas. Su valor concreto depende de los detalles del modelo.



Otra pregunta fundamental es la siguiente: ¿Cómo de grande es la realidad física? Solo tenemos capacidad de observar un volumen finito. El ámbito que está en contacto causal con nosotros está limitado por un horizonte, una cáscara que nos rodea y que define la distancia a la que la luz (si no se dispersara) habría viajado desde el *big bang*. Pero esa cáscara no tiene mayor significado que el círculo que define nuestro horizonte cuando estamos en medio del mar. Cabría esperar que más allá del horizonte haya más galaxias. En el universo visible no se percibe una inclinación, lo que sugiere condiciones similares en un ámbito que se extiende miles de veces más allá. Pero eso es solo un mínimo. Si el espacio se extendiera lo suficiente, entonces se repetirían todas las posibilidades combinatorias. Mucho más allá del horizonte todos podríamos tener avatares, ¡y quizá nos consuele pensar que algunos han tomado la decisión correcta cuando nosotros nos hemos equivocado!

Pero incluso ese volumen inmenso puede no ser todo lo que existe. «Nuestro» *big bang* puede no ser el único. La física de la era inflacionaria sigue sin estar cimentada. Pero algunas de las opciones podrían conducir a una situación de «inflación eterna», en la que las consecuencias de «nuestro» *big bang* podrían ser una mera isla de espacio-tiempo en un archipiélago cósmico ilimitado.

En un postulado así, el desafío para la física del siglo XXI es dar respuesta a dos preguntas. La primera: ¿hay muchos *big bangs* o solo uno? Y la segunda, todavía más interesante: si



hay muchos ¿están todos gobernados por la misma física? ¿O hay una cantidad enorme de espacios vacíos distintos con microfísicas distintas?

Aunque la respuesta a la primera pregunta sea «sí», habrá leyes generales que gobiernen el universo, tal vez una versión de la teoría de cuerdas. Pero lo que hemos llamado siempre «leyes de la naturaleza» no serán más que ordenanzas municipales en nuestro tramo cósmico. Muchos ámbitos podrían haber nacido muertos o ser estériles: estar gobernados por leyes que no permitan ninguna clase de complejidad. De ser así, no esperaríamos encontrarnos en un universo típico. Más bien estaríamos en un miembro típico del subconjunto en el que podría evolucionar un observador. Entonces sería importante explorar el espacio paramétrico para todos los universos. Esto no será posible hasta que (y la espera puede ser muy larga) una teoría como la de cuerdas futura resulte creíble y que haya sido puesta a prueba proponga una manera de asignar una medida de probabilidad a cada parte del espacio paramétrico.

Hay quienes aseguran que las entidades no observables no forman parte de la ciencia. Pero muy pocos lo creen de verdad. Por ejemplo, sabemos que las galaxias desaparecen detrás del horizonte a medida que se alejan acelerándose. Pero (a no ser que ocupemos una posición central especial y el Universo tenga un «borde» justo a continuación del horizonte actual), habrá galaxias más allá. Y si la aceleración cósmica continúa, siempre estarán más allá. Ni el astrónomo más conservador negaría que estas galaxias nunca observables forman parte de nuestra realidad física. Estas galaxias son parte de las consecuencias de nuestro *big bang*. Pero ¿por qué deberíamos asignarles un estatus epistemológico mayor que a objetos no observables consecuencia de otros *big bangs*?

«Nuestro» *big bang* puede no ser el único. La física de la era inflacionaria sigue sin estar cimentada. Pero algunas de las opciones podrían conducir a una situación de «inflación eterna», en la que las consecuencias de «nuestro» *big bang* podrían ser una mera isla de espacio-tiempo en un archipiélago cósmico ilimitado

Por proponer una analogía: no podemos observar el interior de los agujeros negros, pero creemos lo que dice Einstein sobre lo que ocurre allí, porque su teoría ha ganado credibilidad al concordar con datos obtenidos de muchos contextos que sí podemos observar. De igual modo, si tuviéramos un modelo que describiera la física de las energías en que se propone que ha ocurrido la inflación y si ese modelo ha sido corroborado de otras maneras, entonces si predice múltiples *big bangs*, deberíamos tomar en serio esa predicción.

Si hay un único *big bang*, entonces aspiraríamos a determinar por qué los números que describen nuestro Universo tienen los valores que medimos (los números de «modelo estándar» de física de partículas además de los que caracterizan la geometría del universo). Pero si hay muchos *big bangs* —la inflación eterna, el paisaje, etcétera—, entonces la realidad física es muchísimo mayor de como la hemos siempre imaginado.

Es posible que dentro de cincuenta años sigamos igual de despistados que hoy respecto al universo ultraprimigenio. Pero es posible que una teoría física cercana a la «energía de Planck» haya para entonces ganado credibilidad. Quizá «prediga» un multiverso y determine en principio algunas de sus propiedades: las medidas de probabilidad de parámetros clave, las correlaciones entre ellas, etcétera.

Hay a quienes no les gusta el multiuniverso; es decir, creen que nunca tendremos explicaciones satisfactorias para los números fundamentales, que, en esta perspectiva más amplia,



pueden ser meros accidentes ambientales. Esto, por supuesto, decepciona a los teóricos más ambiciosos. Pero lo que nosotros prefiramos no afecta a la realidad física, de manera que debemos mantener una mentalidad abierta.

Sin duda, esto tiene una ventaja intelectual y estética. El multiverso supondría una cuarta y grandiosa revolución copernicana. Ya hemos tenido la revolución copernicana, luego hemos sabido que hay miles de millones de sistemas planetarios en nuestra galaxia y, a continuación, hemos constatado que hay miles de millones de galaxias en el universo observable.

Pero entonces nos daríamos cuenta de que no solo nuestro ámbito observable es una fracción minúscula de las consecuencias de nuestro *big bang*, sino que nuestro *big bang* es parte de un conjunto infinito e inimaginablemente diverso.

Esto es física especulativa, pero física, no metafísica. Hay esperanzas de poder darle credibilidad. El estudio más en profundidad de las fluctuaciones en la radiación de fondo dará pistas. Pero, sobre todo, si los físicos desarrollaran una teoría unificada de fuerzas fuertes y electromagnéticas y esa teoría se testara o corroborara en nuestro mundo de baja energía, entonces nos tomaríamos en serio sus predicciones sobre una fase inflacionaria y sobre las verdaderas respuestas a las dos preguntas formuladas más arriba.

He empezado este capítulo describiendo planetas recién descubiertos que orbitan alrededor de otras estrellas. Me gustaría retrotraerme a la ciencia planetaria de hace 400 años, anterior incluso a Newton. En aquel tiempo Kepler creía que el sistema solar era único, y que la órbita terrestre estaba relacionada con los otros planetas mediante hermosas fórmulas matemáticas en las que participaban los sólidos platónicos. Ahora sabemos que hay miles de millones de estrellas, cada una con su sistema planetario. La órbita de la Tierra es especial solo en la medida en que está en el rango de alcance de radios y excentricidades compatibles con la vida (por ejemplo, no está ni demasiado fría ni demasiado caliente, por lo que puede haber agua).

Quizá estemos abocados a un cambio conceptual análogo a una escala mucho mayor. Nuestro *big bang* puede no ser único, como no lo son los sistemas planetarios. Sus parámetros pueden ser «accidentes ambientales», como los detalles de la órbita terrestre. Aspirar a explicaciones precisas en cosmología puede ser una empresa tan inútil como la cruzada numerológica de Kepler.

La existencia de un multiverso llevaría más lejos aún el «destronamiento» de Copérnico: nuestro sistema solar es uno de los miles de millones de sistemas planetarios de nuestra galaxia, que es una de los miles de millones de galaxias accesibles mediante nuestros telescopios, pero todo este panorama puede no ser más que una fracción minúscula de las consecuencias de «nuestro» *big bang*, que en sí mismo puede ser uno de entre miles de millones. A algunos físicos les puede decepcionar que algunos de los números clave que intentan explicar resultan no ser más que contingencias ambientales, no más «fundamentales» que los parámetros de la órbita terrestre alrededor del Sol. Pero para compensar, nos daríamos cuenta que el espacio y el tiempo tienen una gran complejidad, pero a escalas tan vastas que los astrónomos son tan conscientes de ella como sería consciente de la topografía y la biosfera del mundo un plancton cuyo «universo» fuera una cucharada de agua.

Hemos hecho avances impresionantes. Hace cincuenta años los cosmólogos no sabían si había habido un *big bang*. Ahora podemos hacer deducciones bastante precisas remontándonos a un nanosegundo. Así que dentro de cincuenta años, debates que hoy parecen especulaciones poco consistentes tendrán cimientos más sólidos. Pero es importante subrayar que el progreso seguirá dependiendo, como lo ha hecho hasta ahora, en el 95% del perfeccionamiento de los instrumentos y la tecnología y en menos del 5% de la teoría contemplativa o de sillón, pero que esa teoría será aumentada por la inteligencia artificial y por la capacidad de hacer simulaciones.

Consideración final



Para terminar quiero apartarme del cosmos —incluso de lo que puede ser una amplia diversidad de cosmos gobernados por leyes distintas— y centrarme en el aquí y ahora. A menudo me preguntan si los astrónomos podemos ofrecer una perspectiva especial a la ciencia y a la filosofía. Vemos el planeta en que vivimos en un vasto contexto cósmico. Y en las décadas venideras sabremos si hay vida ahí fuera. Pero lo que es más importante aún, los astrónomos podemos ofrecer la conciencia de un futuro inmenso.

El darwinismo nos enseña que nuestra biosfera actual es el resultado de más de 4.000 millones de años de evolución. Pero la mayoría de las personas, aunque aceptan que nuestros orígenes son producto de la selección natural, siguen creyendo que, de alguna manera, los humanos somos por fuerza la culminación del árbol genealógico evolutivo. Es algo difícil de creer para un astrónomo, de hecho, lo más probable es que estemos más cerca del principio que del final de ese árbol. Nuestro Sol se formó hace 4.500 millones de años, pero aún faltan 6.000 para que se le acabe el combustible. Entonces arderá y engullirá los planetas interiores. Y el universo en expansión continuará —quizá para siempre— destinado a ser un lugar cada vez más frío, más vacío incluso.

Pero mi última reflexión es esta: incluso con esta cronología «tipo acordeón», que se extiende miles de millones de años hacia el futuro y también hacia el pasado, este siglo puede ser decisivo. Durante la mayor parte de la historia, las amenazas a la humanidad han procedido de la naturaleza: enfermedades, terremotos, inundaciones, etcétera. Pero este siglo es especial. Es el primero en el que una especie, la nuestra, tiene en sus manos el futuro de la Tierra y puede poner en peligro el inmenso potencial de vida. Hemos entrado en un periodo geológico llamado «antropoceno».

Nuestra Tierra, ese «punto azul pálido» del cosmos, es un lugar especial. Puede que sea también único. Y nosotros somos sus timoneles en un periodo especialmente crucial. Se trata de un mensaje importante para todos nosotros, nos interese o no la astronomía.

Notas

1. Sagan, Carl (1994): *Pale Blue Dot: A Vision of a Human Future in Space*, Nueva York: Random House. [Ed. esp. (2006): *Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio*, Barcelona, Planeta.]
2. Ver, por ejemplo, Misner, Charles W.; Thorne Kip S. y Wheeler, John Archibald (2017): *Gravitation*, (1ª ed. 1973), Nueva Jersey, Princeton University Press.
3. Chandrasekhar, Subrahmanyan (1998): *The Mathematical Theory of Black Holes*, (1ª ed. 1983), Oxford, Oxford University Press.
4. *The New York Times*, 10 de noviembre de 1919.



José Manuel Sánchez Ron
Universidad Autónoma de Madrid

José Manuel Sánchez Ron es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (1971) y Doctor (Ph. D.) en Física por la Universidad de Londres (1978). Catedrático de Historia de la Ciencia en la Universidad Autónoma de Madrid, donde antes fue profesor titular de Física Teórica. Desde 2003 es miembro de la Real Academia Española, y desde 2006 de la Académie Internationale d'Histoire des Sciences de París. Autor de más de 400 publicaciones, de las que 45 son libros, entre ellos *El mundo después de la revolución. La física de la segunda mitad del siglo xx*, por el que recibió el Premio Nacional de Literatura, en su modalidad de Ensayo. En 2011 recibió el Premio Internacional de Ensayo Jovellanos por *La Nueva Ilustración. Ciencia, tecnología y humanidades en un mundo interdisciplinar* (Oviedo, 2011), y en 2016 el Premio Julián Marías a la carrera científica en Humanidades de la Comunidad de Madrid.

Libro recomendado: Sánchez Ron, José Manuel (2014): *El mundo después de la revolución. La física de la segunda mitad del siglo xx*, Barcelona, Pasado & Presente.

Aunque no se han producido últimamente en la física revoluciones como las que tuvieron lugar durante el primer cuarto del siglo xx, las semillas plantadas entonces han continuado germinando y necesitando de nuevos desarrollos. De algunos de estos desarrollos se ocupa este artículo; a la cabeza de ellos, los descubrimientos del bosón de Higgs y de la radiación gravitacional. Al ahondar en ellos se hace patente la necesidad de tratar también otros apartados, en los que la física muestra su unidad con la astrofísica y la cosmología: materia oscura, agujeros negros y multiuniversos. Se repasa, asimismo, la situación en la teoría de cuerdas y en la supersimetría, así como en el entrelazamiento cuántico, con las aplicaciones de este a las comunicaciones seguras (criptografía cuántica), para terminar con la presencia e importancia de la física en un mundo científicamente interdisciplinar.



La física es considerada como la reina de las ciencias del siglo xx, y lo es con justicia pues durante esa centuria se produjeron dos revoluciones que modificaron drásticamente sus fundamentos e introdujeron cambios socioeconómicos profundos: las de las teorías especial y general de la relatividad (Albert Einstein 1905, 1915) y de la física cuántica, a la que, al contrario que en el caso de la relatividad, no es posible asignar un único progenitor, al ser el esfuerzo mancomunado de un extenso conjunto de científicos. Ahora bien, sabemos que las revoluciones —ya sean en ciencia, en política o en costumbres— poseen efectos de largo alcance, que aunque seguramente no serán tan radicales como los que propiciaron las rupturas iniciales, conducen más tarde a desarrollos, a descubrimientos o maneras de entender la realidad, antes insospechadas. Así sucedió con la física una vez que se completasen las nuevas teorías básicas, que en el caso de la física cuántica quiere decir la mecánica cuántica (Werner Heisenberg, 1925; Paul Dirac, 1925 y Erwin Schrödinger, 1926). En el mundo einsteiniano surgió enseguida la cosmología relativista, que pudo acoger bien en su seno, como uno de los modelos de universo posibles, el descubrimiento experimental de la expansión del Universo (Edwin Hubble, 1929). Fue, sin embargo, en el contexto de la física cuántica donde las «consecuencias-aplicaciones» resultaron más prolíficas; fueron, de hecho, tantas que se puede decir, sin exagerar, que cambiaron el mundo. Los ejemplos en este sentido son demasiados para enumerarlos aquí; baste, sin embargo, mencionar algunos: la construcción de una electrodinámica cuántica (c. 1949), la invención del transistor (1947) —al que bien se puede denominar «el átomo de la globalización y de la sociedad digital»—, el desarrollo de la física de partículas elementales (posteriormente denominada «de altas energías»), de la astrofísica, de la física nuclear y del estado sólido (o «de la materia condensada»).

La segunda mitad del siglo xx asistió a la consolidación de estas ramas de la física, pero podemos preguntarnos si, finalmente, dejaron de aparecer novedades importantes y todo se redujo a meros desarrollos, lo que Thomas Kuhn calificó en su libro de 1962 *The Structure of Scientific Revolutions*, como «ciencia normal». El concepto de «ciencia normal», me apresuro a señalar, es complejo y puede conducir a error: el desarrollo de los fundamentos —del «núcleo duro», si utilizamos la terminología introducida por Kuhn— de un paradigma científico, esto es, la «ciencia normal», puede abrir nuevas puertas al conocimiento de la naturaleza, algo que sin duda posee una importancia de primer orden. En el presente artículo, en el que trato de la década 2008-2018, veremos que así sucedió en algún caso, y en fechas —la segunda década del siglo XXI— ya bastante alejadas de los «años revolucionarios» de comienzos del siglo xx.

El descubrimiento del bosón de Higgs

Uno de los acontecimientos más celebrados en la física de la última década ha sido la confirmación de una predicción teórica hecha hacía casi medio siglo: la existencia del bosón de Higgs. Veamos de donde procedía esa predicción.

La física de altas energías experimentó un avance extraordinario con la introducción de unas partículas para las que se terminó aceptando el nombre propuesto por uno de sus introductores, Murray Gell-Mann: *quarks*, cuya existencia fue propuesta teóricamente en 1964, además de por Gell-Mann, por George Zweig. Hasta su aparición se pensaba que protones y neutrones eran estructuras atómicas inquebrantables, realmente básicas, y que la carga eléctrica asociada a protones y electrones era una unidad indivisible. Los quarks no obedecían a esta regla, ya que se les asignó cargas fraccionarias. De acuerdo a Gell-Mann y Zweig, los hadrones, las partículas sujetas a la interacción fuerte, están formados por dos o tres especies de quarks y antiquarks, denominados *u* (*up*; arriba), *d* (*down*; abajo) y *s* (*strange*; extraño),



con, respectivamente, cargas eléctricas $2/3$, $-1/3$ y $-1/3$ la del electrón (de hecho, los hadrones pueden ser de dos tipos: bariones —protones, neutrones e hiperones— y mesones, partículas cuyas masas tienen valores entre la del electrón y la del protón). Así, un protón está formado por dos quarks u y uno d , mientras que un neutrón está formado por dos quarks d y por otro u ; son, por consiguiente, estructuras compuestas. Posteriormente, otros físicos propusieron la existencia de tres quarks más: *charm* (c ; 1974), *bottom* (b ; 1977) y *top* (t ; 1995). Para caracterizar esta variedad, se dice que los quarks tienen seis tipos de «sabores» (*flavours*); además, cada uno de estos seis tipos puede ser de tres clases, o *colores*: rojo, amarillo (o verde) y azul. Y para cada quark existe, claro, un antiquark. (Por supuesto, nombres como los anteriores —color, sabor, arriba, abajo...— no representan la realidad que asociamos normalmente a tales conceptos, aunque puede en algún caso existir una cierta lógica en ellos, como sucede con el *color*.)

En definitiva, los quarks tienen *color* pero los hadrones no: son *blancos*. La idea es que solo las partículas «blancas» son observables directamente en la naturaleza, mientras que los quarks no; ellos están «confinados», asociados formando hadrones. Nunca podremos observar un quark libre. Ahora bien, para que los quarks permanezcan confinados deben existir fuerzas entre ellos muy diferentes de las electromagnéticas o de las restantes. En palabras de Gell-Mann (1995, p. 200): «Así como la fuerza electromagnética entre electrones está mediada por el intercambio virtual de fotones, los quarks están ligados entre sí por una fuerza que surge del intercambio de otros cuantos: los gluones [del inglés *glue*, pegar], llamados así porque hacen que los quarks se peguen formando objetos observables blancos como el protón y el neutrón».

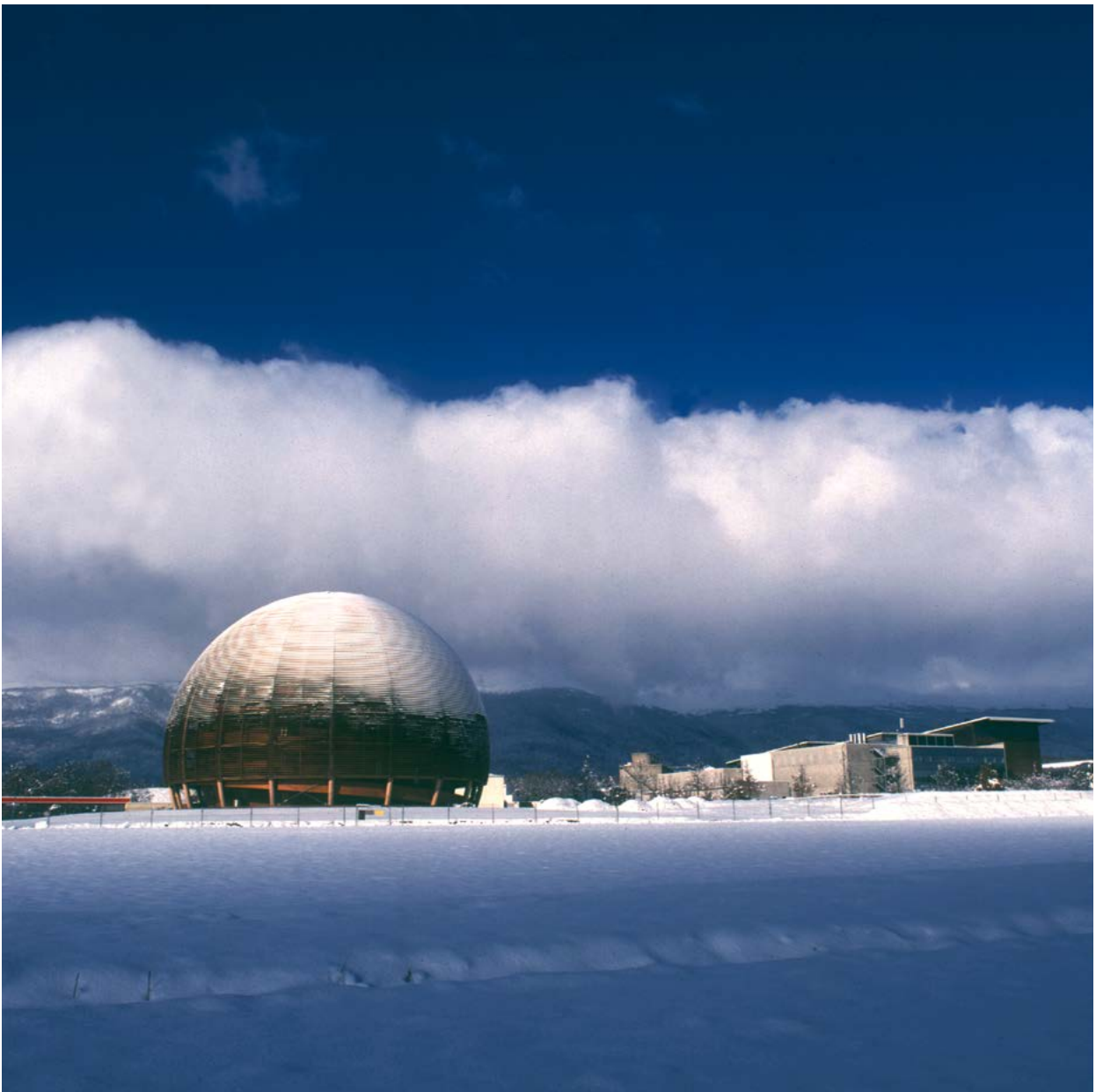
Aproximadamente una década después de la introducción de los quarks, se desarrolló una teoría, la cromodinámica cuántica, que explica por qué los quarks están confinados tan fuertemente que nunca pueden escapar de la estructuras hadrónicas que forman. El nombre *cromodinámica* —procedente del término griego *chromos* (color)— aludía al *color* de los quarks, y el adjetivo «cuántica» a que es compatible con los requisitos cuánticos. Al ser la cromodinámica cuántica una teoría de las partículas elementales con color, y al estar este asociado a los quarks, que a su vez tratan de los hadrones, las partículas sujetas a la interacción fuerte, tenemos que la cromodinámica cuántica describe esta interacción.

Con la electrodinámica cuántica y la cromodinámica cuántica, se disponía de teorías cuánticas para las interacciones electromagnética y fuerte. Además, se disponía de una teoría de la interacción débil (la responsable de procesos radiactivos como la radiación beta, la emisión de electrones en procesos nucleares), pero esta tenía problemas. Una versión más satisfactoria para una teoría cuántica de la interacción débil llegó cuando en 1967 el estadounidense Steven Weinberg y el año siguiente el paquistaní (afincado en Inglaterra) Abdus Salam propusieron independientemente una teoría que unificaba las interacciones electromagnética y débil. Su modelo incorporaba ideas propuestas en 1960 por Sheldon Glashow. Por estos trabajos, Weinberg, Salam y Glashow compartieron el Premio Nobel de Física de 1979; esto es, después de que, en 1973, una de las predicciones de su teoría —la existencia de las denominadas «corrientes neutras débiles»— fuese corroborada experimentalmente en el CERN, el gran laboratorio europeo de altas energías.

La teoría electrodébil unificaba la descripción de las interacciones electromagnética y débil, pero ¿no sería posible avanzar por la senda de la unificación, encontrando una formulación que incluyese también a la interacción fuerte, descrita por la cromodinámica cuántica? La respuesta, positiva, a esta cuestión vino de la mano de Howard Georgi y Glashow, que introdujeron en 1974 las primeras ideas de lo que se vino en denominar Teorías de Gran Unificación (GUT).



Centro de exposiciones del CERN, en Suiza, en un día nevado. El edificio, construido en madera, lo donó al CERN la Confederación Suiza en 2004 para celebrar los 50 años de su fundación





Gracias al conjunto formado por las anteriores teorías, se dispuso de un gran marco teórico para entender de qué está formada la naturaleza. Un marco teórico con una extraordinaria capacidad predictiva. De acuerdo con él, se acepta por una parte que las partículas elementales pertenecen a uno de los dos siguientes grupos: bosones o fermiones, según su espín sea entero o fraccionario (el fotón es un bosón y el electrón un fermión), que obedecen a dos estadísticas (maneras de «contar» agrupaciones de partículas de la misma especie) diferentes: la *estadística de Bose-Einstein* y la *estadística de Fermi-Dirac*. Por otra parte, se tiene que toda la materia del Universo está formada por agregados de tres tipos de partículas elementales: electrones y sus parientes (las partículas denominadas muón y tau), neutrinos (neutrino electrónico, muónico y tauónico) y quarks, además de por los cuantos asociados a los campos de las cuatro fuerzas que reconocemos en la naturaleza (recordemos la dualidad onda-corpúsculo, que significa que en la física cuántica una partícula se puede comportar como un campo y viceversa): el fotón para la interacción electromagnética, las partículas Z y W (bosones gauge) para la débil, los gluones para la fuerte y, aunque la gravitación aún no se ha incorporado a ese marco, los, supuestos, gravitones para la gravitacional. El subconjunto formado por la cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil (esto es, el sistema teórico que incorpora las teorías relativistas y cuánticas de las interacciones fuerte, electromagnética y débil) es especialmente poderoso si tenemos en cuenta el balance predicciones-comprobaciones experimentales. Es denominado «Modelo estándar». Ahora bien, un problema con este modelo era que para explicar el origen de la masa de las partículas elementales que aparecen en él era preciso que existiese una nueva partícula, un bosón, cuyo campo asociado impregnaría todo el espacio, «frenando», por decirlo de alguna manera, a las partículas que tienen masa, mostrando estas, mediante su interacción con el campo de Higgs, dicha masa (explica, en particular, la gran masa que poseen los bosones gauge W y Z, y también la masa nula de los fotones, ya que no interactúan con el bosón de Higgs). La existencia de semejante bosón fue prevista teóricamente en tres artículos publicados en 1964, en el mismo volumen de la revista *Physical Review Letters*: el primero estaba firmado por Peter Higgs, el segundo por François Englert y Robert Brout y el tercero por Gerald Guralnik, Carl Hagen y Thomas Kibble. A la partícula en cuestión se le adjudicó el nombre de «bosón de Higgs».

Uno de los acontecimientos más celebrados en la física de la última década ha sido la confirmación de una predicción teórica hecha hacía casi medio siglo: la existencia del bosón de Higgs

Para que esa supuesta partícula se pudiera detectar hacía falta un acelerador de partículas que alcanzase energías lo suficientemente elevadas para producirla. No se dispuso de semejante máquina hasta muchos años después de que se propusiera su existencia. Fue en 1994 cuando el CERN aprobó la construcción de ese acelerador, el Large Hadron Collider (LHC; Gran Colisionador de Hadrones). El que debía ser el mayor acelerador de partículas del mundo sería un anillo de 27 kilómetros, rodeado de 9.600 imanes de diverso tipo, 1.200 de ellos dipolos superconductores que funcionan a 271,3 grados Celsius bajo cero, una temperatura más baja que la del espacio exterior (se consigue con la ayuda de helio líquido). En el interior de ese anillo, guiados por el campo magnético producido por «la escolta» de electroimanes, se acelerarían, en sentidos opuestos, dos haces de protones a velocidades próximas a la de la luz.



Cada uno de los dos haces circularían en tubos diferentes, mantenidos en un vacío extremo, hasta que alcanzasen la energía prevista, momento en el que se harían colisionar. La teoría decía que en algunas de esas colisiones se producirían bosones de Higgs. Un grave problema era que este bosón se desintegra prácticamente de manera inmediata en otras partículas; era preciso, por consiguiente, disponer de detectores especialmente sensibles. Los que se diseñaron y construyeron para el LHC, denominados ATLAS, CMS, ALICE y LHCb, constituyen gigantescos monumentos a la tecnología más avanzada.

Finalizada la construcción, el primer haz de protones, de prueba, se hizo circular por el LHC el 10 de septiembre de 2008. El 30 de marzo de 2010 se producían las primeras colisiones entre protones, a una energía total de $7 \cdot 10^{12}$ eV (esto es, 7 tera-electronvoltios; TeV), energía nunca antes alcanzada por un acelerador de partículas. Fue, finalmente, el 4 de julio de 2012 cuando el CERN anunció públicamente que se había detectado una partícula con una masa de, aproximadamente, $125 \cdot 10^9$ eV (o 125 giga-electronvoltios; GeV), cuyas propiedades indicaban, con gran probabilidad, que se trataba del bosón de Higgs (el Modelo estándar no predice su masa). La noticia fue portada de prácticamente todos los periódicos y noticiarios del mundo. Casi medio siglo después de haberse predicho teóricamente, se confirmaba su existencia. No resulta sorprendente que el Premio Nobel de Física de 2013 fuese otorgado a Peter Higgs y François Englert, por, según la comunicación oficial de la Fundación Nobel, «el descubrimiento teórico de un mecanismo que contribuye a comprender el origen de la masa de partículas subatómicas y que ha sido confirmada recientemente mediante el descubrimiento de la partícula fundamental predicha, por los experimentos ATLAS y CMS en el Large Hadron Collider del CERN».

Evidentemente, semejante confirmación constituía un motivo de satisfacción, pero no faltaron quienes, con un buen argumento, manifestaran que habrían preferido un resultado negativo, que no se encontrase el bosón de Higgs donde la teoría preveía que debía estar (esto es, con la masa predicha). El físico teórico y divulgador estadounidense Jeremy Bernstein (2012a, b, p. 33) expresó ese sentimiento muy poco antes del anuncio del descubrimiento: «Si el LHC confirma la existencia del bosón de Higgs, marcará el punto final de un largo capítulo de la física teórica. La historia me recuerda a la de un compañero francés. Cierta parámetro había sido bautizado con su nombre, por lo que aparecía con bastante frecuencia en las discusiones sobre las interacciones débiles. Al final, el parámetro fue medido y el modelo confirmado en los experimentos. Sin embargo, cuando fui a felicitarle, lo hallé entristecido porque ya no se hablaría más de su parámetro. Si el bosón de Higgs no apareciese, la situación se tornaría muy interesante puesto que nos veríamos ante la imperiosa necesidad de inventar nueva física».

Sin embargo, el hecho —y el triunfo— es que el bosón de Higgs existe y se identificó. Pero la ciencia siempre está en movimiento y en febrero de 2013 el LHC detuvo sus operaciones para que se realizasen los ajustes necesarios destinados a alcanzar los 13 TeV. El 12 de abril de 2018 comenzó esa nueva etapa con las correspondientes pruebas de colisiones de protones. Se trata de buscar datos inesperados, que revelen la existencia de nuevas leyes de la física. Pero por el momento lo que se puede decir es que el Modelo estándar funciona muy bien, que es uno de los grandes logros de toda la historia de la física, un logro que, mucho más que la mecánica y electrodinámica cuánticas —no digamos ya que la relatividad, especial y general—, ha sido producto de un esfuerzo colectivo.

Ahora bien, no obstante su éxito el Modelo estándar no es, no puede ser, «la Teoría final». Por una parte, porque la interacción gravitacional queda al margen, pero también porque incluye demasiados parámetros que hay que determinar experimentalmente. Se trata de las, siempre incómodas pero fundamentales, preguntas del tipo «¿por qué?». ¿Por qué existen



las partículas fundamentales que detectamos? ¿Por qué son cuatro las interacciones fundamentales, y no tres, cinco o solo una? ¿Y por qué tienen estas interacciones las propiedades (como intensidad o rango de acción) que poseen? En el número de agosto de 2011 de *Physics Today*, la revista de la American Physical Society, Steven Weinberg (2011, p. 33) reflexionaba sobre algunos de estos puntos, y de otros, en los siguientes términos:

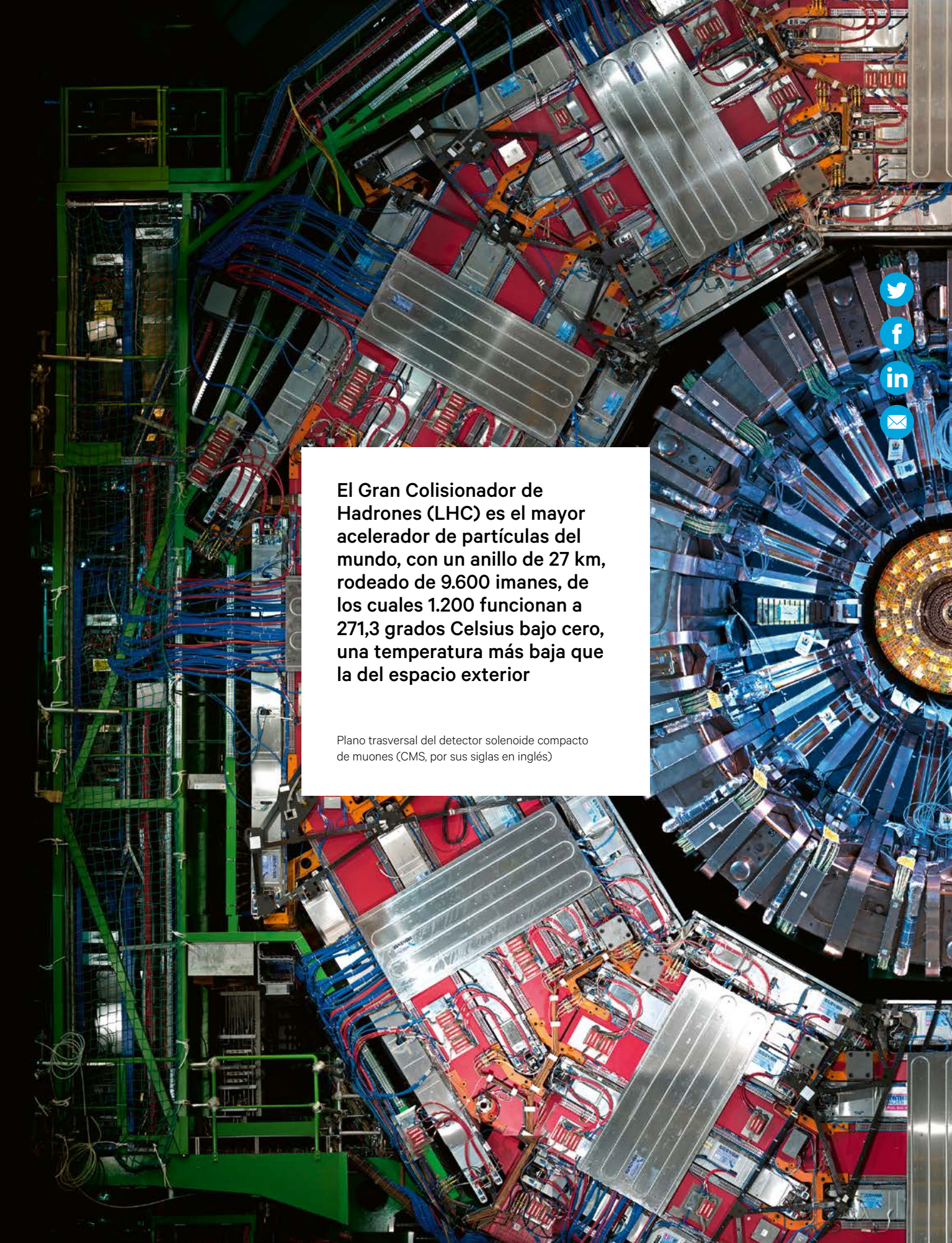
Por supuesto, mucho antes del descubrimiento de que los neutrinos tienen masa, sabíamos que hay algo más allá del Modelo estándar que sugiere una nueva física para masas un poco por encima de 10^{16} GeV: la existencia de la gravitación. Y también está el hecho de que el parámetro de acoplamiento de [la interacción] fuerte y los dos de [la interacción] débil del Modelo estándar, que dependen solamente logarítmicamente de la energía, parecen converger hacia un valor común a una energía del orden de entre 10^{15} y 10^{16} GeV.

Hay muchas buenas ideas sobre cómo ir más allá del Modelo estándar, incluyendo la supersimetría y lo que se llamó teoría de cuerdas, pero todavía no existe ningún dato experimental que las confirme. Incluso si los gobiernos son generosos con la física de partículas en un grado fuera de los sueños más atrevidos, puede que nunca seamos capaces de construir aceleradores que alcancen energías de entre 10^{15} y 10^{16} GeV. Algún día puede que seamos capaces de detectar ondas gravitacionales de alta frecuencia emitidas durante la época de inflación en el universo muy temprano, que nos ofrezcan datos de procesos físicos a muy alta energía. Entre tanto, lo que podemos esperar es que el LHC y sus sucesores nos proporcionen las claves que tan desesperadamente necesitamos para superar los éxitos de los últimos cien años.

Y a continuación, Weinberg se preguntaba: «¿Cuál es la razón de todo esto? ¿Realmente necesitamos saber por qué existen tres generaciones de quarks y leptones, o si la naturaleza respeta la supersimetría, o lo que es la materia oscura? Sí, pienso que sí, porque responder a este tipo de preguntas es el siguiente paso en un programa para conocer cómo todas las regularidades de la naturaleza (todo lo que no es un accidente histórico) se siguen de unas pocas, simples, leyes».

Vemos en esta cita de Weinberg que la energía a la que esa «nueva física» se debería manifestar con claridad, 10^{15} - 10^{16} GeV, se halla muy lejos de los 13 TeV, esto es, $13 \cdot 10^3$ GeV que debe alcanzar el LHC renovado. Tan lejos está que se entiende perfectamente el comentario de Weinberg de que «puede que nunca seamos capaces de construir aceleradores que alcancen esas energías». Pero Weinberg también señalaba que acaso en la investigación del Universo se pudiesen encontrar formas de acceder a esos niveles de energía. Él mismo lo sabía muy bien, ya que en la década de 1970 fue uno de los que más impulsaron la unión de la física de partículas elementales con la cosmología. Recordemos en este sentido su libro, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (1977), en el que se esforzaba por divulgar la ayuda mutua que podrían obtener —que de hecho obtuvieron— cosmología y física de altas energías al estudiar los primeros instantes después del *big bang*. Para la física de altas energías aquel «matrimonio de conveniencias» significó un aire nuevo.

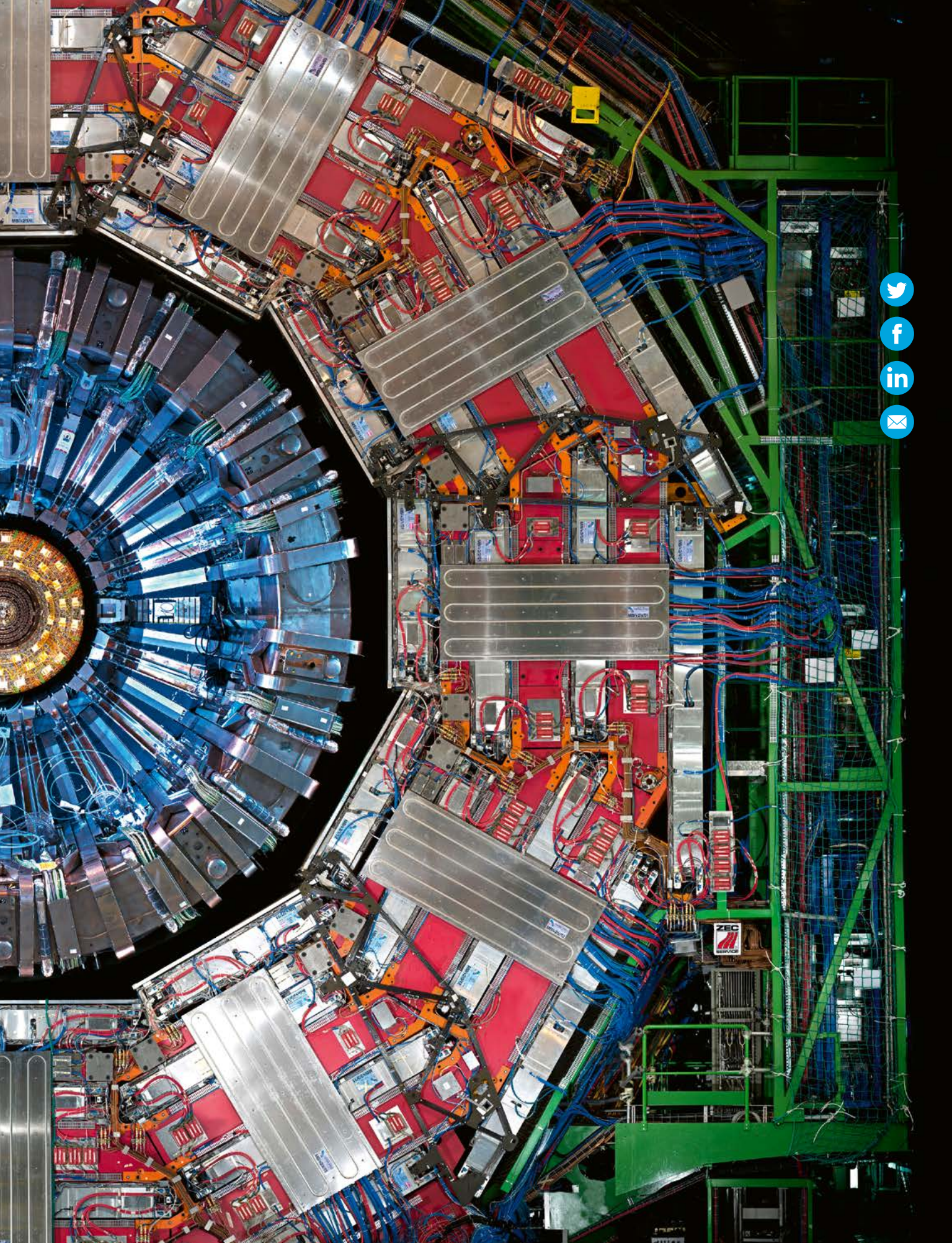
No era, sin embargo, el estilo, las técnicas, que caracterizaron el empleo de la física de partículas elementales en las décadas de 1970-1990 a las que se refería Weinberg, sino a una muy diferente: las ondas gravitacionales, o radiación gravitacional. Ahora bien, independientemente de otras diferencias, el nicho teórico de la radiación gravitacional no se encuentra en la física cuántica, sino en la teoría que describe la única interacción que hasta ahora no ha podido ser amoldada a los requisitos cuánticos, la teoría de la relatividad general, en la que el mundo de la física básica se confunde con los de la cosmología y astrofísica. Y en ese mundo plural también se produjo un avance fundamental en la última década.



El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) es el mayor acelerador de partículas del mundo, con un anillo de 27 km, rodeado de 9.600 imanes, de los cuales 1.200 funcionan a 271,3 grados Celsius bajo cero, una temperatura más baja que la del espacio exterior

Plano trasversal del detector solenoide compacto de muones (CMS, por sus siglas en inglés)







Tras años de intensos esfuerzos mentales —cuyo punto de partida fue 1907, cuando identificó como pieza clave para construir una teoría relativista de la gravitación el denominado «principio de equivalencia»—, años en los que no infrecuentemente tomó caminos erróneos, en noviembre de 1915 Albert Einstein completó la estructura de la que muchos consideran la construcción teórica más hermosa de la física: la teoría de la relatividad general. Se trata de una teoría «clásica», esto es, que, como ya apunté, no incluye los principios de la física cuántica, principios de los que, existe consenso en esto, deben participar todas las teorías de la física. Aun así, la formulación relativista de la gravitación einsteiniana ha ido superando todas las pruebas experimentales que se ha encontrado hasta la fecha. Una de sus predicciones que más tiempo tardó en confirmarse fue la de que la aceleración de masas da origen a la emisión de ondas; esto es, la existencia de radiación gravitacional. Se suele citar 1916 como la fecha de nacimiento de la predicción de la existencia de estas ondas, año en el que Einstein publicó un artículo en el que concluía que efectivamente existían. Sin embargo, aquel trabajo tenía las suficientes limitaciones como para que Einstein volviese al asunto años después. En 1936 preparó con un colaborador, Nathan Rosen, un manuscrito que titularon «¿Existen ondas gravitacionales?», en el que ahora llegaban a la conclusión de que no existían. No obstante, aquel trabajo contenía errores, y en la versión final publicada (Einstein y Rosen, 1937) ya no se rechazaba la posibilidad de ondas gravitacionales.

El problema de si realmente existían las ondas gravitacionales, esto es, de detectarlas, se mantuvo durante décadas. Nadie intentó con más empeño y durante tanto tiempo —a partir de 1960— detectarlas como Joseph Weber, de la Universidad de Maryland. De hecho, llegó a creer que había conseguido detectarlas, aunque no era cierto. Su montaje experimental consistía en un cilindro de aluminio de un metro de diámetro y 3,5 toneladas de peso, al que acoplaba aparatos de cuarzo piezoeléctrico para detectar las posibles distorsiones que se produjesen en el cilindro cuando lo atravesase una onda gravitacional. Cuando se compara aquel instrumental con el que finalmente se utilizó para su detección, no podemos sino maravillarnos del entusiasmo e ingenuidad de Weber, quien falleció en 2000 sin conocer que la empresa que había guiado su vida profesional era correcta. Así es la ciencia, una tarea en la que, salvo excepciones, los problemas no suelen ser resueltos mediante el trabajo de un solo científico y en la que no faltan los errores. Una tarea, además, larga.

El 11 de febrero de 2016 un representante de LIGO anunció que habían detectado ondas gravitacionales y que estas correspondían al choque de dos agujeros negros, lo que de paso significaba una nueva confirmación de la existencia de estas singulares entidades cósmicas

Ha sido durante la última década cuando finalmente se detectó la radiación gravitacional, que implica detectar distorsiones del tamaño de una pequeña fracción de un átomo. La detección (Abbott *et al.*, 2016) se produjo gracias a un sistema estadounidense denominado LIGO (por sus siglas inglesas, *Laser Interferometric Gravitational wave Observatories* [Observatorio de Interferometría Láser de ondas de Gravedad]), compuesto de dos observatorios separados por 3.000 kilómetros (esta duplicidad permite identificar señales falsas, producidas por efectos



locales), uno en Livingston (Louisiana) y el otro en Hanford (Washington). La idea es utilizar sistemas interferométricos de dos brazos perpendiculares y en condiciones de vacío con un recorrido óptico de 2 o 4 kilómetros, para detectar las ondas gravitacionales a través de los minúsculos movimientos que estas deben producir en los espejos al pasar por allí. El 11 de febrero de 2016, un representante de LIGO anunció que habían detectado ondas gravitacionales y que estas correspondían al choque de dos agujeros negros, lo que de paso significaba una nueva confirmación de la existencia de estas singulares entidades cósmicas. Aunque no participó en esa primera detección (no tenía entonces la sensibilidad necesaria; estaba siendo mejorada), existe otro gran observatorio interferométrico dedicado a la detección de radiación gravitacional: Virgo. Originado en una colaboración europea entre seis países (Italia y Francia, los principales, más Holanda, Hungría, Polonia y España) y ubicado cerca de Pisa, Virgo tiene acuerdos con LIGO; de hecho, en el artículo «fundacional», después del encabezamiento de autores, B. P. Abbot *et al.*, aparece «LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration». Pronto Virgo se unió a las investigaciones; lo hizo a partir de la segunda ronda de observaciones el 1 de agosto de 2017.

La detección de la radiación gravitacional ha significado que se ha abierto una nueva ventana al estudio del Universo, una ventana que se irá ensanchando según vaya mejorando la tecnología y se establezcan más observatorios del tipo de LIGO y Virgo. Se trata de una situación comparable a la que tuvo lugar en la década de 1930, cuando, a partir de los experimentos pioneros de Karl Jansky, la radioastronomía (la astronomía basada en ondas radio, con longitud de onda en el rango de unos cuantos centímetros a unos metros) amplió radicalmente nuestro conocimiento del cosmos, hasta entonces dependiente únicamente del estrecho margen de longitudes de onda del espectro electromagnético que reconoce el ojo humano. De hecho, no se ha tardado demasiado en avanzar en tal senda: el 16 de octubre de 2017 LIGO y Virgo (Abbott *et al.*, 2017) anunciaron que el 17 de agosto de ese año habían detectado la radiación gravitacional procedente del choque de dos estrellas de neutrones de entre 1,17 y 1,60 masas la del Sol (recordemos que una estrella de neutrones es una estrella extremadamente densa y muy pequeña —de un radio del orden de los diez kilómetros—, asimilable a una especie de núcleo gigante formado únicamente por neutrones unidos por la fuerza de la gravedad). Particularmente interesante es que 1,7 segundos después de que se recibiese la señal, el telescopio espacial «Fermi» de la NASA detectó —otros observatorios lo hicieron más tarde— rayos gamma procedentes de la misma región del espacio en la que se había producido ese choque cósmico. Analizando esa radiación, se ha observado que en la colisión de las dos estrellas se produjeron elementos químicos como oro, plata, platino o uranio, cuyos «lugares de nacimiento» se desconocían hasta el momento. La detección de las ondas gravitacionales muestra también una de las características de la denominada *Big Science*: el artículo, «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», en el que se anunció su descubrimiento, publicado en *Physical Review Letters* (B. P. Abbott *et al.*, 2016) coincidiendo con el anuncio del día 11, está firmado por 1.036 autores, procedentes de 133 instituciones (de sus 16 páginas, seis están dedicadas a la lista de esos autores e instituciones).

En 2017 se reconocía la importancia del hallazgo de LIGO adjudicando el Premio Nobel de Física a, la mitad, Rainer Weiss, responsable de la invención y desarrollo de la técnica de interferometría láser empleada, y la otra mitad a Kip Thorne, físico teórico especialista en relatividad general, que en 1975 diseñó junto a Weiss las líneas directrices futuras del proyecto, con el que ha seguido asociado siempre, y Barry Barish, quien se unió al proyecto en 1994, reorganizándolo como director. (En 2016 el galardón se adjudicó a David Thouless, Duncan Haldane y Michael Kosterlitz, quienes utilizando técnicas procedentes de la topología, una rama de la matemática, consiguieron demostrar que existen estados, «fases», de la materia antes desconocidos, en, por ejemplo, superconductores y superfluidos, que pueden existir

en láminas delgadas, algo que se suponía imposible, explicando, asimismo, el mecanismo —una «transición de fase»— que hace que la superconductividad desaparezca a temperaturas elevadas.)



Agujeros negros y agujeros de gusano

Que la primera detección de radiación gravitacional en LIGO procediera del choque de dos agujeros negros, es también digno de resaltar. En cierto que por entonces existían numerosas pruebas de la existencia de esos objetos astrofísicos tan sorprendentes (la primera evidencia en ese sentido llegó en 1971, procedente de observaciones tomadas por instrumentos instalados en un satélite que Estados Unidos puso en órbita el 12 de diciembre de 1970, y en la actualidad ya se han identificado muchos más, entre otros los existentes en numerosos núcleos de galaxias, incluyendo la nuestra, la Vía Láctea). Conviene recordar que en la década de 1970 muchos científicos especialistas en relatividad general pensaban que los agujeros negros no eran sino «fantasmas matemáticos» de algunas soluciones de la teoría einsteiniana que había que descartar; al fin y al cabo, las ecuaciones de una teoría física que describe un dominio de la realidad pueden albergar soluciones que no se dan en la Naturaleza, el caso, por ejemplo, de la cosmología relativista, que incluye múltiples universos posibles. Pero ha resultado que los agujeros negros sí existen, aunque no comprendamos todavía aspectos tan fundamentales como a donde va a parar la masa que engullen. Quienes más hicieron por defender que los agujeros negros son consecuencias inevitables de la relatividad general y que, por consiguiente, debían existir, fueron Stephen Hawking y Roger Penrose, este formado inicialmente como matemático puro, en una serie de trabajos publicados en la década de 1960. A ellos se unieron después otros científicos, entre ellos John A. Wheeler (por cierto, director de la tesis doctoral de Thorne), quien acuñó el término «agujero negro». Hawking, que falleció en 14 de marzo de 2018, pudo, por consiguiente, conocer que la nueva confirmación de la teoría de la relatividad general, a cuyo desarrollo dedicó tantos esfuerzos, aportaba otra prueba de la existencia de los agujeros negros. Teniendo en cuenta que nadie —ni siquiera Penrose o Wheeler (este también desaparecido)— había aportado más a la física de los agujeros negros (en 1973, en la que se considera su aportación más distinguida, Hawking presentó un trabajo en el que sostenía que los agujeros negros no son tan «negros», que emiten radiación y que, por tanto, pueden terminar desapareciendo, aunque muy lentamente, algo todavía no comprobado), tal vez, si los estatutos de la Fundación Nobel permitiesen que sus Premios los recibiesen no tres como máximo, sino cuatro personas, él habría sido un buen candidato. Pero la historia es como es, no como algunos quisieran que fuera.

En la cita de Weinberg que apareció anteriormente, este manifestaba que «algún día puede que seamos capaces de detectar ondas gravitacionales de alta frecuencia emitidas durante la época de inflación en el universo muy temprano, que nos ofrezcan datos de procesos físicos a muy alta energía». Ese tipo de ondas gravitacionales aún no se han detectado, pero acaso lo sean pronto, pues ¿no se observaron ya las denominadas «arrugas en el tiempo», esto es, las minúsculas irregularidades en el fondo cósmico de radiación de microondas de las que surgieron las complejas estructuras, como las galaxias, que ahora existen en el Universo (Mather *et al.*, 1990; Smoot *et al.*, 1992)? Fue, recordemos, gracias a un satélite, el *Cosmic Background Explorer* (COBE), puesto en órbita, a 900 kilómetros de altura, en el otoño de 1989. Entre tanto, el futuro de la astrofísica de la radiación gravitacional promete grandes novedades. Una de ellas, podría ser la identificación de entidades cosmológicas igual de sorprendentes que los agujeros negros: los «agujeros de gusano», nombre también acuñado



por John Wheeler. Expresado de manera sencilla, los agujeros de gusano son «atajos» en el Universo, una especie de puentes que conectan diferentes lugares de este. Puede, por ejemplo, que la distancia entre dos puntos del Universo sea, digamos, de treinta años-luz (un año-luz es, recordemos, la distancia que recorre un rayo de luz en un año), pero si, debido a la curvatura del universo, del espacio-tiempo, existiera un atajo, un puente, entre esos puntos, la distancia siguiendo este nuevo camino sería otra, acaso mucho menor, dos años-luz, por ejemplo. De hecho, la posibilidad de que existieran esas entidades cosmológicas surgió poco después de que Albert Einstein completase la teoría de la relatividad general: en 1916, un físico de Viena, Ludwig Flamm, encontró una solución de las ecuaciones de Einstein en las que aparecían esos «puentes» espacio-temporales. Sin embargo, el trabajo de Flamm apenas recibió atención, y diecinueve años más tarde Einstein junto a uno de sus colaboradores, Nathan Rosen, publicaba un artículo en el que representaban el espacio físico como formado por dos «hojas» idénticas que entraban en contacto a lo largo de una superficie que llamaban «puente». Ahora bien, en lugar de pensar en atajos espaciales —la idea rayaba, creían, en lo absurdo— interpretaban ese puente como una partícula.

Quienes más hicieron por defender que los agujeros negros son consecuencias inevitables de la relatividad general y que, por consiguiente, debían existir, fueron Stephen Hawking y Roger Penrose en una serie de trabajos publicados en la década de 1960

Décadas más tarde, cuando la teoría de la relatividad general abandonó el intemporal hogar de la matemática en el que se encontraba enclaustrada y, gracias a los avances tecnológicos, demostró su utilidad para entender el cosmos y sus contenidos, se exploró la idea de esos atajos. Uno de los resultados que se obtuvieron entonces fue que de existir, lo hacen durante un tiempo muy breve; son, como si dijéremos, ventanas que se abren durante un intervalo de tiempo tan pequeño que no se puede mirar por ellas, o, traducido a la posibilidad de viajar por ellos, que no da tiempo a utilizarlos para ir de un punto del Universo a otro, para *atajar*. En un espléndido libro, *Black Holes and Time Warps* (1994), Kip Thorne explicó esta propiedad de los agujeros de gusano, pero al mismo tiempo contó que en 1985 recibió una llamada de su amigo Carl Sagan, que estaba terminando de escribir la novela que posteriormente sería también película, *Contact* (1985). Sagan, que no sabía mucha relatividad general, quería que la heroína de su historia, la astrofísica Eleanor Arroway (Jodie Foster en la película), viajase rápidamente de un lugar del Universo a otro penetrando en un agujero negro. Thorne sabía que esto no era posible, pero para ayudar a Sagan pensó en sustituir el agujero negro por un agujero de gusano: «Cuando un amigo necesita ayuda», escribió en su libro (Thorne 1994, 1995, pp. 450 y 452), «uno está dispuesto a buscarla en cualquier parte». No obstante, estaba todavía el problema de la muy efímera vida de estos. Para resolverlo, para mantener abierto el agujero de gusano el tiempo necesario, introdujo la idea de que Arroway utilizase «un material exótico» dotado de una serie de características que, más o menos, detallaba. «Quizá», señalaba Thorne, «el material exótico *puede* existir». Resultó que otros (Stephen Hawking entre ellos) habían llegado a la misma conclusión y, de hecho, la cuestión de si los agujeros de gusano pueden estar abiertos más tiempo del que se dedujo inicialmente ha dado origen a estudios relacionados con ideas que tienen sentido en la física cuántica, como las fluctuaciones del vacío: considerar el espacio como si fuera, a escala ultramicroscópica, un líquido en ebullición.



Otra posibilidad que se ha barajado recientemente procede de un grupo de cinco científicos de las Universidades de Lovaina, Autónoma de Madrid-Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Waterloo, que publicaron un artículo en *Physical Review D* (Bueno, Cano, Goelen, Hertog y Vercknocke, 2018) en el que plantearon la posibilidad de que la radiación gravitacional detectada por LIGO que se interpretó como procedente de la colisión de dos agujeros negros, tenga un origen muy diferente: la colisión de dos agujeros de gusano que rotan. La idea de estos investigadores se basa en que en torno a los agujeros negros existe una frontera, un *horizonte* de sucesos, que hace que las ondas gravitacionales producidas en un choque como el detectado en 2016 se «apaguen», cesen, en un intervalo de tiempo muy breve. Según estos científicos, esto no sucedería si se tratase de agujeros de gusano, en los que no existen tales horizontes de sucesos, y en los que se deberían producir «ecos», reverberaciones de las ondas. Tales ecos no se han detectado, pero bien pudo ser porque la instrumentación no era capaz de hacerlo, o no estaba preparada para ello. He aquí un problema a resolver en el futuro.

Multiuniversos

Considerar seriamente la idea de que pueden existir «puentes» en el espacio-tiempo, agujeros de gusano, puede parecer sumergirse en un mundo en el que la ciencia se confunde con la ciencia-ficción, pero la historia de la ciencia nos ha mostrado que a veces la naturaleza sorprende más que la mente humana más imaginativa. ¿Quién sabe, por consiguiente, si objetos como los agujeros de gusano pueden existir? Recurriendo de nuevo a la radioastronomía, recordemos que antes de su advenimiento ningún científico imaginó que pudieran existir estructuras astrofísicas como los púlsares o los cuásares. Incluso el mismo Universo como entidad diferenciada puede terminar perdiendo su más acusada característica: la unicidad. A lo largo de la última década, cada vez se ha considerado más seriamente una posibilidad que surgió como una manera para entender el colapso de la función de onda, esto es, el que en mecánica cuántica sea la observación la que finalmente decide cuál de todos los estados posibles de un sistema, que coexisten antes de esa observación, se hace realidad (y cuál es la probabilidad de que ocurra esto). Que es posible pensar en otros términos, es algo que hizo un joven físico que estaba trabajando en su tesis doctoral: Hugh Everett III. Al contrario que a la mayoría de sus contemporáneos, la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, tan favorecida por el influyente Niels Bohr, no le convenció, en especial la extraña mezcla entre los mundos clásicos y cuánticos: la función de onda sigue su camino cuántico, hasta que se realiza una medida, que pertenece al mundo de la física clásica; entonces se produce el mencionado colapso de la función de onda. Everett pensaba que semejante dicotomía entre una descripción cuántica y una clásica constituía una «monstruosidad filosófica». ¹ Lo que propuso, en consecuencia, fue prescindir del postulado del colapso de la función de onda y tratar de incluir al observador en la función de onda.

No es fácil explicar en pocas palabras la teoría que elaboró Everett; de hecho, el director de su tesis doctoral, John Wheeler, tuvo dificultades para aceptar todo su contenido, induciéndole a varias revisiones de su trabajo inicial, incluyendo recortar la primera versión que escribió de su tesis y limitar la fuerza de algunas de sus aserciones aunque, por otra parte, reconoció su valor. Me limitaré a citar un pasaje del artículo que Everett III (1957) publicó en *Reviews of Modern Physics* y que coincide con la versión final de su tesis doctoral (obtuvo su Ph. D en abril de 1957). Se lee en él (Everett III, 1957; Barret y Byrne, eds., 2012, pp. 188-189):

De esta manera llegamos a la siguiente imagen: a lo largo de toda la secuencia de procesos de observación, solamente existe un sistema físico que representa el observador, aunque no existe un único

estado para el observador [...] Sin embargo, existe una representación en términos de una *superposición* [...] Por consiguiente, con cada observación (o interacción) sucesiva, el estado de observador «se desdobra» [*branches*] en un número de estados diferentes. Cada rama [*branch*] representa un resultado diferente de la medición y los autoestados *correspondientes* para el estado objeto-sistema. Todas las ramas existen simultáneamente en la superposición tras una secuencia dada de observaciones.



En esta última cita nos encontramos lo que se convertiría en la característica más representativa de la teoría de Everett. Pero esa característica no la promovió él, sino Bryce DeWitt. Fue, en efecto, DeWitt quien rescató y modificó la teoría de Everett, convirtiéndola en «la interpretación de los muchos mundos» (o multiuniversos), el título de una recopilación de trabajos de Everett que DeWitt y Neill Graham editaron en 1973: *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* (DeWitt y Graham, eds., 1973). Antes, DeWitt (1970) había publicado un atractivo, y a la postre influyente, artículo en *Physics Today* en el que presentaba la teoría de Everett bajo el sugerente título de «Mecánica cuántica y realidad». Recordando aquel escrito, DeWitt señaló (DeWitt-Morette, 2011, p. 95): «El artículo de *Physics Today* estaba escrito deliberadamente en un estilo sensacionalista. Introduce una terminología («desdoblamiento» [*splitting*], múltiples «mundos», etcétera) que fueron inaceptables para algunas personas y a la que un cierto número objetó porque, como mínimo, carecían de precisión». Las ideas, la versión de la teoría de Everett implícita en la presentación de DeWitt, y la que se ha mantenido con cierto florecimiento en los últimos tiempos, es la de que la función de onda del Universo, la única que realmente tiene sentido según Everett, se desdobra con cada proceso de «medida», originando mundos, universos, que a su vez se desdoblan en otros, en una secuencia imparables e infinita.

En el artículo de *Physics Today*, DeWitt (1970, p. 35) escribió que «ningún experimento puede mostrar la existencia de “otros mundos”» y que «sin embargo, la teoría tiene el mérito pedagógico de sacar a la palestra muchos de los problemas fundamentales y proporcionar así una base útil de discusión». Durante mucho tiempo (en los últimos años la situación está cambiando), la idea de los multiuniversos fue poco valorada, cuando no considerada poco menos que ridícula, pero quién sabe si en el futuro será posible imaginar algún experimento que pueda someter a prueba la idea de si existen otros universos. Y, puestos a imaginar, si en ellos —en el caso de que existiesen— las leyes de la física serían las que se cumplen en el Universo nuestro, o serían otras; claro que si fuesen otras, ¿cómo identificarlas?

Materia oscura

Hasta finales del siglo XX se pensaba que, aunque quedase aún mucho que averiguar sobre sus contenidos, estructura y dinámica, se sabía de qué estaba compuesto el Universo: de materia «ordinaria», esa que constantemente percibimos alrededor de nosotros, constituida a su vez por las partículas (y radiaciones/cuantos) de las que se ocupa en particular la física de altas energías. Pero resultó no ser así. Diversas evidencias experimentales, como el movimiento interno de algunas galaxias, mostraron que existe una materia de un tipo desconocido, a la que se denomina «materia oscura»; y que también existe una «energía oscura», responsable de que el Universo se expanda con mayor aceleración de la esperada. Los resultados actuales indican que alrededor del cinco por ciento del Universo está formado por masa ordinaria, el 27 de materia oscura y el 68 por ciento de energía oscura. En otras palabras: creíamos que conocíamos eso que llamamos Universo y resulta que es un gran desconocido, porque no sabemos qué son ni la materia oscura ni la energía oscura.



En el LHC se tenían esperanzas de detectar un candidato de partículas de masa oscura, apodadas WIMP (siglas inglesas de *Weakly Interacting Massive Particles* [Partículas masivas que interactúan débilmente]), cuya existencia predice la denominada «supersimetría», pero el resultado ha sido negativo. Un experimento específico para intentar detectar materia oscura utilizó un detector, LUX (Large Underground Xenon), establecido en el Sanford Underground Laboratory, en el que participaron alrededor de 100 científicos e ingenieros de 18 instituciones de Estados Unidos, Europa y, en menor grado, otros países. Situado en una mina de Dakota del Sur, a 1.510 metros de profundidad, ese detector contenía 370 kilogramos de xenón líquido ultra puro, con el que se pretendía detectar la interacción de las partículas que constituyen esa materia oscura con el xenón. Sin embargo, también en este caso el resultado de este experimento, iniciado en octubre de 2014 y concluido en mayo de 2016, fue negativo.

Supersimetría y materia oscura

Desde el punto de vista de la teoría, existe un candidato de formulación que puede acoger la materia oscura, las «partículas oscuras», las mencionadas WIMP. Se trata de un tipo especial de simetría, la «supersimetría», cuya característica más pronunciada es que a cada partícula de las conocidas le corresponde una «compañera supersimétrica». Ahora bien, esa compañera «supersimétrica» debe poseer una propiedad específica: el espín de la partícula supersimétrica debe ser $\frac{1}{2}$ menor que el de su pareja conocida, es decir, el espín de una será un número entero y el de la otra semientero, lo que significa que una será un bosón (partículas con espín entero) y la otra un fermión (partículas con espín semientero); en este sentido, la supersimetría establece una simetría entre bosones y fermiones, imponiendo, por consiguiente, que las leyes de la naturaleza sean las mismas intercambiando bosones por fermiones, y viceversa. La supersimetría fue descubierta a comienzos de la década de 1970, siendo una de sus primeras manifestaciones dentro del contexto de otro tipo de teorías en las que se han puesto muchas esperanzas para unificar las cuatro interacciones, esto es, para incorporar la gravitación al mundo cuántico, lo que significa ir más allá del Modelo estándar: la teoría de cuerdas.² Un buen resumen de lo que es la supersimetría lo ha proporcionado uno de los físicos que se han distinguido por sus trabajos en este campo, David Gross (2011, pp. 163-164):

Acaso la cuestión más importante a la que se enfrentan los físicos de partículas, tanto teóricos como experimentales, sea la de la supersimetría. La supersimetría es un maravilloso concepto teórico. Es una extensión natural, probablemente única, de las simetrías relativistas, especial y general, de la naturaleza. Es también una parte esencial de la teoría de cuerdas; de hecho, la supersimetría se descubrió en primer lugar en la teoría de cuerdas, siendo generalizada después a la teoría cuántica de campos [...]

En las teorías supersimétricas, para toda partícula existe un «supercompañero», o «superpartícula» [...] Hasta el momento no hemos observado ninguna superpartícula [...] Pero esto no es sorprendente. La supersimetría podría ser una simetría exacta de las leyes de la naturaleza, pero que se rompe espontáneamente en el nivel fundamental del universo. Muchas simetrías que existen en la naturaleza se rompen espontáneamente. Si la escala de la ruptura de la supersimetría es lo suficientemente elevada, podríamos no haber visto todavía ninguna de estas partículas. Si las observamos en el nuevo LHC entonces, de hecho, descubriremos nuevas dimensiones cuánticas de espacio y tiempo.

La supersimetría posee muchos rasgos bellos. Unifica por medio de principios de simetría fermiones, quarks y leptones (que son los constituyentes de la materia), bosones (que son los cuantos de las interacciones), el fotón, la W, la Z, los gluones de la cromodinámica cuántica, y el gravitón.



Stephen Hillenburg (1951-2018) es conocido por su serie de animación de 27 episodios que se emitió en el canal de televisión por cable Nickelodeon. El episodio titulado 'The Krusty the Clown Show' es el episodio más largo de la serie. Durante este episodio, el personaje de Krusty el payaso se encuentra en un período de ocho días de aislamiento en un laboratorio de gravedad cero.





Y después de ofrecer otros ejemplos de las virtudes de la supersimetría, Gross se refería a la materia oscura: «Finalmente, extensiones supersimétricas del Modelo estándar contienen candidatos naturales para los WIMP de la materia oscura. Estas extensiones contienen de forma natural, entre los compañeros supersimétricos de la materia ordinaria, partículas que tienen todas las propiedades que se han supuesto para la materia oscura».

Como apuntaba Gross, los experimentos en el LHC eran un buen escenario para encontrar esos «compañeros supersimétricos oscuros», que podrían ser lo suficientemente ligeros como para detectarse en el acelerador del CERN, pero, incluso en este caso, estaría la dificultad de detectarlos: ya que no interactúan ni con la fuerza electromagnética, por lo que no absorben, reflejan o emiten luz, ni con la interacción fuerte; esto es, no interactúan con las «partículas visibles». Poseen, no obstante, energía y momento (si no, serían «fantasmas» sin entidad física alguna), lo que constituye una puerta abierta a que se infiera su existencia aplicando las leyes habituales de conservación de energía-momento a lo que se ve después de una colisión entre las partículas que se observan y las WIMP. Sin embargo y como señalé, hasta el momento no se ha encontrado en el LHC ninguna evidencia de su existencia. En cualquier caso, el problema de qué es la materia oscura constituye un magnífico ejemplo de la confluencia entre física (la física de partículas elementales), cosmología y astrofísica, una muestra más de que a veces no es posible separar esos campos.

Teorías de cuerdas

Las teorías de cuerdas mencionadas a propósito de la supersimetría, aparecieron antes que esta. Según la teoría de cuerdas, las partículas básicas que existen en la naturaleza son en realidad filamentos unidimensionales (cuerdas extremadamente delgadas) en espacios de muchas más dimensiones que las tres espaciales y una temporal de las que somos conscientes; aunque más que decir «son» o «están constituidas» por tales cuerdas, habría que decir, que «son manifestaciones» de vibraciones de esas cuerdas. En otras palabras, si nuestros instrumentos fuesen suficientemente poderosos, lo que veríamos no serían «puntos» con ciertas características a los que llamamos electrón, quark, fotón o neutrino, por ejemplo, sino minúsculas cuerdas (cuyos cabos pueden estar abiertos o cerrados) vibrando.

La primera versión de teoría de cuerdas surgió en 1968, cuando Gabriele Veneziano (1968) introdujo un modelo de cuerda que parecía describir la interacción entre partículas sujetas a la interacción fuerte. El modelo de Veneziano servía únicamente para bosones; esto es, se trataba de una teoría de cuerdas bosónicas. Exigía, eso sí, un marco geométrico de 26 dimensiones. Fue Pierre Ramond (1971) quien, en el trabajo citado en la nota 2 introdujo el concepto de supersimetría, logró la primera extensión de la idea de Veneziano, de manera que incluyese también «modos de vibración fermiónicos», que «únicamente» exige espacios de diez dimensiones. Desde entonces, la teoría de cuerdas (o de supercuerdas), ha experimentado numerosos desarrollos: existen versiones diferentes, que parecen confluir en una teoría conocida como Teoría M, que posee 11 dimensiones.³ Sobre estas teorías, Stephen Hawking (2002, pp. 54-57) escribió en uno de sus libros, *The Universe in a Nutshell*:

Debo decir que, personalmente, me he resistido a creer en dimensiones adicionales. Pero como soy un positivista, la pregunta «¿existen realmente dimensiones adicionales?» no tiene ningún significado para mí. Todo lo que podemos preguntar es si los modelos matemáticos con dimensiones adicionales proporcionan una buena descripción del universo. Todavía no contamos con ninguna observación que requiera dimensiones adicionales para ser explicada. Sin embargo,

hay la posibilidad de que podamos observarlas en el Gran Colisionador de Hadrones LHC de Ginebra. Pero lo que ha convencido a mucha gente, incluido a mí, de que deberíamos tomarnos seriamente los modelos con dimensiones adicionales es la existencia de una red de relaciones inesperadas, llamadas dualidades, entre dichos modelos. Estas dualidades demuestran que todos los modelos son esencialmente equivalentes; es decir, son tan solo aspectos diferentes de una misma teoría subyacente que ha sido llamada teoría M. No considerar esta red de dualidades como una señal de que estamos en buen camino sería como creer que Dios puso los fósiles en las rocas para engañar a Darwin sobre la evolución de la vida.



De nuevo vemos cuantas esperanzas se depositaron en el LHC, esperanzas, lo repito, que han resultado insatisfechas, lo que por supuesto no quiere decir que alguna teoría de cuerdas, formulaciones entre cuyas virtudes se encuentra la posibilidad de incluir la gravedad en un contexto cuántico, no sea cierta.⁴ Desde luego, poseen un atractivo al que los legos en ciencia no han sido, ni son, inmunes, como demuestra el éxito de libros de divulgación como el citado de Hawking o el de otro experto en este campo, Brian Greene (1999), *The Elegant Universe*. En la comunidad internacional de físicos (y matemáticos) existen dos grupos claramente diferenciados. Por un lado, los que piensan que solo en la teoría de cuerdas, en alguna de sus versiones, se encuentra la posibilidad de cumplir el largamente deseado sueño de unificar las cuatro interacciones en una gran síntesis cuántica, yendo así más allá del Modelo estándar y de la relatividad general, y que será posible encontrar formas de verificar experimentalmente esa teoría. Y por otro lado, quienes creen que la teoría de cuerdas recibe mucha más atención de la justificada, al ser una, por el momento al menos, improbable formulación más propia de la matemática que de la física (ciertamente, la matemática no solo ha dado mucho a las teorías de cuerdas, sino que también ha recibido mucho; no es casualidad, por ejemplo, que uno de los más destacados expertos en teoría de cuerdas, Edward Witten, recibiera en 1990 una de las Medallas Fields, el máximo reconocimiento para un matemático). Sobre cuál es el futuro de la teoría de cuerdas, lo mejor es que cite la conclusión de un libro reciente sobre ellas, debido a un físico especializado en ese campo, Joseph Conlon (2016, pp. 235-236), profesor de Física Teórica en la Universidad de Oxford:

¿Qué esconde el futuro para la teoría de cuerdas? Como ha descrito este libro, en 2015 la «teoría de cuerdas» existe como un gran número de separadas, casi-autónomas comunidades. Estas comunidades trabajan en una variedad de temas que van desde la matemática pura a la reunión fenomenológica de datos, y tienen diferentes estilos y emplean diferentes enfoques. Están en todas partes del mundo. Se trabaja en el tema en Filadelfia y en Pyonyang, en Israel y en Irán, por personas con todo tipo de opiniones, apariencia y formación. Lo que tienen en común es que extraen inspiración, ideas y técnicas de partes de la teoría de cuerdas.

Está claro que a corto plazo esta situación continuará. Algunas de esas comunidades florecerán y crecerán al ser revigorizadas con nuevos resultados, ya sean experimentales o teóricos. Otras se reducirán al agotar las vetas de las que se nutren. No soy capaz de decir qué ideas sufrirán uno u otro destino: un resultado experimental puede agotar viejos temas y crear nuevas comunidades en semanas.

Puedo decir con seguridad que como los resultados matemáticos son eternos, el papel de la teoría de cuerdas en matemáticas nunca desaparecerá. Puede reducirse o pasar de moda, pero siempre estará ahí. La teoría de cuerdas es una estructura consistente de algo, y esa estructura consistente conduce a una matemática interesante. Estas partes de la matemática son verdaderas en el mismo indudable sentido que el resto de la matemática es verdadero, y siempre lo serán independientemente de lo que cualquier experimento pueda en el futuro decir sobre las leyes de la física.



En este punto, Conlon se detenía para comparar la dimensión matemática de la teoría de cuerdas con otras teorías de la física, como la teoría cuántica de campos o la gravitación, señalando que «aunque pueden ser acomodadas al lenguaje de la física, en estilo y problemas están mucho más próximas a los problemas de la matemática. [Tratan] de cuestiones cuya naturaleza no es empírica y que no necesitan del experimento para que las respondamos». Ciertamente, es esta una afirmación que muchos, seguramente la inmensa mayoría de los físicos, no compartirán.

El ejemplo extraído de la teoría de cuerdas que Conlon presentaba a continuación era la «Correspondencia AdS/CFT», una formulación teórica publicada en 1998 por el físico argentino Juan Maldacena (1998) que, bajo determinadas condiciones que satisfacen lo que se denomina «principio holográfico» (el Universo entendido como una especie de proyección holográfica), ayuda a establecer correspondencias entre ciertas teorías de gravedad cuántica y cualquier teoría conforme de campos, así como con la cromodinámica cuántica (en 2015, el artículo de Maldacena era el más mencionado en la física de altas energías, con más de 10.000 citas). «La validez de la correspondencia AdS/CFT», afirmaba Conlon, «ha sido comprobada mil veces, pero la naturaleza de estas pruebas es de cálculo y no tienen que ver con la experiencia». Y continuaba:

¿Qué [tiene todo esto que decir] sobre este mundo? Es debido a la sorprendente corrección y coherencia de ideas teóricas de las cuerdas, como la AdS/CFT, que muchos piensan que la teoría de cuerdas también es probablemente una teoría correcta de la naturaleza [...]

¿Sabremos alguna vez si la teoría de cuerdas es correcta? ¿Son válidas realmente las ecuaciones de la teoría de cuerdas para este universo en las escalas más pequeñas posibles?

Todos los que alguna vez han tenido que ver con el tema, tienen la esperanza de que algún día la teoría de cuerdas avance hacia los terrenos más luminosos de la ciencia, en los que conjeturas y refutaciones pugnan entre los teóricos y los experimentalistas como si fueran pelotas de ping-pong. Esto puede exigir avances teóricos; puede probablemente necesitar de avances tecnológicos; sin duda requiere de trabajo duro e imaginación.

El futuro, en definitiva, continúa abierto para la gran esperanza de una gran teoría que unifique la descripción de todas las interacciones y que, al mismo tiempo, permita avanzar en el conocimiento de la estructura más básica de la materia.

Entrelazamiento y criptografía

La mecánica cuántica, lo sabemos muy bien, desafía la imaginación humana. Con dificultad, por la fuerza de los hechos (sus continuos éxitos), nos terminamos acostumbrando, al menos la mayoría, a conceptos como indeterminismo (principio de incertidumbre; Heisenberg, 1927) o colapso de la función de ondas (que, como ya señalé, viene a decir que creamos la realidad cuando realizamos observaciones; hasta entonces, esa realidad no es sino el conjunto de todas las situaciones posibles), pero resulta que todavía hay más. Otra de esas consecuencias contraintuitivas de la física cuántica es el entrelazamiento, un concepto y término (*Verschränkung* en alemán; *entanglement* en inglés) introducido por Erwin Schrödinger en 1935 y vislumbrado también en el célebre artículo que Einstein publicó ese mismo año junto a Boris Podolsky y Nathan Rosen. Se trata de la propiedad de que dos partes de un sistema cuántico están en «comunicación» instantánea, sin importar la distancia que los separe, de manera que acciones sobre una parte tienen correlaciones simultáneas en la otra, una propiedad a la que Einstein se refirió en una carta a Max Born de 1947 como «acción a distancia fantasmagórica [*spukhafte Fernwirkung*]».



Pues bien, el entrelazamiento cuántico existe. Y a lo largo de la última década se han ido acumulando pruebas en este sentido. Una demostración particularmente sólida la proporcionaron en 2015 tres grupos de la Universidad de Delft, del National Institute of Standards and Technology de Estados Unidos y de la Universidad de Viena. En el artículo que publicaron (Herbst, Scheidl, Fink, Handsteiner, Wittmann, Ursin y Zeilinger, 2015) demostraron el entrelazamiento de dos, previamente independientes, fotones, separados 143 kilómetros, los correspondientes a la distancia entre los detectores que utilizaron, situados uno en la isla de La Palma y otro en Tenerife.

En la última década se han ido acumulando pruebas de que el entrelazamiento cuántico existe. Una demostración particularmente sólida la proporcionaron en 2015 tres grupos de la Universidad de Delft, del National Institute of Standards and Technology de Estados Unidos y de la Universidad de Viena

En un mundo como el actual, en el que las comunicaciones, vía internet y otros medios, penetran y condicionan todos los resquicios sociales, el entrelazamiento constituye un magnífico instrumento para hacer seguras esas transmisiones, mediante lo que se conoce como «criptografía cuántica». La base de este tipo de criptografía es un sistema cuántico formado, por ejemplo, por dos fotones, cada uno de los cuales se envía a un receptor diferente. Debido al entrelazamiento, si en uno de esos receptores se efectúa un cambio, este repercute instantáneamente, sin que exista vínculo entre ellos, en el otro. Y lo que es particularmente relevante para la seguridad de la transmisión: si alguien intenta intervenir en la comunicación, tendrá que hacer alguna medida y esta destruirá el entrelazamiento, introduciendo anomalías en el sistema que pueden ser detectadas.

Estrictamente, el intercambio cuántico de información se basa en lo que se conoce como QKD (del inglés Quantum Key Distribution [Distribución cuántica de claves]).⁵ Lo importante de este mecanismo es que se envía una clave cuántica que recibe el receptor entrelazado, que la utiliza para descifrar un mensaje: las dos partes del sistema comparten una clave secreta que luego utilizan para cifrar y descifrar mensajes. Los métodos tradicionales de encriptación se basan en algoritmos asociados a operaciones matemáticas complejas, que son difíciles de descifrar, pero desde luego no imposibles de interceptar, algo que sí es imposible, como he señalado, en la criptografía cuántica.

El entrelazamiento cuántico anuncia la posible creación de una «internet cuántica» global. No es, por consiguiente, sorprendente que estén muy interesados en la criptografía cuántica que utiliza QKD compañías de reciente creación como la suiza ID Quantique (se fundó en 2001 como una *spin-off* del Grupo de Física Aplicada de la Universidad de Ginebra), la estadounidense MagiQ o la australiana QuintessenceLabs, además de otras bien establecidas como HP, IBM, Mitsubishi, NEC, NTT y Toshiba.

Un problema con la criptografía cuántica es que si utiliza canales de comunicación clásicos, como la fibra óptica, la señal se debilita debido a que los fotones son absorbidos o difundidos por las moléculas de la fibra (el límite para enviar mensajes criptografiados cuánticamente es del rango de una o dos ciudades). La transmisión clásica sufre también este problema, que resuelve con repetidores, pero esto no es posible con su paralelo cuántico debido al hecho ya señalado de que una interacción intermedia destruye la unidad del mensaje. El vacío espacial,



no las fibras del tipo que sean, es el mejor «cable» posible para la comunicación cuántica. Y se ha producido recientemente un avance significativo en este sentido: un equipo dirigido por Jian-Wei Pan, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China en Hefei, en colaboración con el de Anton Zeilinger (uno de los mejores especialistas en comunicación y computación cuánticas) en la Universidad de Viena, consiguieron enviar mensajes cuánticos entre Xinglong y Graz —separadas por una distancia de 7.600 kilómetros— utilizando como intermediario un satélite chino, *Micius*, que fue puesto en órbita, a una altura de 500 kilómetros, en agosto de 2016.⁶ Para ampliar su rango de acción, se utilizaron sistemas de fibra óptica que unían Graz con Viena, y Xinglong con Pekín; de esta manera, se estableció una videoconferencia segura entre las Academias de Ciencias China y de Viena que duró 75 minutos y exigió dos gigabytes de datos, una capacidad similar a la que empleaban los teléfonos celulares en la década de 1970. Semejantes logros preludian el establecimiento de redes de satélites que permitirán comunicaciones seguras de todo tipo (llamadas telefónicas, correos electrónicos, faxes). Un mundo nuevo, en definitiva, al que más tarde se unirá también otro instrumento relacionado íntimamente con los fenómenos cuánticos mencionados, la computación cuántica, en la que el principio de superposición cuántico desempeña un papel central.

El entrelazamiento cuántico anuncia la posible creación de una «internet cuántica» global, por lo que no es sorprendente que compañías como HP, IBM, Mitsubishi, NEC, NTT y Toshiba estén muy interesadas en la criptografía cuántica que utiliza QKD

Mientras que en la computación clásica la información se almacena en bits (0, 1), en la cuántica la base son los *qubits* (*quantum bits*; cúbits en castellano). Existen muchos sistemas físicos que pueden actuar como cúbits; por ejemplo, fotones, electrones, átomos y pares de Cooper. El principio de superposición cuántico mencionado significa que, si pensamos por ejemplo en fotones, estos pueden estar polarizados horizontal o verticalmente, pero también en alguna combinación entre ambos estados. La consecuencia es que se tiene un número más grande de unidades para procesar-almacenar en una máquina de computación, con las que, además, es posible realizar varias operaciones a la vez, esto es, operar en paralelo (todo bit tiene que ser bien 1 o 0, mientras que un cúbit puede ser 1 o 0 al mismo tiempo, lo que permite realizar múltiples operaciones a la vez). Evidentemente, cuanto mayor sea el número de cúbits que se empleen, mayor será la capacidad de cálculo del correspondiente computador cuántico: se cree que el número de cúbits necesarios para superar a los computadores clásicos es 50, un umbral que hace poco IBM ha anunciado ha superado... pero solamente durante unos pocos nanosegundos. Y es que un gran problema es mantener los cúbits entrelazados (esto es, no perturbados) durante un tiempo suficiente, algo muy complicado debido a que las partículas subatómicas son inherentemente inestables. Es por esto, para evitar lo que se denomina «decoherencia», que entre los principales campos de investigación en la computación cuántica se encuentre la búsqueda de desarrollar modos de minimizar los efectos perturbadores de la luz, sonido, movimiento o temperatura, lo que hace que muchos computadores cuánticos se construyan dentro de cámaras de vacío a muy bajas temperaturas. Queda todavía mucho por hacer, pero por razones obvias empresas y gobiernos (a la cabeza de estos en la actualidad China) se esfuerzan en avanzar en el campo de la computación cuántica: Google y NASA, por ejemplo, están utilizando una computadora cuántica fabricada por una empresa canadiense,



D-Wave Systems, Inc, la primera en comercializar este tipo de máquinas, que puede realizar algunos tipos de operaciones a una velocidad 3.600 veces superior a la del supercomputador digital más rápido del mundo.

Otra posibilidad asociada al entrelazamiento cuántico es el del teletransporte, que, según la definición de Ignacio Cirac (2011, p. 478), consiste en «la transferencia de un estado cuántico intacto de un lugar a otro, realizada por un remitente que no conoce ni el estado a ser teletransportado ni la localización del receptor al que debe llegar». Se han realizado ya experimentos de teletransporte con fotones, iones y átomos, pero aún queda un largo camino por recorrer.

La física en un mundo interdisciplinar

En las secciones precedentes me he ocupado de desarrollos que han tenido lugar en lo que podríamos denominar «física más fundamental», pero la física no se limita, en modo alguno, al estudio de los componentes «últimos» (?) de la naturaleza, de la unificación de las fuerzas, o de las aplicaciones de los principios más básicos de la física cuántica. La física está constituida por un amplio y variado conjunto de campos —materia condensada, bajas temperaturas, nuclear, óptica, electromagnetismo, fluidos, termodinámica...—, y en todas ellas se ha continuado avanzando en la última década, avances que, sin duda, proseguirán en el futuro. Sería imposible referirme a todos, pero sí quiero señalar un campo al que la física tiene mucho que aportar: la interdisciplinariedad.

La naturaleza, recordemos, es una y no conoce fronteras; somos nosotros, por necesidades prácticas los que las hemos establecido, creando disciplinas que llamamos física, química, biología, matemáticas, geología, etcétera. Pero al ir avanzando en nuestro conocimiento de la naturaleza, se hace cada vez más necesario ir más allá de esas fronteras, unir disciplinas. Es imprescindible que se formen grupos de especialistas —no necesariamente muy numerosos— en disciplinas científicas y tecnológicas diferentes, que, provistos de los suficientes conocimientos generales como para poder entenderse entre sí, colaboren en resolver nuevos problemas, problemas que por su propia naturaleza necesitan de esa colaboración. Y la física no puede faltar en esos grupos. Encontramos manifestaciones de interdisciplinariedad en prácticamente todos los ámbitos. En, por ejemplo, los procesos que subyacen en los fenómenos atmosféricos, que involucran todo tipo de ciencias: intercambios energéticos y gradientes de temperaturas, radiación que se recibe del Sol, reacciones químicas, composición de la atmósfera, desplazamiento de corrientes atmosféricas y marinas, biología animal y de plantas para entender el comportamiento y reacciones de especies animales y vegetales, procesos industriales, modos y mecanismos sociales de transporte y un largo etcétera. La arquitectura y el urbanismo nos proporcionan también evidencias en el mismo sentido. Para el cambio climático, las limitaciones energéticas, la contaminación atmosférica o la aglomeración en gigantescas urbes, es imperativo ahondar en la colaboración entre arquitectura, urbanismo, ciencia y técnica, sin olvidar que también habrá que tener en cuenta otras disciplinas, como la psicología y la sociología, vinculadas al estudio del carácter de los humanos. Debemos construir edificios que minimicen las pérdidas de energía, procurando aproximarse a la autosuficiencia energética, a la *sostenibilidad*, una de las palabras de moda en los últimos años. Afortunadamente, junto a materiales con novedosas propiedades térmicas y acústicas, disponemos de elementos, frutos también de la ciencia y la tecnología, como paneles solares, y también la posibilidad del reciclaje de desechos orgánicos.

Un ejemplo particularmente importante, en el que, además, la presencia de la física es manifiesta, se encuentra el denominado «Proyecto del Mapa de la Actividad Cerebral», que el entonces presidente de Estados Unidos, Barack Obama, presentó públicamente el 2 de



abril de 2013. Se trata de un proyecto de investigación —sucesor en más de un aspecto del gran Proyecto Genoma Humano, que logró *cartografiar* los genes que componen nuestros cromosomas— destinado a estudiar las señales enviadas por las neuronas y a determinar cómo los flujos producidos por esas señales a través de las redes neuronales se convierten en pensamientos, sentimientos y acciones. De la importancia de este proyecto, que se enfrenta a uno de los mayores retos de la ciencia contemporánea, como es el comprender de manera global el cerebro humano, y cómo este tiene conciencia de sí mismo, caben pocas dudas. Al defenderlo, Obama mencionó su esperanza de que con él se abriría también el camino para desarrollar tecnologías esenciales para combatir enfermedades como el alzhéimer y el parkinson, al igual que para establecer nuevas terapias para diversas enfermedades mentales, además de servir de ayuda en el avance de la inteligencia artificial.

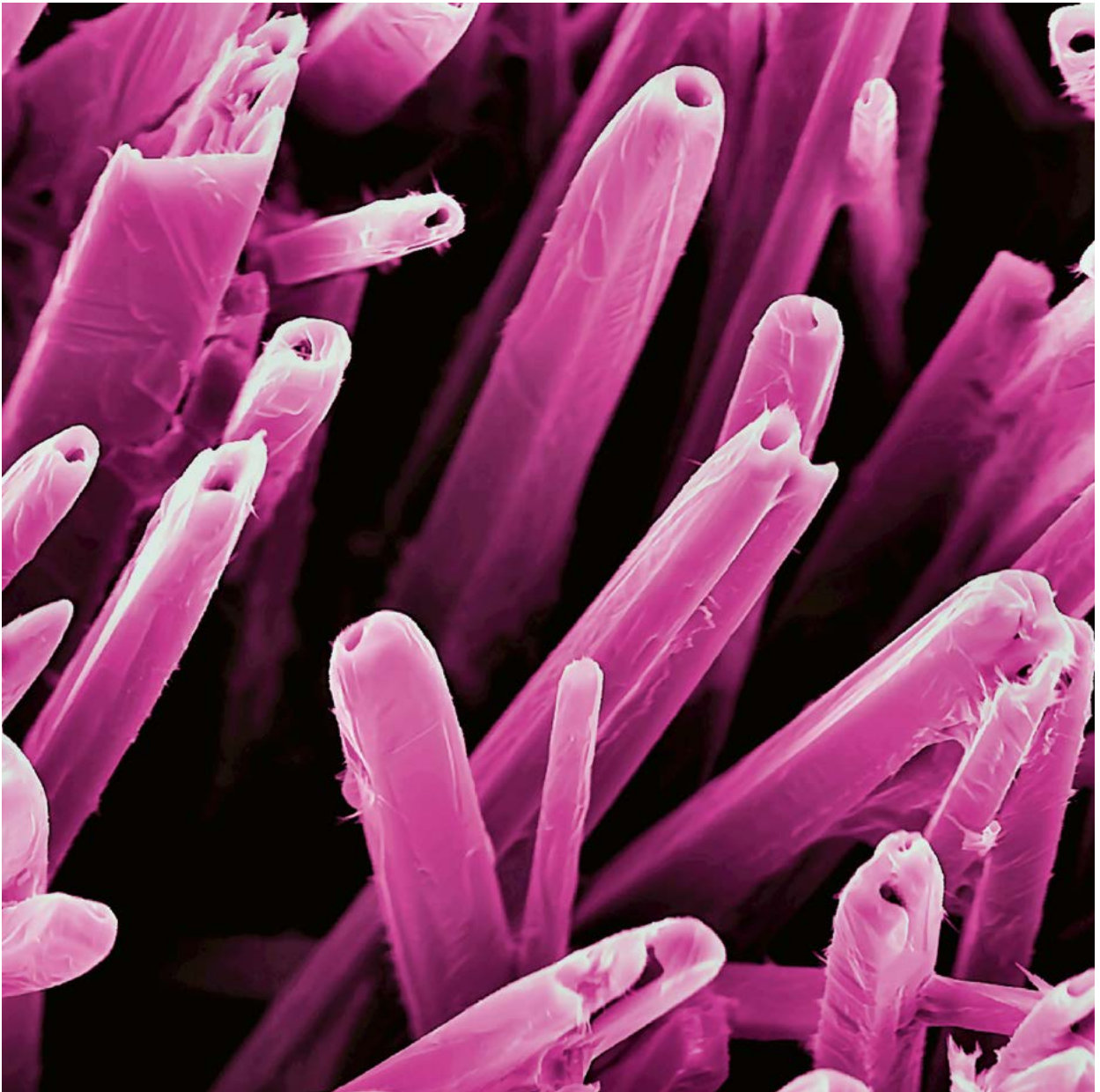
Basta con leer el encabezamiento del artículo en el que un grupo de científicos presentaron y defendieron este proyecto para darse cuenta de la naturaleza interdisciplinar del mismo y la presencia en él de la física. Publicado en 2012 en la revista *Neuron*, el artículo se titula «Proyecto de mapa de actividad cerebral y el reto de la conectómica funcional» y está firmado por seis científicos: Paul Alivisatos, Miyoung Chun, George Church, Ralph Greenspan, Michael Roukes y Rafael Yuste (2012). Los propios lugares de trabajo de estos autores revelan la naturaleza plural del proyecto: División de Ciencia de Materiales y Departamento de Química de Berkeley (Alivisatos), Departamento de Genética de Harvard (Church), Instituto Kavli del Cerebro y de la Mente (Greenspan), Instituto Kevin de Nanociencia y Departamento de Física del California Institute of Technology (Roukes) y Departamento de Ciencias Biológicas de Columbia (Yuste).

La naturaleza es una y no conoce fronteras; somos nosotros los que las hemos establecido, creando disciplinas que llamamos física, química, biología, matemáticas, geología... Pero al ir avanzando en nuestro conocimiento de la naturaleza, se hace cada vez más necesario ir más allá de esas fronteras, unir disciplinas

Adviértase la presencia de la nanociencia y nanotecnología. El mundo atómico es uno de los lugares en donde confluyen las ciencias de la naturaleza y las tecnologías que se basan en ellas, ya que, a la postre, los átomos y las unidades (protones, neutrones, electrones, quarks...) que los forman constituyen los «ladrillos del mundo». Ahora bien, hasta hace relativamente poco tiempo no se había desarrollado un campo de investigación —me estoy refiriendo a la nanotecnología y nanociencia— en el que semejante base común manifestase tal potencialidad de aplicaciones en dominios disciplinares diferentes. Estos campos de investigación y desarrollo deben su nombre a una unidad de longitud, el nanómetro (nm), la milmillonésima parte del metro. La nanotecnociencia engloba cualquier rama de la tecnología o de la ciencia que investiga o hace uso de nuestra capacidad para controlar y manipular la materia a escalas comprendidas entre 1 y 100 nm. Los avances logrados en el mundo de la nanotecnociencia han permitido desarrollar nanomateriales y nanodispositivos que ya se están utilizando en ámbitos diversos. Así, es posible emplear una disolución de nanopartículas de oro de unos 35 nm. de diámetro para localizar y detectar tumores cancerígenos en el cuerpo, puesto que hay una proteína presente en las células cancerígenas que reacciona con los anticuerpos adheridos a esas nanopartículas, permitiendo localizar las células malignas. De hecho, la medicina es un



Imagen de microscopio electrónico de barrido de las nanoestructuras formadas en superficies de vanadio y óxido de vanadio por un haz láser de dióxido de carbono. Dichas estructuras tienen aplicaciones variadas en electrónica y nanotecnología





campo particularmente adecuado para la nanotecnociencia, y así ha surgido la nanomedicina, que, con el afán humano de compartimentar, se divide con frecuencia en tres grandes áreas: el nanodiagnóstico (desarrollo de técnicas de imagen y de análisis para detectar enfermedades en sus estadios iniciales), la nanoterapia (búsqueda de terapias a nivel molecular, yendo directamente a las células o zonas patógenas afectadas) y la medicina regenerativa (crecimiento controlado de tejidos y órganos artificiales).

Siempre es difícil y arriesgado predecir el futuro, pero no tengo duda de que ese futuro deparará todo tipo de desarrollos, sorpresas inimaginables las denominaríamos hoy. Puestos a imaginar una de esas «sorpresas», me remitiré a una posibilidad que Freeman Dyson (2011), siempre amigo de las predicciones, planteó hace poco. Es lo que bautizó como «radio-neurología». Se trata de la posibilidad de que al avanzar en el conocimiento de funcionamiento del cerebro, sea posible observar detalladamente y, utilizando millones de sensores microscópicos, convertir en señales electromagnéticas los intercambios que se producen entre las neuronas y que dan lugar a pensamientos, sensaciones, etcétera. Esas señales podrían ser recibidas por otro cerebro, provisto de sensores similares, y reconvertirlas a los pensamientos del cerebro emisor. Sería, ¿será?, un tipo de radiotelepatía.

Epílogo

Vivimos a caballo entre el pasado y el futuro, con el presente escapándonos constantemente de las manos, como una sombra evanescente. El pasado nos da recuerdos y conocimientos adquiridos, comprobados o por comprobar, un tesoro inapreciable que nos facilita el camino a seguir. Ahora bien, en realidad no sabemos hacia dónde nos conducirá ese camino en el futuro, qué características nuevas aparecerán en él, si será fácilmente transitable o no. Lo que es seguro es que será diferente y muy interesante. Y la física, al igual que las demás ciencias, desempeñará un papel importante, fascinante, en la configuración de ese futuro.

Notas

1. Everett a Bryce DeWitt, 31 de mayo de 1957; carta reproducida en Barret y Byrne (eds.) (2012, p. 255).
2. De hecho, la supersimetría fue descubierta no una sino tres veces. El primero fue el físico francés Pierre Ramond, inicialmente en solitario y luego junto a André Nevey y John Schwarz; sin embargo, el contexto en el que introdujeron esta nueva simetría era muy abstracto y no era evidente su relación con las partículas elementales. Casi al mismo tiempo, Yuri Golfand y Evgeny Likhtman, y luego Dmitri Volkov y Vladimir Akulov la descubrieron sin que trascendiera fuera de la URSS. El trabajo de Julius Wess y Bruno Zumino (1974) fue el que atrajo la atención de los físicos de altas energías, aunque durante algún tiempo como una especulación puramente teórica.
3. La idea es que las dimensiones adicionales no se manifiestan debido a un fenómeno denominado «compactificación»: esas dimensiones, de escalas muy inferiores a las atómicas, se cierran en sí mismas formando círculos.
4. La esperanza que se depositó en los resultados que se obtendrían en el LHC sobre la materia oscura y la teoría de cuerdas han sido una constante desde hace ya unos cuantos (¿demasiados?) años. Un ejemplo significativo es Edward Witten, quien en su contribución al libro dedicado a celebrar el 60 cumpleaños de Stephen Hawking, escribió (Witten, 2003, p. 461): «Hay solo un gran descubrimiento que yo pueda señalar que tenga una gran posibilidad razonable de realizarse durante esta década. Ese descubrimiento no es en la teoría [...] El descubrimiento se realizará probablemente en el Fermilab con el Tevatron [...] o en el CERN con el LHC». El Tevatron dejó de funcionar en 2011.
5. Sobre este punto, así como otros que trato más adelante, consultar Zeilinger (2011).
6. El resultado se anunció en un artículo de 2018, firmado por 36 investigadores, 27 de ellos chinos y 9 austriacos, pertenecientes a 11 instituciones chinas y 3 austriacas: Sheng-Kai Liao et al. (2018).

Bibliografía

- Abbott, B. P. et al. (2016): «Observation of gravitational waves from a binary black hole merger», en *Physical Review Letters*, n.º 116, 061102.
- (2017): «Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral», en *Physical Review Letters*, n.º 119, 161101.
- Alivisatos, Paul; Chun, Miyoung; Church, George; Greenspan, Ralph; Roukes, Michael y Yuste, Rafael (2012): «The brain activity map project and the challenge of functional connectomics», en *Neuron*, n.º 74, pp. 970-974.
- Barret, Jeffrey A. y Byre, Peter (eds.) (2012): *The Everett Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, Princeton University Press.
- Bernstein, Jeremy (2012a): «A palette of particles», *American Scientist*, vol. 100, n.º 2, marzo-abril, pp. 146-155; reproducido en Bernstein (2012 b).
- (2012b): «Un abanico de partículas», en *Investigación y Ciencia*, n.º 432, septiembre, pp. 24-33.
- Bueno, Pablo; Cano, Pablo A.; Goelen, Frederik; Hertog, Thomas y Vercnocke, Bert (2018): «Echoes of Kerr-like wormholes», en *Physical Review D*, n.º 7, 024040.
- Chiao, Raymond Y.; Cohen, Marvin L.; Legget, Anthony J.; Phillips, William D. y Harper, Jr., Charles L. (eds.) (2011): *Visions of Discovery*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Cirac, J. Ignacio (2011): «Quantum Information», en R. Y. Chiao; M. Cohen; A. J. Legget; W. D. Phillips y C. L. Harper, Jr. (eds.), *Visions of Discovery*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 471-495.
- Conlon, Joseph (2016): *Why String Theory?*, Boca Raton, CRC Press.
- DeWitt, Bryce (1970): «Quantum mechanics and reality», en *Physics Today*, n.º 23, septiembre, pp. 30-35.
- DeWitt, Bryce y Graham, Neill (eds.) (1973): *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton, Princeton University Press.
- DeWitt-Morette, Cécile (2011): *The Pursuit of Quantum Gravity. Memoirs of Bryce DeWitt from 1946 to 2004*, Heidelberg, Springer.
- Dyson, Freeman (2011): «The future of science», en Chiao, R. Y.; Cohen, M.; Legget, A. J.; Phillips, W. D. y Harper, C. L., Jr. (eds.), *Visions of Discovery*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 39-54.
- Einstein, Albert y Rosen, Nathan (1937): «On gravitational waves», en *Journal of the Franklin Institute*, n.º 223, pp. 43-54.
- Englert, François y Brout, Robert (1964): «Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons», en *Physical Review Letters*, n.º 13, pp. 321-323.
- Everett, Hugh (1957): «“Relative state” formulation of quantum mechanics», en *Reviews of Modern Physics*, n.º 29, pp. 454-462.
- Gell-Mann, Murray (1995): *El quark y el jaguar*, Barcelona, Tusquets; edición original en inglés de 1994.
- Greene, Brian (1999): *The Elegant Universe*, Nueva York, W. W. Norton; versión en castellano en Crítica, 2001.
- Gross, David J. (2011): «The major unknowns in particle physics and cosmology», en R. Y. Chiao, M. Cohen, A. J. Legget, W. D. Phillips y C. L. Harper, Jr. (eds.), *Visions of Discovery*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 152-170.
- Guralnik, Gerald S.; Hagen, Carl R. y Kibble, Thomas W. (1964): «Global conservation laws and massless particles», en *Physical Review Letters*, n.º 13, pp. 585-587.
- Hawking, Stephen (2002): *El universo en una cáscara de nuez*, Barcelona, Crítica; edición original en inglés de 2001.
- Herbst, Thomas; Scheidl, Thomas; Fink, Matthias; Handsteiner, Johannes; Wittmann, Bernhard; Ursin, Rupert y Zeilinger, Anton (2015): «Teleportation of entanglement over 143 km», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n.º 112, 14202-14205.
- Higgs, Peter W. (1964a): «Broken symmetries, massless particles and gauge fields», en *Physics Review Letters*, n.º 12, pp. 132-201.
- (1964b): «Broken symmetries and the masses of Gauge bosons», en *Physical Review Letters*, n.º 13, pp. 508-509.
- Maldacena, Juan M. (1998): «The Large N limit of superconformal field theories and supergravity», en *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, n.º 2, pp. 231-252.
- Mather, John et al. (1990): «A preliminary measurement of the Cosmic Microwave Background Spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite», en *Astrophysical Journal*, n.º 354, L-37-L40.
- Ramond, Pierre (1971): «Dual theory for free fermions», en *Physical Review D*, n.º 3, pp. 2415-2418.
- Sheng-Kai, Liao et al. (2018): «Satellite-relayed intercontinental Quantum Network», en *Physical Review Letters*, n.º 120, 030501.
- Smoot, George et al. (1992): «Structure of the COBE differential microwave radiometer first year maps», en *Astrophysical Journal*, n.º 396, L1-L5.
- Thorne, Kip S. (1994): *Black Holes and Time Warps*, Nueva York, W. W. Norton; traducción al castellano en Thorne (1995).
- (1995): *Agujeros negros y tiempo curvo*, Barcelona, Crítica.
- Veneziano, Gabriele (1968): «Construction of a crossing-symmetric, Regge-behaved amplitude for Linearly Rising Trajectories», en *Nuovo Cimento A*, n.º 57, pp. 190-197.
- Weinberg, Steven (2011): «Particle physics, from Rutherford to the LHC», en *Physics Today*, vol. 64, n.º 8, agosto, pp. 29-33.
- Wess, Julius y Zumino, Bruno (1974): «Supergauge transformations in four dimensions», en *Physics Letters B*, n.º 70, pp. 39-50.
- Witten, Edward (2003): «The past and future of string theory», en G. W. Gibbons, E. P. S. Shellard y S. J. Rankin (eds.), *The Future of Theoretical Physics and Cosmology. Celebrating Stephen Hawking's 60 Birthday*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 455-462.
- Zeilinger, Anton (2011): «Quantum entanglement: from fundamental questions to quantum communication and quantum computation and back», en Chiao, R. Y.; Cohen, M.; Legget, A. J.; Phillips, W. D. y Harper, C. L., Jr. (eds.), *Visions of Discovery*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 558-571.



María Martín-Torres
CENIEH (Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana), Burgos, España

María Martín-Torres es doctora en medicina y cirugía, máster en Antropología Forense y en Orígenes Humanos, directora del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) en Burgos y profesora honoraria del Departamento de Antropología del University College de Londres. Forma parte del equipo de investigadores de Atapuerca desde 1998 y, entre 2007 y 2015, fue responsable del Grupo de Antropología Dental del CENIEH. Sus investigaciones se centran en la paleobiología de los homínidos, la paleopatología y el escenario evolutivo de los primeros europeos. Ha dirigido y participado en varios proyectos internacionales relacionados con el estudio de restos dentales encontrados en lugares como Dmanisi (Georgia) y China. Es autora de más de 60 capítulos de libros y artículos científicos en revistas incluidas en el índice de citas SCI (*Science Citation Index*), como *Nature*, *Science*, *PNAS* o *Journal of Human Evolution*. Su trabajo figura entre el 1% de autores más citados en el campo de las ciencias sociales según el índice Thomson Reuters.

Libros recomendados: Briones, Carlos; Fernández Soto, Alberto y Bermúdez de Castro, José María (2015): *El universo, la vida, los humanos*, Barcelona, Crítica; y Arsuaga, Juan Luis y Martínez, Ignacio (2001): *La especie elegida*, Barcelona, Temas de Hoy.

En la última década, el análisis de ADN antiguo se revela como una investigación de frontera en cuanto ha permitido utilizar metodologías (genética) y conceptos (hibridación) que no eran comunes en el ámbito antropológico. Si bien en la actualidad somos la única especie humana sobre la faz de la tierra, ahora sabemos que tuvimos descendencia con otras especies humanas que ya no existen, pero de las que hemos heredado algunos genes. ¿Qué significa ser híbrido? ¿Qué implica tener en nuestra sangre material genético de otros homínidos? ¿Tuvo que ver esta hibridación en la extinción de los neandertales? ¿Aporta este hecho una perspectiva diferente sobre la diversidad humana actual? Tanto la genética como la evidencia fósil acumuladas durante esta década, nos proporcionan un retrato más diverso y dinámico sobre nuestro origen. Es posible que muchas de las claves del éxito adaptativo de *Homo sapiens* se encuentren en ese mestizaje que no solo no atentó contra nuestra identidad, sino que probablemente es parte del sello y la idiosincrasia de nuestra especie.



El uso cotidiano de la palabra investigar está henchido de connotaciones sobre progreso y futuro. Paradójicamente, el origen etimológico de este verbo está en el vocablo latín *investigare*, que viene a su vez de la palabra *vestigium* (vestigio, huella). Así, el significado original del término *investigar* sería el de «ir tras la huella». Para aquellos que estudiamos periodos antiguos, volver a la raíz de la palabra investigar pone de manifiesto una noción con frecuencia olvidada y es que, para poder progresar, es necesario conocer y aprender de lo pasado. La paleoantropología es la disciplina que estudia el origen y la evolución del hombre y trata de reconstruir la historia de los cambios biológicos y culturales experimentados por nuestros ancestros desde que, hace unos seis millones de años, se separaron los linajes que dieron lugar a humanos y chimpancés. Uno de los principales cuerpos de evidencia sobre los que se sustentan los estudios sobre evolución humana son los fósiles de especies de homínidos extintas. Esto conlleva, con frecuencia, a la idea errónea de que la paleoantropología es un ámbito de estudio encapsulado en el pasado, con contribuciones mínimas, como mucho anecdóticas, a nuestra comprensión del ser humano actual. Justamente, la investigación desarrollada en evolución humana durante la última década ha roto este paradigma, tanto desde el punto de vista metodológico como conceptual, desarrollando investigaciones en la frontera del conocimiento y aportando datos inéditos sobre nuestra propia especie.

El pasado se descifra ahora con la tecnología del futuro. La necesidad de hacer «hablar a los muertos», y de maximizar la información que se puede extraer del preciado y escaso registro fósil y arqueológico, ha llevado a los paleontólogos y arqueólogos a perfeccionar y exprimir las aplicaciones de los métodos actuales, delineando, en algunos casos, nuevas líneas de investigación. La aplicación, por ejemplo, de técnicas de imagen de alta resolución al estudio de los fósiles, ha permitido la fundación de una rama metodológica, con entidad propia, conocida como Antropología Virtual. Así, la era digital llega también al mundo del pasado y, con estas técnicas, es posible ahora estudiar y manipular de forma no destructiva un fósil, realizando mediciones y reconstrucciones bidimensionales y tridimensionales (2D, 3D) de cualquier superficie tanto externa como interna del objeto de estudio. Pero sin duda, el mejor exponente de la fructífera relación entre la tecnología y el estudio del pasado se da en la consolidación de un ámbito de investigación reciente, el de la paleogenética o análisis de ADN antiguo. El reconocimiento con el Premio Princesa de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2018 al biólogo sueco Svante Pääbo, considerado uno de los fundadores de la paleogenética, es sintomático de la trascendencia que han tenido los estudios moleculares en la reconstrucción de una parte fundamental de nuestra historia. El equipo liderado por Svante Pääbo, director del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig (Alemania), ha sido pionero en la adaptación de técnicas de alto rendimiento de secuenciación del ADN al estudio del ADN antiguo, posibilitando así el análisis del genoma completo de organismos extinguidos. Precisamente, su colaboración con el equipo investigador de los yacimientos de la sierra de Atapuerca (Burgos), ha posibilitado el hito científico de extraer ADN de los homínidos del yacimiento de la Sima de los Huesos (430.000 años de antigüedad), el ADN más antiguo jamás recuperado hasta el momento en un ambiente sin permafrost.

La consolidación de los estudios de paleogenética ha proporcionado datos sobre el origen de nuestra especie, *Homo sapiens*, y el tipo de interacción que mantuvimos con otras especies de homínidos ya extinguidos, que parecían impensables hace una década. Hasta ahora, la historia del origen de *Homo sapiens* cabía en un relato casi lineal sobre el surgimiento en un lugar único de África. Apoyándose en un abanico de capacidades físicas e intelectuales avanzadas, los humanos modernos se habrían expandido por todos los continentes no hace más de 50.000 años. Este es el cuerpo de la conocida como teoría del *Out of Africa*, en la que se sugiere que en su expansión por todo el planeta, *Homo sapiens* habría reemplazado a



todos los grupos humanos arcaicos sin cruzarse genéticamente con ellos. Sin embargo, los análisis moleculares han roto este paradigma con la revelación de que los humanos modernos no solo hibridaron y tuvieron descendencia fértil con especies humanas extintas, como los neandertales, sino que entre el 2% y el 4% de los genes de las poblaciones no africanas actuales pertenecen a estos. Pero esto no es todo. A partir del análisis genético de un hueso de la mano, hallado en la cueva de Denisova, en los montes Altai (Siberia), los genetistas han identificado una nueva población humana, de la que apenas tenemos fósiles y por lo tanto desconocemos su apariencia física, pero que es genéticamente diferente de neandertales y humanos modernos. Esta población, coloquialmente conocida como los *denisovanos*, habría coexistido e hibridado con nuestra especie y con *H. neanderthalensis* de forma que, entre el 4% y el 6% del material genético de los humanos actuales que pueblan Papúa Nueva Guinea, Australia y Melanesia, pertenecería a los denisovanos.

El pasado se descifra con la tecnología del futuro. La necesidad de maximizar la información que se puede extraer del registro fósil y arqueológico ha llevado a perfeccionar y exprimir las aplicaciones de los métodos actuales y delinear nuevas líneas de investigación

La paleogenética se erige como una investigación de frontera en muchos de los sentidos descritos por el filósofo de la ciencia Thomas Khun, en su obra *La estructura de las revoluciones científicas*, en cuanto ha permitido utilizar metodologías (la genética) y conceptos (hibridación) que no eran comunes en el ámbito paleoantropológico, proporcionar resultados inesperados que ponen en cuestión el paradigma imperante y, sobre todo, abrir puertas a dimensiones imprevistas del conocimiento. Si bien en la actualidad somos la única especie humana sobre la faz de la tierra, ahora sabemos que no siempre estuvimos solos, y que conocimos y tuvimos descendencia con otros humanos que ya no existen pero que han dejado su firma en nuestros genes. El vértigo intelectual se desata: ¿Qué significa ser híbrido? ¿Cómo fue conocer y convivir con otra especie humana inteligente? ¿Qué implica tener en nuestra sangre material genético de otras especies humanas? ¿Tuvo que ver esta hibridación en la extinción de nuestros hermanos los neandertales? ¿Aporta esto una perspectiva diferente sobre la diversidad humana actual?

Así pues, aunque es difícil sustraerse a la fascinación que ejerce el conocimiento sobre los periodos más antiguos, de los que la evidencia disponible es todavía más escasa, la investigación en el ámbito de la paleoantropología en la última década ha sido particularmente prolífica en información sobre el periodo más reciente y, en especial, sobre la historia de nuestra propia especie. Los datos genéticos, junto con nuevos descubrimientos fósiles y nuevas dataciones que sitúan a nuestra especie fuera del continente africano antes de lo estimado por la teoría del *Out of Africa*, han supuesto la revelación de un pasado completamente desconocido para las poblaciones actuales.

En este marco, el presente artículo repasará algunos de los hitos principales descubiertos en esta última década en el ámbito de la evolución humana, pero con un énfasis particular en la idea de que, como expresó el filósofo Martin Heidegger «la forma suprema del saber es la pregunta» y el diagnóstico del estado de salud de una ciencia vendrá dado, ya no tanto por su capacidad de generar respuestas, sino de generar preguntas nuevas, en este caso, sobre nosotros mismos.



Uno de los principales problemas que plantea el tema de las especies híbridas es que atenta contra el *concepto biológico de especie* originalmente planteado por el biólogo evolutivo Ernst Mayr. Según Mayr, una especie es un grupo o población natural de individuos que pueden cruzarse entre sí, pero están aislados reproductivamente de otros grupos afines. Este concepto implica que individuos de especies diferentes no deberían de poder hibridar ni tener descendencia fértil con otros individuos que no pertenezcan al mismo taxón. Sin embargo, la naturaleza nos proporciona un abanico amplio de casos de hibridación, principalmente en el mundo vegetal, en las que las especies de ascendencia mixta pueden tener hijos que no son necesariamente estériles. En el mundo animal son menos frecuentes o menos conocidos, aunque se conocen casos entre especies de perros, gatos, osos, ratones y primates, como los monos aulladores. Un ejemplo particularmente interesante del mundo de los primates es el de los híbridos que resultan del cruce entre diferentes especies de monos del género *Cercopithecidae*, conocidos familiarmente como babuinos o papiones y que, como veremos, nos han proporcionado información muy útil. Otro problema adicional es que, hasta la aplicación de las técnicas de estudio molecular al registro paleontológico, el concepto de especie biológica era difícilmente constatable en el registro fósil. Salvo que dispusiésemos de una máquina que nos permitiese viajar en el *tiempo*, resulta imposible comprobar si individuos de especies diferentes que se han extinguido pueden (y han) interactuado sexualmente y si de estos cruces se ha obtenido progenie fértil. Por otra parte, existe muy poca información sobre cuál es la apariencia física de los híbridos y de ahí su dificultad para reconocerlos en el registro fósil.

En el ámbito paleontológico, el concepto de especie utilizado es mucho más pragmático, y este término suele utilizarse como categoría útil en la que agrupamos a aquellos individuos que consideramos que, principalmente por sus características anatómicas (aunque idealmente debiéramos incluir su comportamiento y nicho ecológico), forman un grupo homogéneo y en principio reconocible y distinguible de los individuos de otros grupos. Esta distinción morfológica clara entre los individuos que potencialmente asignamos a una especie, se utiliza como indicador indirecto del aislamiento que ha habido entre esta y otras poblaciones (especies) que, de haberse cruzado de forma sistemática, no habrían conservado su morfología característica. ¿Invalida el hecho de que se hayan producido cruces entre *Homo sapiens* y *Homo neanderthalensis* el hecho de que son especies diferentes? No necesariamente, aunque el debate está servido.

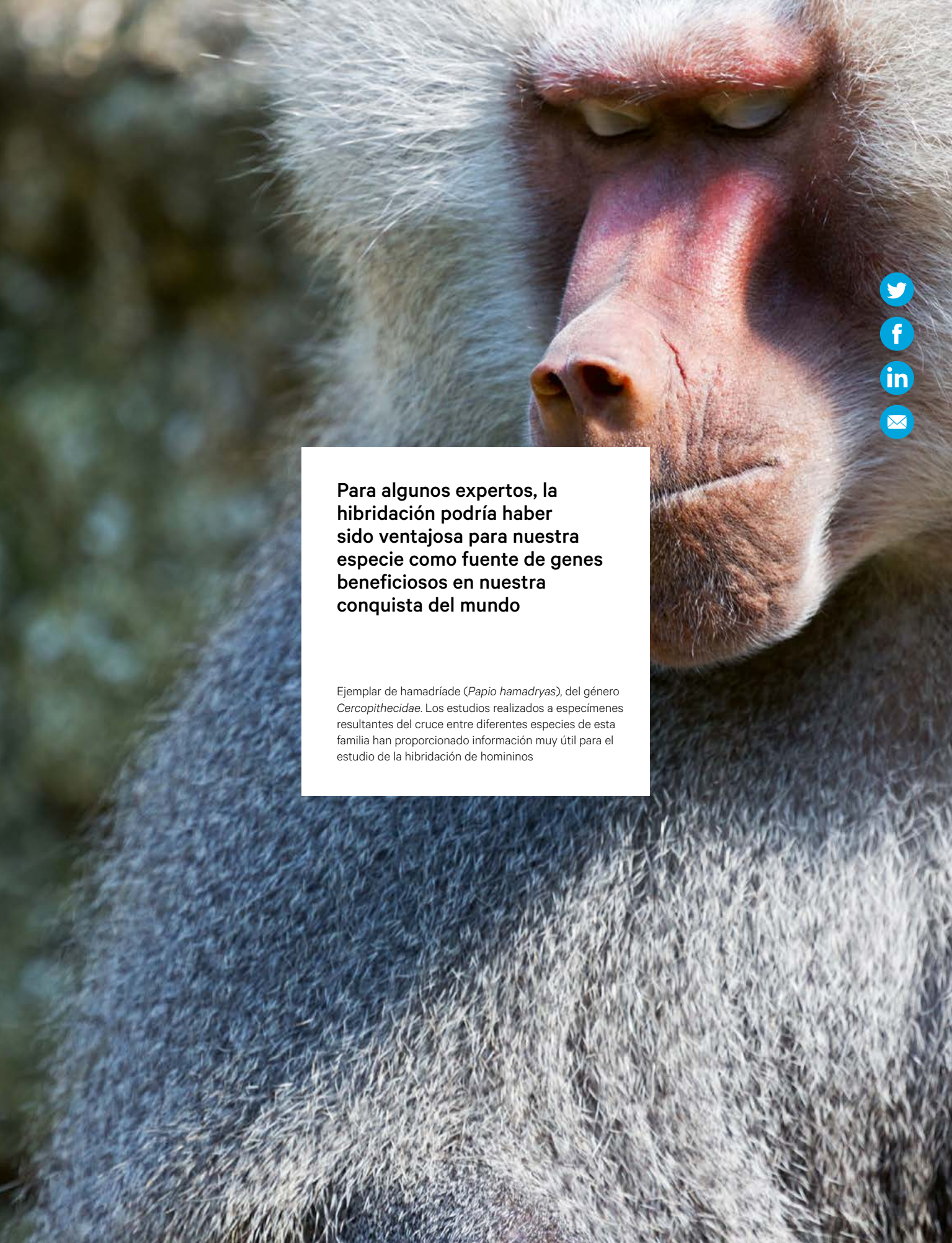
Si bien en la actualidad somos la única especie humana sobre la faz de la tierra, ahora sabemos que no siempre estuvimos solos y que conocimos y tuvimos descendencia con otros humanos que ya no existen pero que han dejado su firma en nuestros genes

Los neandertales son una especie de homínido cuyo origen se remonta a las poblaciones que habitaron Europa hace unos 500.000 años y cuya extinción tuvo lugar hace unos 40.000 años coincidiendo en términos generales con la entrada de los humanos modernos en Europa, razón por la que se plantea que nuestra especie haya jugado algún papel en su extinción. Pocas especies del género *Homo* han levantado más pasiones que los neandertales dada su proximidad a nuestra especie y su fatídico destino. El estudio de los restos esqueléticos y



arqueológicos atribuidos a esta especie permite retratar a un humano con un cerebro de igual tamaño o incluso ligeramente superior al nuestro, con demostradas capacidades intelectuales y físicas, grandes cazadores, pero también expertos conocedores de la utilización de recursos vegetales, no solo como alimento sino por sus propiedades medicinales. Los neandertales también enterraban a sus muertos y utilizaban ornamentos y si bien su expresión simbólica y artística parece menos explosiva que la de los humanos modernos, no difería sustancialmente de los *Homo sapiens* de su tiempo. Un error común en el sempiterno debate sobre la posible «superioridad» cultural de *Homo sapiens* frente al *Homo neanderthalensis* es el anacronismo de comparar la producción artística de estos últimos con la de los humanos modernos actuales, en vez de con los grupos de los que fueron contemporáneos. La reciente datación de pinturas rupestres de varias cuevas españolas en Cantabria, Extremadura y Andalucía, arrojan fechas anteriores a la llegada de los humanos modernos a Europa, dejando así abierta la posibilidad de que hayan sido los neandertales los autores de este tipo de manifestación artística. ¿Siendo por lo tanto tan sofisticados y tan parecidos a nosotros en cuanto a su comportamiento complejo, y sabiendo que ha habido cruces genéticos entre ambas poblaciones, podemos considerarlos especies diferentes? A este debate se suma la noción de que, según estudios genéticos publicados a finales del año 2018 por Viviane Slon y sus colegas, los episodios de hibridación entre neandertales, humanos modernos y denisovanos, habrían sido relativamente *frecuentes*, lo que en principio cuestiona la premisa de la existencia de una barrera (biológica, cultural o geográfica) necesaria para el aislamiento reproductivo entre dos especies supuestamente diferentes.

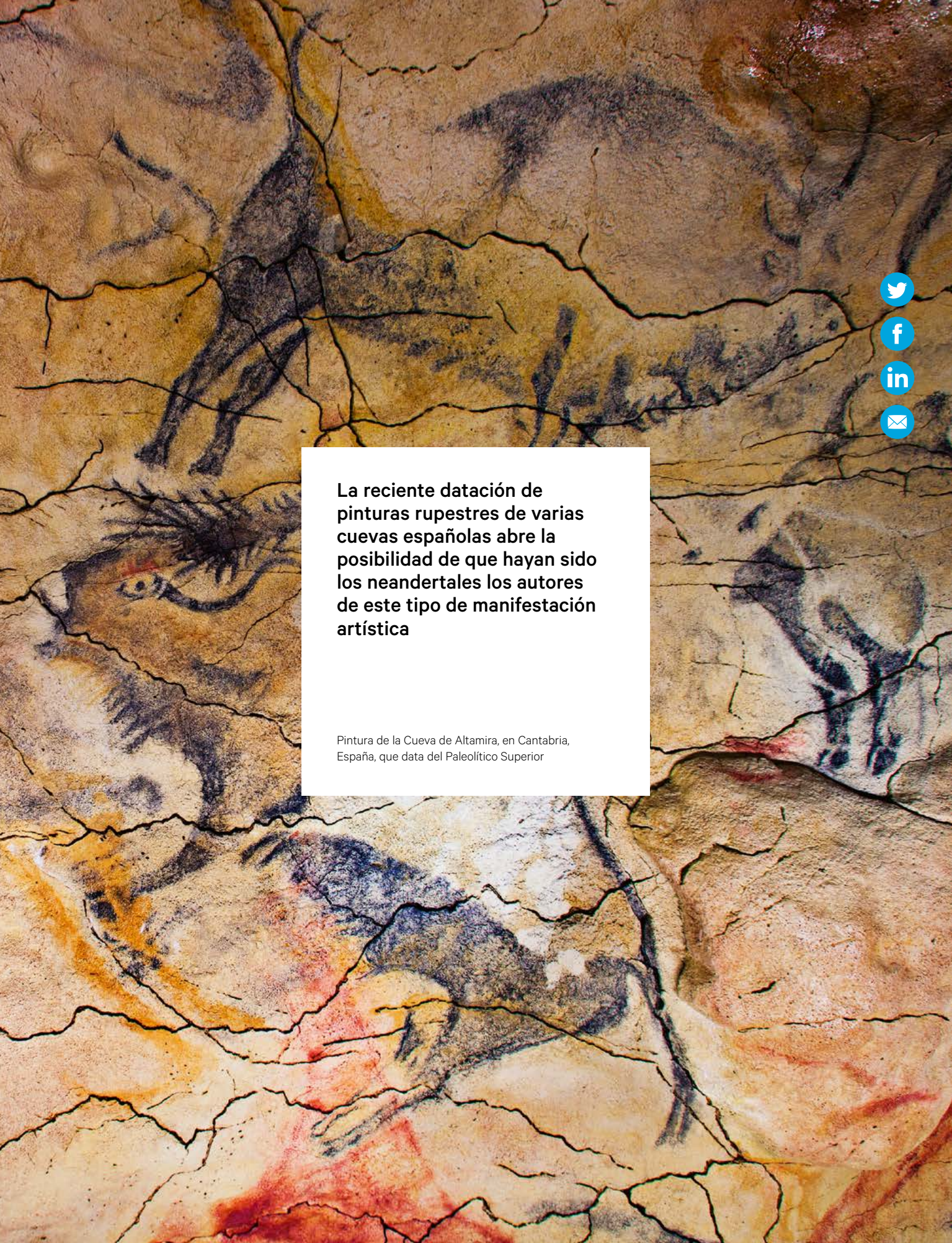
Los datos fósiles y genéticos disponibles en la actualidad, todavía no son suficientes para poder llegar a una conclusión clara. Sin embargo, es importante resaltar que aun cuando hablemos de cruces relativamente *frecuentes* entre individuos de diferentes especies (algo sobre lo que la naturaleza ya nos ha proporcionado ejemplos en especies vivas), esto no significa necesariamente que los cruces sean la norma en la historia biológica y demográfica de ese grupo. Existen determinadas circunstancias que pueden hacer que esos cruces sean más propicios, como periodos en los que una población sufre algún tipo de debilidad demográfica, una porción de esa población, quizá marginal, que encuentra dificultades para procrear dentro de su propio grupo o, principalmente, en zonas de transición ecológica, a caballo entre dos ecosistemas diferentes en los que encontrábamos dos especies con adaptaciones distintas. El propio Ernst Mayr matizó que los mecanismos de aislamiento por los que un linaje estaba separado reproductivamente de otro se referían a las propiedades biológicas de los individuos que prevenían el entrecruzamiento habitual de estas poblaciones, admitiendo que aunque se podían producir cruces ocasionales, el carácter de este intercambio no tenía la entidad suficiente como para considerarse que se había producido la fusión completa entre las dos especies. Y es ahí donde radica el quid de la cuestión. Los neandertales son, probablemente, una de las especies humanas mejor caracterizadas y conocidas de todo el registro fósil. El cráneo bajo y alargado con una protuberancia obvia en su parte posterior («moño occipital»), la proyección característica de su cara alrededor de la región nasal (lo que técnicamente se denomina prognatismo medio-facial) y su marcado reborde óseo en la región de las cejas (toro supraorbitario), son algunas de las características neandertales que, desde su origen hace casi medio millón de años en Europa hasta su extinción, se mantuvieron virtualmente intactas. Si se hubiera producido una mezcla sistemática y habitual entre neandertales y humanos modernos, cabría esperar un «atenuamiento» o modificación de estos patrones. Sin embargo, son precisamente los neandertales tardíos los que presentan las morfologías más típicas y pronunciadas. A esto se añade que, salvo por los datos proporcionados por los análisis genéticos, carecemos de yacimientos en los que se pueda constatar la convivencia de

A close-up, profile view of a baboon's face, showing its eyes, nose, and mouth. The baboon has a reddish-brown face and thick, greyish-brown fur. A white rectangular text box is overlaid on the lower-left portion of the image.

Para algunos expertos, la hibridación podría haber sido ventajosa para nuestra especie como fuente de genes beneficiosos en nuestra conquista del mundo

Ejemplar de hamadriade (*Papio hamadryas*), del género *Cercopithecidae*. Los estudios realizados a especímenes resultantes del cruce entre diferentes especies de esta familia han proporcionado información muy útil para el estudio de la hibridación de homínidos





La reciente datación de pinturas rupestres de varias cuevas españolas abre la posibilidad de que hayan sido los neandertales los autores de este tipo de manifestación artística

Pintura de la Cueva de Altamira, en Cantabria, España, que data del Paleolítico Superior



ambos grupos. Los yacimientos del Monte Carmelo, en Israel, representan el mejor testimonio de la proximidad física entre ambas especies, pero en todos los casos la evidencia de la presencia de uno u otro grupo aparece siempre en niveles intercalados, nunca en el mismo. En contra de lo que reza la expresión popular, neandertales y humanos modernos habrían estado «revueltos, pero no juntos», y aunque se hubieran podido dar cruces ocasionales, esta no fue la norma, ni el hombre actual puede considerarse una fusión de ambos. En este sentido, la hipótesis de que los neandertales se extinguieron porque fueron absorbidos por los humanos modernos perdería fuerza.

Una última apreciación interesante sobre los híbridos entre especies viene de los estudios que investigadores como Rebecca Ackerman y su equipo han realizado en monos babuinos. Es una idea establecida en el imaginario popular, que un híbrido tiene que presentar una morfología intermedia entre las especies parentales, o bien un mosaico, una combinación de rasgos de una y de otra. Sin embargo, Ackerman y sus colegas revelan que, con frecuencia, los híbridos no se parecen «ni a su padre ni a su madre», y en muchos caracteres se producen «novedades morfológicas». Los híbridos suelen presentar un tamaño claramente mayor o menor que sus padres y un número elevado de patologías y anomalías poco frecuentes en las poblaciones originales. Algunas de estas anomalías, como alteraciones en las suturas cráneo-faciales, patologías dentales bilaterales o asimetrías craneales, son sin duda un reflejo de «desajustes» en el desarrollo. Así, aun cuando la hibridación sea posible, el encaje estaría lejos de ser perfecto. Precisamente en el ámbito de la paleogenómica, existen estudios como los de Fernando Méndez y su equipo en los que se plantea la posibilidad de que los humanos modernos hubieran desarrollado un tipo de respuesta inmune contra el cromosoma Y neandertal, de forma que los embarazos de fetos masculinos híbridos, hijos de madre *sapiens* y padre neandertal, terminarían de forma recurrente en abortos naturales. De esta forma, y al tiempo, la preservación de la información genética neandertal se vería amenazada.

Estudios paleogenómicos plantean la posibilidad de que los humanos modernos desarrollaron un tipo de respuesta inmune contra el cromosoma Y neandertal, de forma que los embarazos de fetos masculinos híbridos, hijos de madres *sapiens* y padre neandertal, terminarían de forma recurrente en abortos naturales

En esta línea, podríamos interpretar que si bien la hibridación no fue la causa de la extinción de los neandertales pudo ser un factor coadyuvante en la diezma de esta especie. Lejos del clásico ejemplo de los dinosaurios y la caída de meteoritos, las extinciones en el mundo animal son generalmente procesos lentos, delicados juegos de equilibrio demográfico en los que no hacen falta grandes eventos o catástrofes para que las balanzas se inclinen hacia un lado u otro. Mientras la fertilidad de los neandertales podría haberse visto debilitada con la mezcla, algunos expertos sugieren que de la hibridación con neandertales y denisovanos nuestra especie habría adquirido secuencias genéticas ventajosas para la adaptación a nuevos ambientes cuando abandonamos África, principalmente a través de cambios en el sistema inmune. Así, la hibridación podría haber sido ventajosa para nuestra especie como fuente de genes beneficiosos en nuestra conquista del mundo.



Es necesario seguir investigando para poder ahondar el efecto que el intercambio genético ha tenido en el porvenir de cada una de estas especies. Sin embargo, y aun cuando la hibridación haya podido afectar negativamente a denisovanos y/o neandertales, puesto que son estos los que se han extinguido, la paleogenética sugiere que la interacción de los humanos modernos con las especies extintas no fue necesariamente violenta. Una de las teorías más clásicas que se han planteado para explicar la extinción de los neandertales es la de la confrontación, incluso violenta, entre ambas especies. *Homo sapiens* ha sido descrita como una especie altamente «invasiva» y su paso, como el caballo de Atila, se ha asociado a la extinción de muchas especies de grandes animales (*megafaunal extinction*), incluyendo a los neandertales. Aunque sexo no implique necesariamente amor, el hecho de que conservemos un porcentaje de ADN neandertal en nuestras venas sugiere que alguien se tuvo que preocupar de criar y asegurar la supervivencia de los hijos híbridos, una realidad que quizá nos permite suavizar el estereotipo de un *sapiens* violento y avasallador.

La evidencia «dura» de nuestro origen

No cabe duda de que el avance tecnológico de los últimos años nos lleva al examen de lo pequeño y lo molecular. A la revolución metodológica del análisis genético se suma el nacimiento de la paleoproteómica (estudio de las proteínas antiguas), una disciplina que dará mucho que hablar en la próxima década. Sin embargo, el núcleo duro de la antropología, el corazón, ha sido y lo seguirán siendo los fósiles. Sin fósiles no habrá ADN, ni proteínas, faltará la fuente de evidencia más duradera y más completa de la que se alimenta la paleoantropología. Surgen técnicas de análisis casi futuristas y sin embargo la realidad nos recuerda, literal y figuradamente, que, para poder avanzar en este campo es necesario «tener los pies en la tierra», esa tierra que hay que excavar y de la que saldrán, a golpe de trabajo y caprichosa suerte, los huesos de nuestros antepasados. Falta todavía mucho terreno por conocer. Existen grandes vacíos de fósiles en los mapas, regiones como el oeste africano, el subcontinente indio o la península arábiga de los que apenas se dispone de registro, de forma que los hallazgos en estas zonas son como piezas nuevas que nos obligan a rearmar el puzle. En la última década, antiguos y nuevos fósiles encontrados en Asia están desplazando el epicentro de atención al continente asiático y cabe augurar muchas sorpresas. Incluso en la reconstrucción de la historia de nuestra especie, contada hasta ahora en clave exclusivamente africana, los fósiles hallados en esta última década tienen algo que decir.

Desde el punto de vista fósil, la hipótesis del origen africano de nuestra especie se ha sustentado principalmente en el hallazgo en África de los restos más antiguos que pueden atribuirse a *Homo sapiens*. Entre estos destacan los cráneos de Herto y Omo en Etiopía, datados entre 160 y 180.000 años de antigüedad. Además, en el Oriente Próximo, los yacimientos de Qafzeh y Skhul han proporcionado una colección importante de fósiles también atribuidos a nuestra especie que datan entre 90 y 120.000 años. Sin embargo, según el *Out of Africa*, no era hasta hace unos 50.000 años, cuando nuestra especie era capaz de adentrarse en Europa y Asia por lo que a la presencia de *Homo sapiens* en Israel no se le daba la categoría de dispersión o «salida» propiamente dicha.

Sin embargo, en la última década, un número importante de fósiles cuestionan la fecha de los 50.000. Entre esos fósiles cabe destacar los dientes y mandíbula hallados en Daoxian (Fuyan Cave) y Zhirendong, en el sur de China, o la falange de la mano recuperada en Al-Wusta (Arabia) que sitúan a nuestra especie fuera de África al menos hace 80.000 años, aunque su presencia podría incluso adelantarse a los 100.000. En la misma línea está el hallazgo de un maxilar humano en el yacimiento de Misliya (Israel) que, con una edad en torno a los 190.000



Cráneo de un adulto humano con las vértebras del cuello, de la Sima de los Huesos, del yacimiento de Atapuerca, en Burgos, España, descubierto en 1984. Los dientes, la mandíbula y los huesos faciales parecen neandertales, mientras que el cráneo es primitivo. Esto sugiere que los rasgos característicos de los neandertales evolucionaron de manera separada, un modelo evolutivo conocido como modelo de acreción





años, es tan antiguo como los fósiles más antiguos africanos atribuibles a *Homo sapiens*. Cada vez es más patente que *Homo sapiens* fue capaz de adaptarse a otros territorios antes de lo pensado, si bien este sigue siendo un debate abierto. La evidencia genética, aunque discutida, sigue apuntando a que la humanidad actual proviene principalmente de una dispersión sucedida hace unos 50.000 años. Sin embargo, esto no significa que no hubiera habido otras salidas anteriores de las que quizá no haya quedado huella en los humanos modernos de hoy o quizá no hemos sido capaces de detectar todavía. Constreñidos por la utilización de esquemas con flechas para representar las dispersiones de los humanos en un mapa, olvidamos que las migraciones de los homínidos no son movimientos lineales y direccionales, con un propósito o meta, a modo de marcha o excursión. Las migraciones humanas, como las de cualquier otro animal, deberían representarse como expansiones o ensanchamientos del rango de ocupación de un grupo que, ante la falta de barreras (ecológicas o climáticas, por ejemplo), y en condiciones demográficas favorables, aumenta su territorio de asentamiento. Es probable que el *Out of Africa* no fuese un único evento o viaje sino un flujo más o menos continuo, de caudal variable. Quizá no hubo uno, sino muchos *Out of Africa*, pero también varios *Into Africa*, reentradas que no son técnicamente reentradas, porque los homínidos «no vuelven» como quien vuelve a su hogar, sino que se expanden el diámetro de su territorio siempre que no haya algo que se lo impida.

La evidencia genética, aunque discutida, sigue apuntando a que la humanidad actual proviene principalmente de una dispersión sucedida hace unos 50.000 años

Por último, los hallazgos fósiles del yacimiento de Jebel Irhoud, en Marruecos, con 300.000 años de antigüedad, arrojan nueva luz (¿o más interrogantes?) sobre el origen de nuestra especie. Aunque estos especímenes carecen de algunos de los rasgos que se consideran exclusivos de *Homo sapiens* (como la barbilla, la frente vertical o el cráneo alto y abombado), muchos investigadores los consideran los representantes más antiguos de nuestro linaje. La novedad radica ya no tanto en su antigüedad como en su localización. La mayoría de los fósiles africanos atribuidos a nuestra especie se habían registrado, hasta ahora, en regiones del este o del sur de África, pero no del norte. A raíz de este y otros descubrimientos fósiles en África, está cobrando peso la hipótesis de que nuestro origen no está en una sino en varias poblaciones que llegaron a habitar en regiones muy dispares del extenso continente africano y mantendrían intercambios genéticos intermitentes. *Homo sapiens* habría evolucionado en un patrón más reticulado y menos lineal de lo que se había creído hasta ahora. Esta teoría comienza a conocerse como el «Multirregionalismo africano» y apunta a que, en sus raíces más profundas, *Homo sapiens* era ya una mezcla, un crisol de poblaciones diversas, con una gran variabilidad física y cultural. Curiosamente, el término «multirregionalismo» hace referencia a otra de las grandes teorías que durante el siglo XX se ha esgrimido para explicar el origen de *Homo sapiens*. El «Multirregionalismo», en contra del *Out of Africa*, mantenía que el origen de nuestra especie estaba en la evolución paralela de varios linajes que, en diferentes partes del mundo, daban lugar a *Homo sapiens*. El multirregionalismo también observaba el intercambio genético entre estos grupos paralelos. Sorprendentemente, quién nos lo hubiera dicho, esta década ha sido testigo de cómo dos polos opuestos (*Out of Africa* y Multirregionalismo) han aproximado posiciones.



Tanto los estudios genéticos como la evidencia fósil acumulados durante esta década, nos proporcionan un retrato más diverso, más rico y más dinámico de nuestra propia especie. Desde su origen en África, hasta su hibridación con neandertales y denisovanos, *Homo sapiens* se retrata como un crisol de humanidades. Es posible que muchas de las claves adaptativas de nuestro éxito en la conquista de un territorio más grande y un entorno más cambiante se encuentren, precisamente, en ese mestizaje cosmopolita que nos caracteriza desde hace al menos 200.000 años. Este mestizaje no solo no atentó contra nuestra identidad como especie, sino que es probablemente parte de su sello e idiosincrasia.

La evolución humana incide, precisamente, en que la diversidad, desde el punto de vista biológico, es una ventaja, un equipaje versátil del que la naturaleza puede tirar cuando las circunstancias requieren flexibilidad adaptativa. Las especies endogámicas y homogéneas son más propensas a mutaciones deletéreas y es posible, incluso, que el aislamiento prolongado de los neandertales en Europa, durante las edades de hielo, los haya hecho genéticamente más vulnerables. Parte de la flexibilidad que hoy nos caracteriza nos fue transferida por otros humanos que hoy ya no existen. Somos presente y somos futuro, pero somos también herencia de quien ya no está.

A pesar de ser especies diferentes y probablemente reconocerse como tal, los humanos hibridaron con otras especies hoy extintas, tuvieron descendencia y cuidaron de ella. Es inevitable hacer una reflexión sobre la sociedad actual, particularmente ofuscada en trazar fronteras y marcar límites, entre individuos de la misma especie, que resultan más infranqueables que los que en principio dictaba la biología. Con frecuencia, nuestra cultura y nuestras normas sociales avanzan hacia derroteros que parecen contradecir nuestro legado genético. ¿Cómo trataríamos a otra especie humana hoy en día? ¿Por qué somos la única especie superviviente? ¿Tendríamos sitio, en realidad, para otra humanidad distinta? ¿Espacio para la diferencia? ¿Cuál es nuestro nivel de tolerancia hacia la diversidad biológica y cultural?

Seguimos evolucionando. La selección natural sigue funcionando, pero hemos cambiado las presiones selectivas. Las presiones sociales tienen ahora un peso mayor que las ambientales, es más importante estar bien relacionado que disfrutar de una salud de hierro. Con el surgimiento de las técnicas de edición genética, el hombre disfruta ahora de un «superpoder» que todavía tiene que aprender a controlar. Para ello la sociedad ha de plantearse un debate maduro y consensuado sobre hacia dónde queremos ir, pero ese debate necesita tener en cuenta nuestra propia historia evolutiva, comprender las peculiaridades y las claves del éxito de nuestra especie. Se mire por donde se mire, fue la diversidad y no la uniformidad la que nos hizo fuertes. Más que nunca el ser humano lleva la batuta de su propio destino. Nos hemos convertido en nuestro propio genio de la lámpara. Podemos pedir ahora un deseo sobre nuestro futuro, pero es importante decidir qué queremos pedir. Presumimos de ser una especie inteligente, pero será lo que hagamos a partir de ahora lo que nos permita juzgar nuestra clarividencia. En diez, veinte, en cien años, nuestro pasado hablará de nosotros y será el pasado el que nos dé el verdadero veredicto sobre nuestra inteligencia.

Bibliografía

- Ackermann, R. R.; Mackay, A. y Arnold, L. (2016): «The hybrid origin of “modern” humans», en *Evolutionary Biology*, n.º 43, pp. 1-11.
- Gittelman, R. M.; Schraiber, J. G.; Vernot, B.; Mikacenic, C.; Wurfel, M. M. y Akey, J. M. (2016): «Archaic hominin admixture facilitated adaptation to out-of-Africa environments», en *Current Biology*, n.º 26, pp. 3375-3382.
- Groucutt, H. S.; Grün, R.; Zalmout, I. A. S.; Drake, N. A.; Armitage, S. J.; Candy, I.; Clark-Wilson, R.; Louys, R.; Breeze, P. S.; Duval, M.; Buck, L. T.; Kivell, T. L. [...] y Petraglia, M. D. (2018): «Homo sapiens in Arabia by 85,000 years ago», en *Nature Ecology and Evolution*, n.º 2, pp. 800-809.
- Hershkovitz, I.; Weber, G. W.; Quam, R.; Duval, M.; Grün, R.; Kinsley, L.; Ayalon, A.; Bar-Matthews, M.; Valladas, H.; Mercier, N.; Arsuaga, J. L.; Martínón-Torres, M.; Bermúdez de Castro, J. M. [...] y Fornai, C. (2018): «The earliest modern humans outside Africa», en *Science*, n.º 359, pp. 456-459.
- Hublin, J. J.; Ben-Ncer, A.; Bailey, S. E.; Freidline, S. E.; Neubauer, S.; Skinner, M. M.; Bergmann, I.; Le Cabec, A.; Benazzi, S.; Harvati, K. y Gunz, P. (2017): «New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of *Homo sapiens*», en *Nature*, n.º 546, pp. 289-292.
- Kuhn, Thomas S. (2006): *La estructura de las revoluciones científicas*, Madrid, Fondo de Cultura Económica de España.
- Liu, W.; Martínón-Torres, M.; Cai, Y. J.; Xing, S.; Tong, H. W.; Pei, S. W.; Sier, M. J.; Wu, X. H.; Edwards, L. R.; Cheng, H.; Li, Y. Y.; Yang, X. X.; Bermúdez de Castro, J. M. y Wu, X. J. (2015): «The earliest unequivocally modern humans in Southern China», en *Nature*, n.º 526, pp. 696-699.
- Martínón-Torres, M.; Wu, X.; Bermúdez de Castro, J. M.; Xing, S. y Liu, W. (2017): «*Homo sapiens* in the Eastern Asian Late Pleistocene», en *Current Anthropology*, n.º 58, pp. 434-448.
- Méndez, F. L.; Poznik, G. D.; Castellano, S. y Bustamante, C. D. (2016): «The divergence of Neandertal and modern human Y chromosomes», n.º 98, pp. 728-735.
- Meyer, M.; Arsuaga, J. L.; De Filippo, C.; Nagel, S.; Aximu-Petri, A.; Nickel, B.; Martínez, I.; Gracia, A.; Bermúdez de Castro, J. M.; Carbonell, E.; Viola, B.; Kelso, J.; Prüfer, K. y Pääbo, S. (2016): «Nuclear DNA sequences from the Middle Pleistocene Sima de los Huesos hominins», en *Nature*, n.º 531, pp. 504-507.
- Scerri, E. M. L.; Thomas, M. G.; Manica, A.; Gunz, P.; Stock, J. T.; Stringer, C.; Grove, M.; Groucutt, H. S.; Timmermann, A.; Rightmire, G. P.; d’Errico, F.; Tryon, C. A. [...] Chikhi, L. (2018): «Did our species evolve in subdivided populations across Africa, and why does it matter?», en *Trends in Ecology & Evolution*, n.º 33, pp. 582-594.
- Slon, V.; Mafessoni, F.; Vernot, B.; de Filippo, C.; Grote, S.; Viola, B.; Hadinjak, M.; Peyrégne, S.; Nagel, S.; Brown, S.; Douka, K.; Higham, T.; Kozlikin, M. B.; Shunkov, M. V.; Derevianko, A. P.; Kelso, J.; Meyer, M.; Prüfer, K. y Pääbo, S. (2018): «The genome of the offspring of a Neanderthal mother and a Denisovan father», en *Nature*, n.º 561, pp. 113-116.



Alex Pentland
MIT Media Lab

El profesor Alex «Sandy» Pentland dirige los laboratorios Connection Science y Human Dynamics del MIT. Con anterioridad ayudó a crear y dirigir el Media Lab y el Media Lab Asia, también del MIT, en India. Es uno de los científicos computacionales más citados globalmente y, según Forbes, uno de los «siete científicos especializados en datos más poderosos del mundo». Miembro fundador de los consejos asesores de Google, AT&T, Nissan y del secretario general de la ONU y un emprendedor en serie que ha cofundado más de doce compañías, también es miembro de la Academia de Ingeniería estadounidense y líder en el Foro Económico Mundial. Sus últimos libros publicados son *Social Physics* y *Señales honestas: el lenguaje que gobierna el mundo* (Barcelona, Milrazones, 2010).

Libro recomendado: Pentland, Alex (2015): *Social Physics* [Física social], Nueva York, Penguin Books.

Los datos son la savia de la toma de decisiones y la materia prima de la responsabilidad y la transparencia. Sin datos de alta calidad que proporcionen información correcta sobre las cosas adecuadas en el momento adecuado, el diseño, la supervisión y la evaluación de políticas eficaces es una tarea casi imposible. Hoy contamos con herramientas sin precedentes para informar y transformar la sociedad y proteger el medioambiente. En mi capítulo describo la ciencia social y la arquitectura informática que permitirán usar estos datos de manera segura en la adaptación a un nuevo mundo de información, un mundo más justo, eficiente e inclusivo con más oportunidades que nunca.



Desde un punto de vista personal, esta historia arranca hace más de veinte años, cuando comencé a explorar las posibilidades de la computación ponible. Mi laboratorio contaba con el primer equipo de cibernets del mundo: unos veinte estudiantes que soldaban ordenadores personales con baterías de motocicletas y pequeños láseres que permitirían a una persona enviar imágenes directamente a su ojo. Tratábamos de experimentar con lo que sería el futuro. Para situar nuestro trabajo en su contexto, no hay que olvidar que en 1996 se utilizaban muy pocos teléfonos móviles. Ni siquiera había wifi. Los ordenadores eran unos aparatos enormes y recalentados apoyados en escritorios o en habitaciones con aire acondicionado. Sin embargo, yo tenía claro que terminarían sobre nuestros cuerpos y, con el tiempo, prácticamente en todas partes.

Construimos estos equipos para un grupo de personas y luego hicimos un gran número de experimentos con ellos. Una de las primeras reacciones era siempre: «Es fantástico, pero nunca me lo pondría».

Por tanto, el siguiente paso fue buscar la colaboración de escuelas de diseño. El dibujo incluido a continuación es obra de una escuela de diseño de moda francesa llamada Creapole. Charlé con los alumnos sobre el rumbo de la tecnología y propusieron estos diseños. No deja de ser curioso que, básicamente, crearon una serie de dispositivos muy parecidos a Google Glass y un iPhone incluso en lo referido a detección de huellas digitales.

Es interesante cómo vivir con prototipos tecnológicos te permite visualizar el futuro mejor que usando solo la imaginación. Pero la lección de verdad importante que extrajimos de vivir ese futuro es que se generarían ingentes cantidades de datos. Cuando todo el mundo lleva encima dispositivos, cuando cualquier interacción se mide con sensores digitales y cuando todos los dispositivos dejan un rastro de datos, se obtiene una imagen de la sociedad que era inimaginable hace tan solo unos años. Esta capacidad de observar el comportamiento humano de forma cuantitativa y continua ha dado lugar a una nueva disciplina (según artículos aparecidos en *Nature*¹ y *Science*,² así como en otras revistas científicas destacadas) denominada «ciencias sociales computacionales», que está comenzando a transformar las ciencias sociales tradicionales. Es algo muy similar a cuando los fabricantes de lentes holandeses crearon las primeras lentes aplicadas: los microscopios y los telescopios abrieron perspectivas científicas nuevas y enormes. Hoy, la nueva tecnología de los laboratorios vivos —la observación del comportamiento humano mediante la recogida del rastro digital de una comunidad— comienza a dar a los investigadores una visión más completa de la vida en toda su complejidad. Este es, según mi opinión, el futuro de las ciencias sociales.

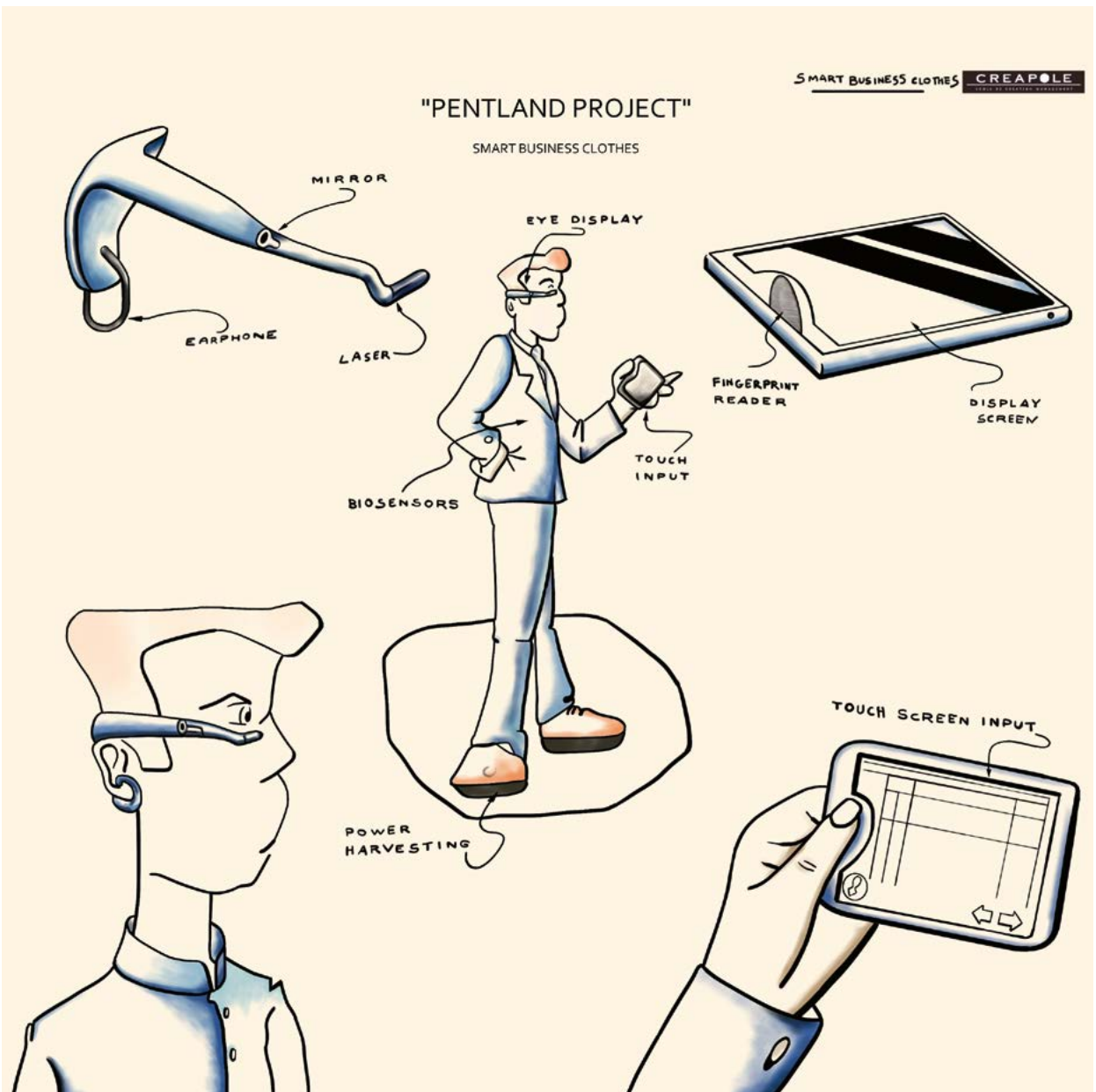
Una nueva comprensión de la naturaleza humana

Es posible que el mayor error cometido por las sociedades occidentales haya sido la concepción del hombre como «individuo racional».

Los fundamentos de la sociedad occidental moderna y de las sociedades ricas de todas partes los establecieron en el siglo XVIII, en Escocia, Adam Smith, John Locke y otros. A esta versión temprana de las ciencias sociales debemos la concepción de los seres humanos como individuos racionales, con «libertad y justicia para todos».³ En la actualidad, esta idea está incorporada a todos los aspectos de nuestra sociedad: utilizamos los mercados, consideramos que la democracia directa es la forma de gobierno ideal y los centros de formación han abandonado las clases magistrales para centrarse en formar alumnos con mejores capacidades analíticas.



Ilustración basada en el dibujo original del diseño de prendas electrónicas, fruto de la colaboración del autor con la escuela de diseño de moda Creapole de París





Pero este modelo individual racional es incorrecto, y no solo en la parte racional, también, lo que es más importante, en la individual. Quienes nos rodean ejercen una fuerte influencia en nuestro comportamiento y, también, como veremos, son la fuente de gran parte de nuestra sabiduría. Nuestra capacidad de prosperar se debe a que aprendemos de las experiencias ajenas. No somos individuos, sino miembros de una especie social. De hecho, la idea del «individuo racional» adoptó su forma actual cuando en la década de 1800 algunos matemáticos intentaron dar sentido a la observación de Adam Smith de que las personas «[...] guiadas por una mano invisible [...] promueven el bienestar de la sociedad y procuran bienes para la multiplicación de la especie».⁴ Este grupo de matemáticos descubrió que la teoría de la mano invisible funcionaba si utilizaban un modelo muy simplificado de la naturaleza humana: las personas actúan movidas únicamente por el beneficio propio (es decir, son «racionales») y actúan solas, de forma independiente de los demás (son «individuos»).

El supuesto que comparten las matemáticas de la mayoría de sistemas económicos y regulatorios es que las personas toman decisiones de forma autónoma y sin influirse las unas a las otras. Esto es falso. Puede ser una buena primera aproximación, pero fracasa porque la influencia de unas personas en otras, entre iguales (*peer to peer*), es la causa de las burbujas financieras y del cambio cultural y, como veremos, es también la fuente de la innovación y el crecimiento.

Además, la idea de «individuos racionales» no es, según Adam Smith, lo que creaba la mano invisible. Antes bien: «Es propio de la naturaleza humana intercambiar no solo bienes, también ideas, ayuda y favores [...] estos intercambios son los que orientan a los hombres en la creación de soluciones para el bien de la comunidad».⁵ Resulta interesante que Karl Marx afirmara algo en la misma línea, en concreto que la sociedad es la suma de todas nuestras relaciones sociales.

Las normas sociales, las soluciones para la sociedad, surgen de la comunicación entre pares, no de los mercados ni tampoco de los individuos. Debemos centrarnos en la interacción entre individuos, no en el talento individual. No obstante, hasta hace poco no disponíamos de los métodos matemáticos adecuados para comprender y modelar estas redes de interacción entre pares. Tampoco teníamos los datos necesarios para demostrar cómo funciona todo. Ahora en cambio tenemos los métodos matemáticos y también los datos.

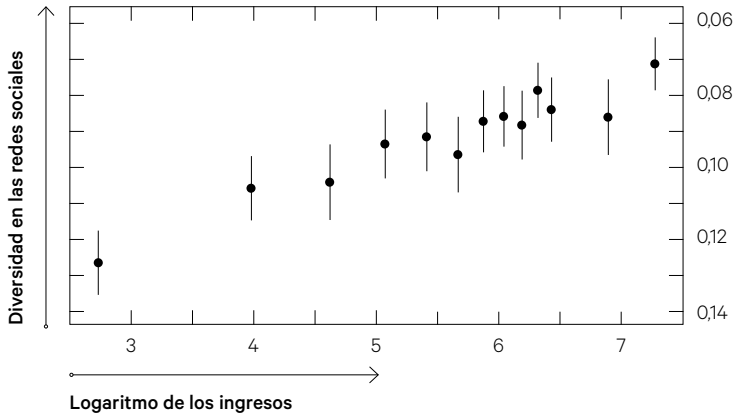
Llegamos, pues, a la pregunta fundamental sobre nosotros mismos: ¿somos de verdad individuos racionales o más bien producto de nuestras redes sociales?

La riqueza llega cuando aparecen nuevas oportunidades Para responder a la pregunta de quiénes somos en realidad, hoy disponemos de datos de una ingente cantidad de personas de casi todas las sociedades del planeta y contamos con potentes técnicas estadísticas. A modo de ejemplo, veamos una muestra de 100.000 personas seleccionadas aleatoriamente en un país de renta media y comparemos su capacidad de enterarse de nuevas oportunidades (medida en términos del grado de apertura de sus redes sociales) con el fin de aumentar sus ingresos.

Encontraremos que aquellas personas con redes sociales más abiertas ganan más dinero. Esto no es una mera distorsión derivada del método empleado para medir su acceso a las oportunidades, ya que se obtiene el mismo resultado analizando la diversidad de empleos de las personas con las que interaccionan, o la diversidad geográfica de las personas con las que interaccionan. Resulta sorprendente que, al comparar individuos que han finalizado la educación primaria con otros sin alfabetizar, la curva se desplaza solo un poquito a la izquierda. Si observamos a los individuos con formación universitaria, la curva se desplaza ligeramente hacia la derecha. La variación relacionada con el nivel educativo es insignificante cuando se la compara con la relacionada con la diversidad de interacción.



Cabe preguntarse si una mayor diversidad en las redes tiene como consecuencia una renta más elevada, o al revés. La respuesta es afirmativa: una mayor diversidad en las redes aumenta la renta media (es la teoría de que los lazos débiles aportan nuevas oportunidades), aunque también es cierto que una renta alta resulta en redes sociales más diversas. No es la imagen convencional que tenemos en la cabeza a la hora de diseñar nuestras sociedades y nuestras políticas.



A medida que las personas interaccionan con comunidades más diversas, sus ingresos aumentan (100.000 individuos seleccionados aleatoriamente en un país de renta media) (Jahani *et al.*, 2017)

En las sociedades occidentales, por lo general, asumimos que los rasgos individuales pesan más que los relativos a las redes sociales. Aunque es una suposición equivocada, es cierto que influye en nuestra manera de abordar muchas cosas. Pensemos, por ejemplo, en cómo diseñamos nuestras escuelas y universidades. El grupo de investigación que dirijo ha colaborado con universidades en varios países y medido sus patrones de interacción social. Hemos encontrado que las conexiones sociales predicen el rendimiento académico muchísimo mejor que la personalidad, los patrones de estudio, la formación previa, las notas o cualquier otro aspecto individual. El rendimiento en el centro educativo, en los exámenes, guarda más relación con la comunidad de interacciones del estudiante que con otras cuestiones que antes asumíamos que eran importantes por influencia del modelo de «individuo racional». Es asombroso.

Es más apropiado pensar en los seres humanos como una especie embarcada en una búsqueda continua de nuevas oportunidades, de nuevas ideas, y que sus redes sociales son un recurso importante, quizá el principal, para encontrarlas. La conclusión es que los seres humanos somos como cualquier otra especie social. Nuestras vidas son un equilibrio entre los hábitos que nos permiten ganarnos la vida explotando nuestro entorno y la exploración en busca de nuevas oportunidades.

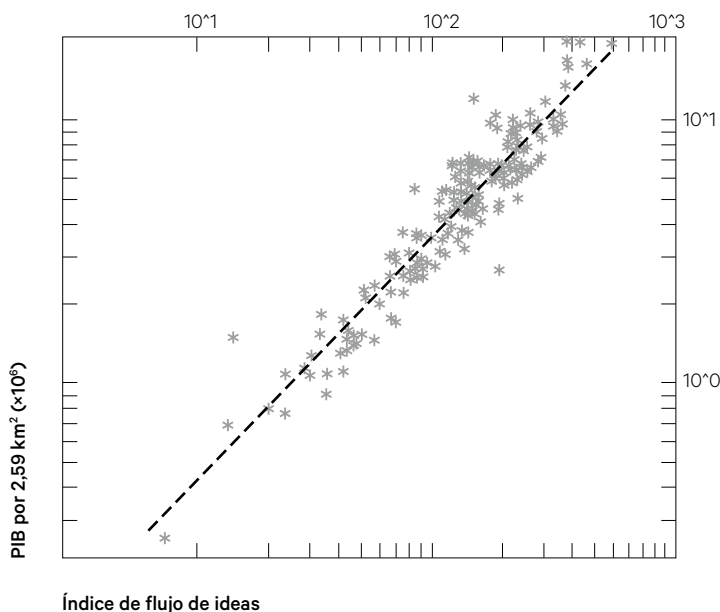
En la literatura etológica esto se conoce como *conducta de forrajeo*. Por ejemplo, si observamos a los conejos, veremos que salen de sus madrigueras, van a comer bayas y vuelven a la madriguera cada día a la misma hora, excepto aquellos que se dedican a explorar el terreno en busca de otros arbustos con frutos. Existe una tensión entre la tarea de explorar, en caso de que las bayas del arbusto se acaben, y el comerse las que hay mientras duren.



En la vida diaria de las personas ocurre lo mismo. Tras examinar los datos de 100 millones de estadounidenses, comprobamos que las personas son asombrosamente predecibles. Si sé lo que una persona cualquiera hace por la mañana, puedo pronosticar, con más del 90% de probabilidades de acertar, lo que hará por la tarde y con quién. Claro que en ocasiones las personas se saltan los hábitos y salen a explorar sitios y personas que visitan solo de forma esporádica, y este comportamiento resulta extremadamente imprevisible.

Pero hay más: Los individuos que no muestran estos patrones de comportamiento suelen estar enfermos o sufren alguna clase de estrés. Es posible saber si una persona lleva, en términos generales, una vida saludable mental y físicamente en función de si sigue o no este ritmo biológico básico. De hecho, esta tendencia es tan habitual, que uno de los mayores servicios sanitarios de Estados Unidos la usa para dar seguimiento a pacientes de riesgo.

Si combinamos esta idea de la búsqueda de la novedad con la de que la diversidad de las redes de contactos trae consigo mayores oportunidades e ingresos, cabría esperar que las ciudades que facilitan estar en contacto con mayor número de personas fueran más prósperas. Para comprobarlo, reunimos datos de 150 ciudades de Estados Unidos y de 150 ciudades de la Unión Europea y analizamos los patrones de las interacciones físicas entre sus habitantes.



A medida que la comunicación cara a cara dentro de una comunidad permite la interacción entre comunidades más diversas, la riqueza de la ciudad aumenta. Datos procedentes de 150 ciudades de Estados Unidos y de 150 ciudades de la Unión Europea (Pan *et al.*, 2013)

* Datos - - - Nuestro modelo



Si la ciudad donde vivimos facilita interacciones más variadas, es probable que tengamos mayor diversidad de oportunidades y que, a largo plazo, ganemos más dinero. Como se puede apreciar en el gráfico anterior, este modelo predice el PIB por kilómetro cuadrado de forma muy precisa tanto en Estados Unidos como en la Unión Europea. El gráfico refleja que aquellos factores que solemos considerar —la inversión, la educación, las infraestructuras, las instituciones— pueden ser accesorios. En lugar de formar parte del núcleo del crecimiento y la innovación, su importancia se limita al hecho de que pueden suponer una ayuda o un obstáculo para la búsqueda de nuevas oportunidades. El principal motor del progreso de las sociedades podría ser la búsqueda de nuevas oportunidades y de nuevas ideas... y no las capacidades personales o la inversión de capital.

En suma: esta nueva visión del comportamiento humano usando las ciencias sociales computacionales, así como de la sociedad en términos de redes de contactos, búsqueda de nuevas oportunidades e intercambio de ideas debería denominarse «física social», un nombre acuñado hace dos siglos por Auguste Comte, creador de la sociología. Su concepto se basaba en que ciertas ideas determinan periódicamente el desarrollo de la sociedad. Aunque en muchos aspectos sus teorías son demasiado simplistas, los recientes avances de las ciencias sociales computacionales demuestran que apuntaban en la dirección correcta. El *flujo* de ideas y de oportunidades entre personas es lo que impulsa a la sociedad y arroja resultados cuantitativos a escalas que van desde pequeños grupos a empresas, ciudades e incluso hasta países enteros.

Optimización de oportunidades Una vez que nos comprendemos mejor a nosotros mismos, podemos construir sociedades mejores. Si la búsqueda de nuevas oportunidades e ideas está en el corazón del progreso humano, deberíamos preguntarnos cuál es la mejor manera de llevar a cabo esa búsqueda. Para explicar la optimización de oportunidades recurriré a la ciencia de la inversión financiera, que proporciona ejemplos claros, simples y bien planteados sobre la solución de compromiso entre explotar oportunidades conocidas y buscar otras nuevas.

En concreto, me centraré en el análisis de carteras con métodos estadísticos bayesianos. Estos métodos se utilizan para seleccionar una de entre varias alternativas cuando el beneficio potencial es desconocido o incierto (Thompson, 1933). Muchos de los fondos de cobertura y organizaciones de comercio minorista más prósperos utilizan este método para su gestión global. La idea fundamental asociada a estos métodos de análisis es que cuando quienes toman las decisiones se enfrentan a una amplia gama de actuaciones alternativas, cada una de ellas con una recompensa desconocida, tienen que escoger algunas para averiguar cuáles obtienen mejores resultados, y al mismo tiempo explotar las que en ese momento se consideran mejores para seguir siendo competitivos. Es la misma idea de los animales que salen en busca de alimento, o de las personas que buscan nuevas oportunidades mientras trabajan para ganarse la vida.

En un entorno social, la recompensa de cada actuación potencial puede deducirse de forma fácil y barata observando las recompensas que obtienen otros miembros de la red de quien toma la decisión. Este uso del aprendizaje social mejora drásticamente el rendimiento global y reduce la carga cognitiva de los participantes. La capacidad de comunicarse y observar de forma rápida otras decisiones en toda la red social es uno de los aspectos clave del aprendizaje social óptimo y de la exploración de oportunidades.

A modo de ejemplo, mi equipo de investigación examinó hace poco cómo se maximiza el intercambio de información estratégica dentro de una red social de operaciones bursátiles en la que los miembros pueden observar las estrategias que usan otros miembros, debatirlas y copiarlas. Analizamos 5,8 millones de transacciones y descubrimos que todos los grupos de agentes bursátiles con mejores resultados seguían una versión de la estrategia de aprendizaje social llamada «muestreo distribuido de Thompson». Se calculó que las previsiones de los

grupos que seguían la fórmula de muestreo distribuido de Thompson se imponían a las mejores previsiones individuales por un margen de casi el 30%. Además, cuando se compararon los resultados de estos grupos con los obtenidos mediante técnicas de inteligencia artificial (IA) convencionales, ¡se comprobó que incluso las superaban!



El uso del aprendizaje social mejora drásticamente el rendimiento global y reduce la carga cognitiva de los participantes. La capacidad de comunicarse y observar de forma rápida otras decisiones en toda la red social es uno de los aspectos clave del aprendizaje social óptimo y de la exploración de oportunidades

Es importante subrayar que este enfoque es cualitativamente idéntico al utilizado por Amazon para configurar su cartera de productos, así como sus servicios de entrega. Los mejores fondos de cobertura financieros también adoptan un enfoque muy similar. La planificación dinámica e intercalada, la recopilación de información, la evaluación y la selección de actuaciones derivan en una organización poderosamente optimizada.

El enfoque del aprendizaje social posee una ventaja adicional que es exclusiva y fundamental para las especies sociales: las personas actúan movidas por el interés propio y también por el de los miembros de su red social. Además, se da una confluencia visible y lógica entre los incentivos de los individuos y los de la organización. Esto significa que para los individuos es fácil, en términos tanto de incentivos como de carga cognitiva, actuar en beneficio de la sociedad: las recompensas óptimas a nivel personal y social coinciden, y los individuos aprenden cuál es el comportamiento óptimo con solo observar a los demás.

Puentes sociales en las ciudades: sendas de oportunidad

Las ciudades son un gran ejemplo de cómo el proceso de búsqueda de nuevas oportunidades conforma las sociedades humanas. Las ciudades son los mayores centros productivos de la sociedad y, como ya hemos visto, allí donde hay más nuevas oportunidades, también hay mayor riqueza. El principal motor del crecimiento económico a largo plazo es la innovación, y las ciudades facilitan la interacción entre seres humanos y el intercambio de ideas necesario para la generación de buenas ideas y nuevas oportunidades.

Estas nuevas oportunidades e ideas van desde los cambios en los medios de producción o tipos de productos hasta las noticias de máxima actualidad. Por ejemplo, el éxito en Wall Street a menudo depende de enterarse de determinados acontecimientos minutos antes que los demás. En este entorno, las ventajas informativas de la proximidad espacial extrema llegan a ser muy grandes. Esto puede explicar por qué sigue Wall Street situado en una minúscula superficie de un extremo de Manhattan. La concentración espacial de actores económicos aumenta la productividad a nivel empresarial al aumentar el flujo de nuevas ideas, dentro de una misma empresa y entre unas empresas y otras.

Nuestras investigaciones sugieren que poner en contacto a personas de diversas comunidades sería la mejor forma de construir una ciudad vibrante y próspera. Cuando examinamos los flujos de personas en ciudades reales, sin embargo, descubrimos que el nivel de



interrelación es menor de lo que pensamos. Los habitantes de un vecindario trabajan, por lo general, con habitantes de, a lo sumo, otro par de vecindarios y compran también en un número limitado de zonas.

La interacción física se limita en su mayor parte a un número relativamente pequeño de *puentes sociales* entre vecindarios. Quizá no deba sorprendernos que personas que pasan parte de su tiempo juntas, ya sea trabajando o disfrutando de su ocio, aprendan las unas de las otras y adopten conductas muy similares. Cuando voy a trabajar o a una tienda, es posible que me encuentre con alguien que lleva un nuevo modelo de zapatos, y piense: «Vaya, qué bonitos son. A lo mejor me compro unos iguales». O, quizá, si voy a mi restaurante habitual y alguien que está en una mesa cercana pide un plato distinto, piense: «Qué buena pinta tiene. Me lo voy a pedir la próxima vez». Cuando las personas pasan tiempo juntas comienzan a imitarse, aprenden las unas de las otras y adoptan comportamientos y actitudes similares.

De hecho, hemos visto que hay muchos comportamientos —como comprar ropa, usar las tarjetas de crédito— e incluso hábitos asociados a enfermedades (como la diabetes o el alcoholismo) que fluyen en su mayor parte dentro de grupos conectados por puentes sociales y no están tan determinados por las fronteras demográficas. En un estudio reciente realizado en una gran ciudad europea, por ejemplo, se descubrió que los puentes sociales eran el 300% más efectivos a la hora de predecir el comportamiento de las personas que los datos demográficos, incluidos la edad, el género, los ingresos y el nivel educativo.

Grupos de vecindarios unidos por ricos puentes sociales forman culturas locales. En consecuencia, los lugares que frecuenta una persona dicen mucho de ella. Esto es muy importante tanto en términos políticos como de *marketing*. El proceso de aprendizaje que se produce al pasar tiempo con alguien significa que las ideas y los comportamientos tienden a propagarse en gran medida dentro de un grupo, pero no fuera de él. Un nuevo modelo de calzado, un nuevo estilo de música, un punto de vista político se propagarán dentro de un conglomerado de vecindarios unidos por puentes sociales, pero tenderán a no traspasar las fronteras de ese círculo. Los anunciantes y los políticos aficionados hablan de cómo los *influencers* cambian las opiniones de la gente. Yo creo que es más una cuestión de puentes sociales, de personas que pasan tiempo juntas, que se ven e interactúan lo que determina la manera en que se propagan las ideas.

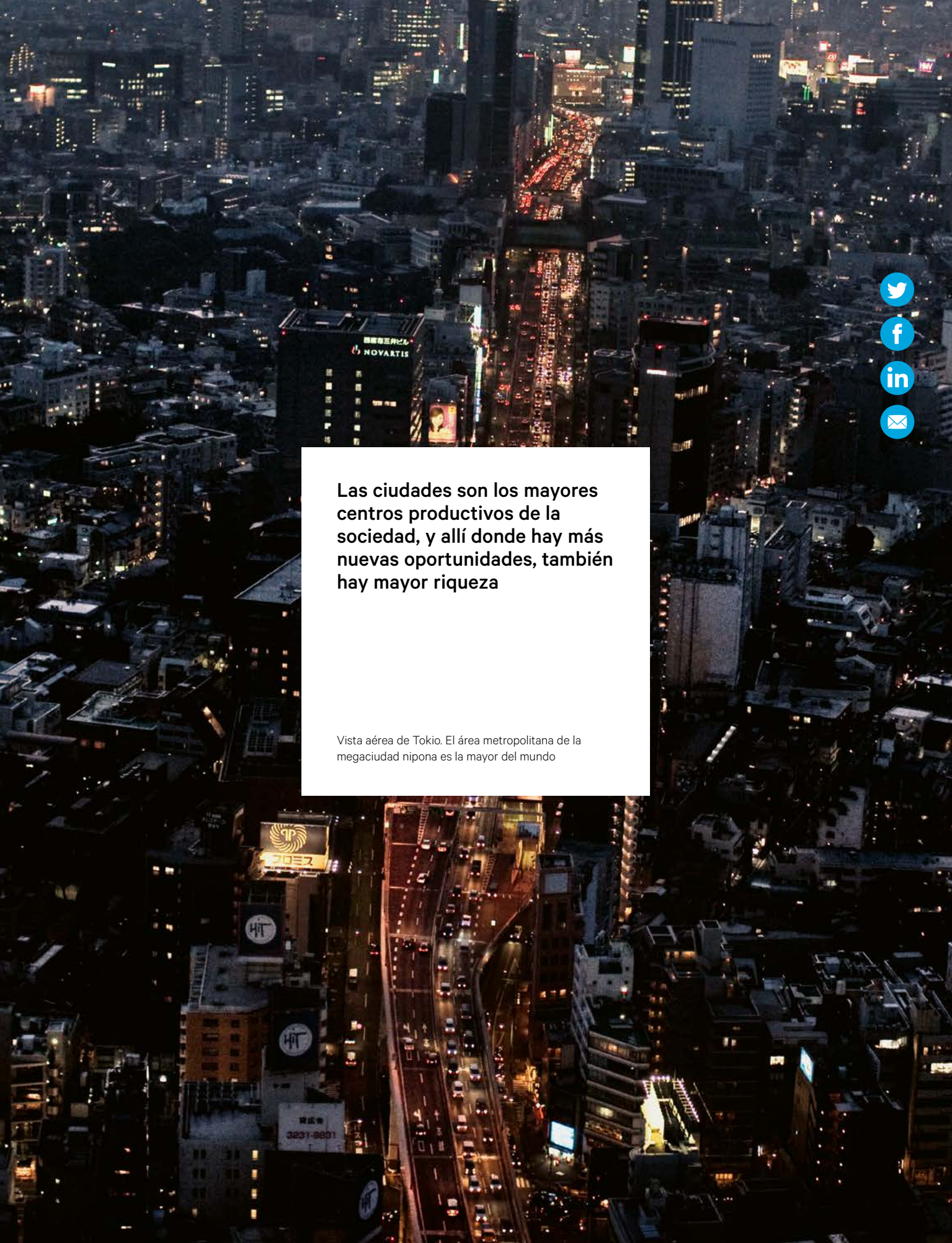
El principal motor del crecimiento económico a largo plazo es la innovación, y las ciudades facilitan el intercambio necesario para la generación de buenas ideas y nuevas oportunidades

En suma: Lo que afirmaba Adam Smith sobre el intercambio de ideas entre personas, es decir, que los intercambios entre iguales son los que determinan las normas y los comportamientos, no puede ser más cierto. Pero lo verdaderamente fascinante es que al aferrarnos al modelo del «individuo racional» para explicar la naturaleza humana, asumimos que aquello que mejor describe las preferencias son las variables demográficas individuales: edad, nivel de renta, género, etnia, nivel educativo, etcétera. Hay que pensar en la sociedad en clave de grupos de comportamiento. ¿Con quiénes se asocian? ¿Qué hacen esas otras personas? El concepto de puentes sociales es mucho más poderoso que los datos demográficos, porque los puentes sociales son el mecanismo más potente que tienen las personas de influirse unas a otras. Comprendiéndolos podremos comenzar a construir una sociedad más inteligente y armónica.



Los puentes sociales son el 300% más efectivos que los datos demográficos a la hora de predecir el comportamiento de las personas

La *influencer* Susie Bubble (dcha.) antes del desfile de Louis Vuitton, en la Paris Fashion Week Womenswear Primavera/Verano 2019



Las ciudades son los mayores centros productivos de la sociedad, y allí donde hay más nuevas oportunidades, también hay mayor riqueza

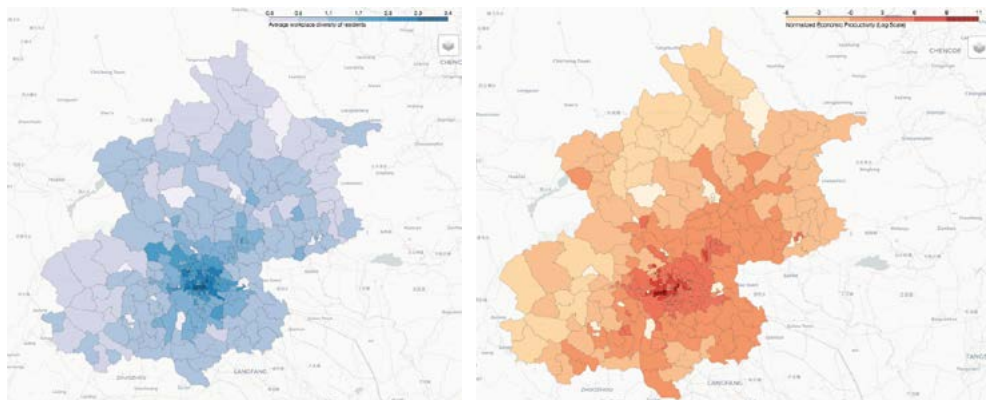
Vista aérea de Tokio. El área metropolitana de la megaciudad nipona es la mayor del mundo





Diversidad y productividad A pesar del drástico aumento de las comunicaciones digitales remotas en la era moderna, la interacción física entre las personas sigue siendo el medio fundamental para el intercambio de información. Estas interacciones sociales incluyen el aprendizaje social a través de la observación (por ejemplo, qué ropa vestir o qué plato pedir) y a través de interacciones intermediarias (por ejemplo, el boca a boca o los amigos comunes). Con el propósito de deducir las interacciones entre las personas, primero dibujamos una red de interacciones basada en la proximidad entre individuos. Se ha demostrado que la proximidad física aumenta la probabilidad de conversaciones cara a cara, y este aumento de la intensidad de las interacciones se suele utilizar como guía para la planificación de las ciudades y la ubicación de los servicios.

Según la idea de puentes sociales, se puede asignar a los individuos a una comunidad determinada por dónde viven, trabajan y compran. El lugar en el que invierten su recurso más valioso, el tiempo, revela sus preferencias. Cada comunidad suele tener acceso a diferentes fuentes de información, oportunidades u ofertas, o bien ofrece perspectivas distintas. Las diversas interacciones deberían, por tanto, aumentar el acceso de la población a las oportunidades e ideas necesarias para la actividad productiva.



Diversidad de las interacciones (izq.) y crecimiento económico futuro (dcha.) en la ciudad de Pekín; como se ve, los dos factores están altamente correlacionados (Chong, Bahrami y Pentland, 2018)

Cuando se aplica esta lógica a las ciudades de Estados Unidos, Asia y Europa, encontramos que este tipo de diversidad de interacciones tiene un efecto comparable al de un aumento de la población. En otras palabras, el número de individuos en una región no es el único factor que predice el crecimiento económico, también influye el flujo de ideas a través de los puentes sociales que los conectan. Si comparamos el poder explicativo de la diversidad de interacción con otras variables tales como el promedio de edad o el porcentaje de residentes con estudios superiores, descubrimos que estas medidas tradicionales son mucho más débiles a la hora de explicar el crecimiento económico que la diversidad de los puentes sociales. Esto significa que es posible que los modelos y sistemas civiles que contemplan solo factores como la población y la educación estén pasando por alto efectos fundamentales.



En 2014, un grupo formado por científicos especialistas en *big data* (yo entre ellos), representantes de empresas de *big data* y directores de las oficinas nacionales de estadística de varios países del norte y del sur del planeta se reunió en la sede de las Naciones Unidas y planeó una revolución. Propusimos que todos los países del mundo midieran la pobreza, la desigualdad, la injusticia y la sostenibilidad de manera científica, transparente, comparativa y responsable. Para nuestra sorpresa, dicha propuesta fue aceptada en 2015 por la Asamblea General de la ONU como parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Dicho acuerdo, en apariencia inofensivo, se conoce en el seno de las Naciones Unidas como la Revolución de los Datos, porque por primera vez existe el compromiso internacional de descubrir y decir la verdad sobre la situación de la familia humana en su totalidad. Desde el inicio de los tiempos, la mayoría de las personas han permanecido aisladas, invisibles para los gobiernos y sin recibir ni aportar información en los ámbitos de la salud, la justicia, la educación o las políticas para el desarrollo. Pero en la última década la situación ha cambiado. Tal y como dice el informe de las Naciones Unidas sobre la Revolución de los Datos, titulado *A World That Counts* [Un mundo que cuenta]:

Los datos son el alma del proceso de adopción de decisiones y la materia prima para la rendición de cuentas. Sin datos de alta calidad que proporcionen información exacta sobre las cuestiones adecuadas en el momento oportuno, el diseño, el seguimiento y la evaluación de políticas efectivas son tareas casi imposibles. Las nuevas tecnologías están dando lugar a un aumento exponencial del volumen y los tipos de datos disponibles, creando posibilidades sin precedentes para informar a la sociedad, transformarla y proteger el medio ambiente. Los gobiernos, las empresas, los investigadores y los grupos de ciudadanos están en pleno proceso de experimentación, innovación y adaptación al nuevo mundo de los datos; un mundo en el que el volumen, el nivel de detalle y la velocidad de los datos son mayores que nunca. Es la revolución de los datos.⁶

En concreto, la inmensa mayoría de la humanidad dispone hoy en día de una conexión digital de doble vía que puede enviar datos de voz, de texto y, más recientemente, imágenes y datos digitales, porque las redes de telefonía móvil llegan a casi todos los rincones del planeta. De la noche a la mañana, la información se ha convertido en algo potencialmente a disposición de todos. La revolución de los datos combina esta corriente nueva e ingente de datos sobre la vida y el comportamiento humano con fuentes de información tradicionales, haciendo posible una nueva ciencia de la «física social» que nos permitirá detectar y realizar un seguimiento de los cambios que experimenta la humanidad, así como realizar intervenciones precisas y no convencionales de ayuda al desarrollo.

¿Por qué creer que de verdad pueda surgir algo de la promesa de la Asamblea General de las Naciones Unidas de que las Oficinas Nacionales de Estadística de los Estados miembros medirán el desarrollo humano de forma abierta, uniforme y científica? No porque confiemos que la ONU consiga gestionar o financiar el proceso de medición, sino porque los donantes internacionales para el desarrollo están por fin exigiendo datos científicos sólidos para orientar la ayuda en dólares y las relaciones comerciales.

A esto hay que añadir que, una vez que los datos fiables sobre el desarrollo comiencen a convertirse en algo habitual en el mundo de los negocios, es de esperar que las cadenas de suministro y la inversión privada empiecen a prestarles atención. Una nación con indicadores deficientes en materia de justicia o desigualdad también suele registrar altos niveles de corrupción, y una nación con un historial de pobreza o de falta de sostenibilidad también suele carecer de estabilidad económica. En consecuencia, las naciones con malos indicadores de desarrollo resultan menos atractivas para la inversión que las naciones con costes similares pero mejores cifras de desarrollo humano.



¿Cómo vamos a hacer posible esta revolución de los datos y aportar transparencia y responsabilidad a los gobiernos en todo el mundo?

La clave es la disponibilidad de datos fiables, sólidos y uniformes sobre la condición humana. Con este fin hemos realizado una serie de experimentos a escala nacional que han demostrado que se trata de un objetivo realista. Por ejemplo, los experimentos en el marco del proyecto Datos para el Desarrollo (D4D), en cuya puesta en marcha en Costa de Marfil y Senegal colaboré personalmente y en los que participaron centenares de grupos de investigación de todo el mundo, han demostrado que los datos procedentes de satélites, de telefonía móvil, sobre transacciones financieras y movilidad humana pueden usarse para medir los objetivos de desarrollo sostenible de manera fiable y barata. Estas nuevas fuentes de datos no reemplazarán a los datos censales obtenidos mediante encuestas tradicionales; antes bien permitirán que estos últimos, tan caros de obtener, puedan completarse de forma rápida en términos de alcance, granularidad y frecuencia.⁷

Pero ¿qué ocurre con la privacidad? ¿Y esto no concentrará demasiado poder en las manos de unos pocos? Para abordar estas inquietudes, en 2007 propuse un «*new deal* para los datos» que diera a los ciudadanos el control de su información personal y creara además un condominio de datos para mejorar la industria pública y privada (ver http://hd.media.mit.edu/wef_globalit.pdf). Esta iniciativa me llevó a codirigir un grupo de debate del Foro Económico Mundial que consiguió explorar de forma productiva los riesgos, recompensas y soluciones para los problemas relativos a los *big data*. Las investigaciones y experimentos que dirigí para apoyar el debate dieron forma en gran medida a la Ley Federal de Protección de la Privacidad del Consumidor de Estados Unidos, el Reglamento General de Protección de Datos de la Unión Europea y ahora están ayudando a China a diseñar sus políticas de protección de datos. Aunque la privacidad y la concentración de poder siempre serán motivo de preocupación, como veremos a continuación contamos con una serie de soluciones producto de una combinación de tecnologías convencionales (por ejemplo, el «algoritmo abierto» descrito con anterioridad) y de políticas (por ejemplo, datos abiertos que incluyen datos agregados, con baja granularidad procedentes de las empresas).

Experimentos de D4D demuestran que datos procedentes de satélites y telefonía móvil sobre transacciones financieras y movilidad humana miden objetivos de desarrollo sostenible de manera fiable y barata

En línea con el nuevo horizonte de posibilidades hecho posible por estos experimentos académicos y por los debates del Foro Económico Mundial, en la actualidad estamos desarrollando una serie de pruebas piloto a escala nacional usando la arquitectura de datos del proyecto Algoritmos Abiertos (OPAL) en Senegal y Colombia, con el apoyo de Orange S.A., el Banco Mundial, Paris21, el Foro Económico Mundial y la Agence Française de Développement, entre otros. El proyecto OPAL, desarrollado en su origen como un proyecto de fuente abierta por el grupo de investigación que dirijo en el MIT (ver <http://trust.mit.edu>), se está utilizando como una plataforma sociotecnológica de múltiples socios dirigida por la Data-Pop Alliance, el Imperial College de Londres, MIT Media Lab, Orange S.A. y el Foro Económico



Cámaras de seguridad en el edificio Paul-Loebe-Haus, que acoge a los miembros del Bundestag y es sede de la Comisión Europea. Berlín, Alemania, abril de 2018





Mundial, y que aspira a abrir y utilizar de forma efectiva los datos del sector privado para fines públicos (ver <http://opalproject.org>). El proyecto surgió de la constatación de que el acceso a los datos propiedad de las empresas privadas (por ejemplo, los datos de llamadas recogidos por las compañías telefónicas, los datos sobre las transacciones de las tarjetas de crédito recogidos por los bancos, etcétera) para fines políticos y de investigación exigía un enfoque que fuera más allá de los datos *ad hoc* o los acuerdos de confidencialidad. Este tipo de compromisos no bastan para reducir ni abordar algunos de los retos clave relativos a la privacidad, la responsabilidad, etcétera.

El proyecto OPAL reúne a las partes interesadas para establecer qué tipo de datos —públicos o privados— deberían ser accesibles y quién pueden utilizarlos y para qué fines. En este sentido, OPAL aporta una nueva dimensión y un nuevo instrumento a la noción del «contrato social», en concreto la visión de que las obligaciones morales o políticas de las personas dependen de un acuerdo que han suscrito para conformar la sociedad en la que viven. De hecho, proporciona un foro y un mecanismo para decidir qué niveles de transparencia y de responsabilidad son recomendables para la sociedad en su conjunto. Además constituye un mecanismo natural para desarrollar políticas basadas en la evidencia y realizar un seguimiento continuo de las distintas dimensiones del bienestar social, ofreciendo así la posibilidad de una ciencia de políticas públicas más exhaustiva y eficaz.

En la actualidad, OPAL se está implementando en una serie de proyectos piloto en Senegal y Colombia, donde ha recibido el respaldo y la ayuda de sus correspondientes Oficinas Nacionales de Estadística, así como de los principales operadores de telefonía nacionales. El compromiso y el empoderamiento local serán clave para el desarrollo de OPAL: las necesidades, la retroalimentación y las prioridades han sido recogidas e identificadas a través de una serie de talleres y debates locales, y sus resultados se utilizarán para informar el diseño de futuros algoritmos. Estos algoritmos serán totalmente abiertos, y por tanto estarán sujetos al escrutinio y a la rectificación pública. Se está creando un consejo asesor nacional para proporcionar orientación y supervisar el proyecto. Además se organizarán debates y talleres de formación para impulsar la puesta en práctica y difusión del proyecto, así como la participación local. Iniciativas como OPAL tienen el potencial de facilitar la elaboración de políticas públicas y una gobernanza basadas en los datos más humanistas, responsables y transparentes.

En mi opinión, el proyecto OPAL es una aportación clave a la Revolución de los Datos de las Naciones Unidas. Está desarrollando y testando un sistema práctico que garantice que todas y cada una de las personas cuentan, que se escuchen sus voces, se atiendan sus necesidades y que puedan desarrollar su potencial a la vez que se respetan sus derechos.

Sistemas cívicos más inteligentes Usando el tipo de datos generados por el proyecto OPAL, investigadores en ciencias sociales computacionales (CSC) han demostrado que Jane Jacobs, la famosa visionaria y activista del urbanismo del siglo XX, estaba en lo cierto: las ciudades son motores de innovación, impulsados por la interacción de comunidades diversas. La pregunta, pues, es cómo sacar el mejor partido a esta innovación. En la actualidad utilizamos los mercados y a las fuerzas del mercado para distinguir entre las buenas y las malas ideas, y para desarrollar las buenas.

Sin embargo, tal y como han demostrado las CSC, los mercados no son una buena manera de caracterizar la sociedad humana. Se rigen por la optimización codiciosa e ignoran el poder de los procesos sociales humanos. Es posible que la única razón por la que todavía funcionen sea que los reguladores los «modifican» de manera que se ajusten a sus nociones preconcebidas de lo bueno y lo malo. La democracia directa adolece de los mismos problemas, razón



por la que ha sido sustituida, en la mayoría de los países, por la democracia representativa. Por desgracia, los representantes de sistemas son demasiado proclives a dejarse influir por intereses especiales.

Los conocimientos que hacen posibles los algoritmos punteros de IA sugieren una nueva manera de aprovechar la innovación humana. Gran parte de la IA actual comienza con una gran red aleatoria de máquinas lógicas simples. A continuación, la red aleatoria aprende cambiando las conexiones entre las máquinas lógicas simples («neuronas»), alterando ligeramente con cada ejemplo de adiestramiento las conexiones entre todas las neuronas en función de cómo afecten al resultado global. El ingrediente secreto es la norma de aprendizaje, denominada *función de asignación de valores*, la cual determina en qué medida cada conexión ha contribuido a la respuesta global. Una vez se han establecido las contribuciones de cada conexión, el algoritmo de aprendizaje que construye la IA es sencillo: se fortalecen aquellas conexiones que han contribuido de manera positiva y se debilitan aquellas cuya contribución ha sido negativa.

Esta misma lógica puede servir para crear una sociedad humana mejor y, de hecho, ya se está usando ampliamente en la industria y los deportes, como veremos a continuación. Para comprender esta idea, podemos imaginar que una organización humana es una especie de cerebro en el que las personas son neuronas individuales. Las empresas estáticas, simbolizadas por el consabido organigrama, tienen conexiones fijas y, en consecuencia, su capacidad de adaptarse y aprender es escasa. Por lo general, sus departamentos terminan siendo compartimentos estancos, poco comunicados, de modo que el flujo de ideas frescas y transversales se bloquea. Estas organizaciones estáticas y poco interconectadas corren el riesgo de sucumbir ante nuevos competidores menos anquilosados.

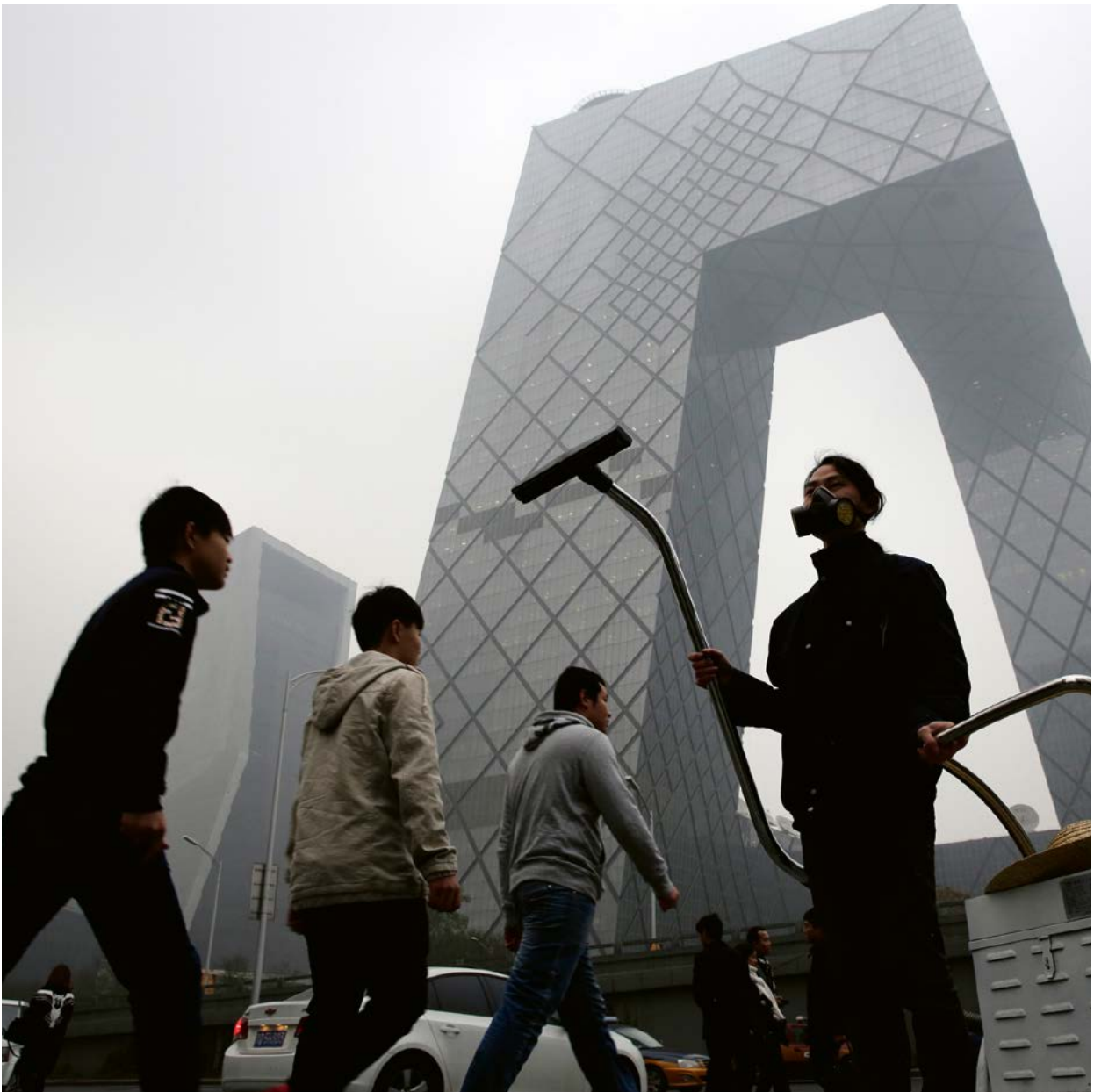
Los conocimientos que hacen posibles los algoritmos punteros de IA sugieren una nueva manera de aprovechar la innovación humana. El ingrediente secreto es la norma de aprendizaje, denominada *función de asignación de valores*, que determina en qué medida cada conexión ha contribuido a la respuesta global

Pero si las capacidades de una organización pueden impulsarse adoptando el tipo correcto de función de asignación de valores, entonces las conexiones entre los individuos, los equipos y los conjuntos de equipos podrían reorganizarse de forma autónoma y continua en función de las distintas circunstancias. Las personas no estarían abocadas a ser simples máquinas que siguen instrucciones, sino que participarían en un proceso de mejora continua, de forma similar al sistema de producción *Kaizen* desarrollado por Toyota: el enfoque de calidad total posibilitado por «equipos de mejora continua» adoptado por muchas empresas, o el estudio de datos para decidir las alineaciones de los equipos deportivos descrito en el libro *Moneyball*.

La clave de estas organizaciones dinámicas es la existencia de datos continuos, granulares y fiables. Es necesario saber lo que está sucediendo *ahora mismo* a fin de poder adaptarse continuamente. Los informes trimestrales o los censos nacionales realizados cada diez años son incompatibles con una organización o una sociedad de aprendizaje ágiles. El proyecto OPAL y la revolución de los datos proporcionan los fundamentos sobre los que construir una sociedad receptiva, justa e inclusiva. Sin su existencia, estamos abocados a una sociedad estática y atrofiada, incapaz de hacer frente a sus problemas.



Un joven recoge esmog en Pekín con una aspiradora industrial con el fin de hacer «ladrillos de esmog» que se reciclarán como material de construcción. Con este proyecto, que duró 100 días, quería mostrar los efectos de la contaminación de la ciudad para la salud y el medio ambiente. Pekín, noviembre de 2015





A día de hoy, compañías en línea como Amazon y Google y empresas de servicios financieros como Blackrock y Renaissance han adoptado y desarrollado con entusiasmo estos enfoques ágiles basados en datos en sus modelos de gestión. Por supuesto, unas organizaciones que estén siempre aprendiendo y adaptándose, aunque sea con la ayuda de sofisticados algoritmos, requerirán cambios en políticas, formación, doctrinas y muchas otras cosas.

Evitar el caos Para la mayoría de nosotros, cambio equivale a caos. Así pues, ¿cómo vamos a conseguir tener sociedades dinámicas sin un caos continuo? La clave radica en disponer de una función de asignación de valores que tenga sentido para cada individuo y, al mismo tiempo, tenga un rendimiento global óptimo. Sería como una versión *real* de la «mano invisible», que tenga sentido para las personas de carne y hueso y no solo para los individuos racionales.

Con «tener sentido» me refiero a que cada persona comprenda fácilmente sus opciones e identifique las que más le convienen como individuo, pero también entienda que lo que le beneficia a ella también favorece a la organización en su conjunto. Deben ser capaces de comunicar de forma fácil y clara sus elecciones, así como los resultados reales o previstos derivados de ellas. Solo mediante la comprensión y alineación de incentivos dentro de la sociedad, podrán los seres humanos responder al cambio de forma firme y provechosa.

¿Suenan imposible? Pues resulta que es algo que las personas ya hacen de forma relativamente natural en su vida diaria. Como se ha dicho en la primera sección de este capítulo, los individuos confían en el aprendizaje social a la hora de tomar decisiones. Mediante la correcta combinación de las experiencias de otras personas, podemos adaptarnos con rapidez a circunstancias cambiantes y mejorar de forma drástica nuestras decisiones diarias. Más arriba he descrito cómo las personas hacen esto con naturalidad en una plataforma social financiera.

Los factores clave para un cambio rápido satisfactorio incluyen la disponibilidad de datos granulares sobre qué están haciendo otras personas y cómo les está funcionando, así como la aceptación de que no podemos actuar de forma independiente porque nuestros actos influyen en otros y revierten de nuevo en nosotros a medida que los demás se adaptan a nuestras acciones. En cambio, son enemigas del éxito las actividades que distorsionan nuestra percepción de cómo viven sus vidas los demás y cómo su comportamiento los ayuda o les impide prosperar. Así, la publicidad, la militancia política, la segregación y la ausencia de sólidos mecanismos de gestión reputacionales impiden un aprendizaje social rápido y preciso.

La experiencia humana ¿Cómo podemos empezar a impulsar estas organizaciones y sociedades de aprendizaje? El primer paso debería ser el conocimiento preciso y en tiempo real de los éxitos y fracasos de otros a la hora de implementar las estrategias y tácticas elegidas. En los tiempos prehistóricos, los individuos sabían con bastante precisión lo que otros miembros del poblado hacían y su grado de éxito, y este conocimiento facilitó el rápido desarrollo de normas de comportamiento. Hoy necesitamos ayudarnos de herramientas digitales para saber lo que funciona y lo que no. Esta especie de mecanismo reputacional es exactamente lo que aporta el uso de una arquitectura de OPAL.

Los mecanismos reputacionales sólidos permiten decisiones tomadas en común o normas y regulaciones locales, en lugar de leyes creadas e impuestas por las élites. Por ejemplo, los trabajadores de primera línea a menudo tienen mejores ideas sobre cómo solucionar un problema que los directivos, y los ingenieros sobre el terreno saben más que los diseñadores sobre cómo se está gestando una nueva capacidad. El secreto de una cultura ágil y fuerte está en cerrar la brecha de comunicación entre quienes hacen y quienes organizan, de modo que los empleados colaboren tanto en la planificación como en la ejecución. Esta mejora de la



comunicación encaja con otro hallazgo clave: desarrollar la mejor estrategia para cualquier supuesto implica un equilibrio entre las prácticas tradicionales y la exploración de nuevas ideas.

Alentar de forma activa el intercambio a fin de construir una comunidad de conocimiento comporta un beneficio adicional: cuando las personas participan y comparten ideas, se sienten más positivas sobre su pertenencia a una comunidad y confían más en los demás. Estos sentimientos son fundamentales para propiciar la resiliencia social. La disciplina de la psicología social ha documentado el increíble poder de las identidades de grupo para unir a las personas y conformar su comportamiento; la pertenencia a un grupo proporciona el capital social necesario para que sus miembros puedan superar periodos difíciles y conflictivos.

Resumen. Una nueva Ilustración

Muchos de los conceptos clásicos que tenemos sobre nosotros mismos y nuestra sociedad son erróneos. Los más listos no son los que tienen las mejores ideas, sino los que son capaces de aprovechar las ideas de otros. Quienes promueven el cambio no son solo aquellos con mayor determinación, sino aquellos capaces de cooperar con otras personas afines. Y los principales factores de motivación de una persona no son ni la riqueza ni el prestigio, sino el respeto y la ayuda de sus iguales.

La desconexión entre los conceptos clásicos sobre nuestra sociedad y la realidad actual ha alcanzado proporciones abismales debido al impacto de las redes sociales digitales y otras tecnologías. Para comprender nuestro nuevo e hiperconectado mundo, debemos ampliar las ideas políticas y económicas que nos son familiares de manera que contemplen los efectos beneficiosos de que millones de ciudadanos digitales aprendan los unos de los otros e influyan mutuamente en sus opiniones. Debemos dejar de vernos solo como individuos racionales que toman decisiones tras un proceso de deliberación y contemplar los efectos dinámicos de las redes sociales que influyen en nuestras decisiones individuales y han dado lugar a burbujas económicas, revoluciones políticas y a la economía de internet. Para ello son esenciales los mecanismos reputacionales rápidos y un enfoque inclusivo de la planificación y la ejecución.

Ahora mismo es difícil imaginar un mundo con acceso a datos fiables y en tiempo real sobre el funcionamiento de las políticas gubernamentales y los problemas en el instante en que aparecen. El uso más prometedor del *big data* quizá resida en sistemas como los de OPAL, que permiten a los estadísticos de todo el mundo realizar censos más precisos, en «tiempo real» y más exactos que los obtenidos mediante encuestas. Unos datos públicos de mayor calidad pueden traducirse en un mejor funcionamiento tanto del sector público como del privado, y con este tipo de mejoras en términos de transparencia y responsabilidad podemos tener la esperanza de construir un mundo donde nuestros gobiernos y las instituciones sociales funcionen correctamente.

La historia nos dice que siempre hemos estado ciegos a cómo vive el resto de la humanidad y que la violencia o la enfermedad tenían que alcanzar dimensiones de pandemia para llegar a oídos de las autoridades. Hoy empezamos a ver cómo vive el mundo con una claridad sin precedentes. Nunca más debería ser posible decir: «No lo sabíamos».

Notas

1. Buchanan, Mark (2009): «Secret signals», en *Nature*, n.º 457, pp. 528-530.
2. Lazer, David; Pentland, Alex et al. (2009): «Life in the Network: the coming age of computational social science», en *Science*, vol. 323, n.º 5.915, pp. 721-723, 6 de febrero.
3. Del Juramento de Lealtad de Estados Unidos.
4. Smith, Adam (1759): *Teoría de los sentimientos morales*.
5. *Ibíd.*
6. Disponible en <http://www.undatarevolution.org/wp-content/uploads/2014/11/A-World-That-Counts.pdf>
7. Merece la pena reseñar que esto invalida los argumentos clásicos contra el utilitarismo: las naciones del mundo están de acuerdo en que, de hecho, se puede medir la calidad de la vida humana.

Bibliografía

- Chong, Shi; Bahrami, Mohsen y Pentland, Alex (2018): *A Computational Approach to Urban Economics*. En preparación.
- Jahani, Eaman; Sundsøy, Pål; Bjelland, Johannes; Bengtsson, Linus; Pentland, Alex y De Montjoye, Yves-Alexandre (2017): «Improving official statistics in emerging markets using machine learning and mobile phone data», en *EPJ Data Science*, vol. 6, n.º 3. Disponible en <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-017-0099-3> [consultado el 19/09/2018].
- Pan, Wei; Ghoshal, Gourab; Krumme, Coco; Cebrián, Manuel y Pentland, Alex (2013): «Urban characteristics attributable to density-driven tie formation», en *Nature Communications*, vol. 4, n.º 1.961.
- Thompson, William R. (1933): «On the likelihood that one unknown probability exceeds another in view of the evidence of two samples», en *Biometrika*, vol. 25, pp. 285-294. Disponible en <https://doi.org/10.1093/biomet/25.3-4.285> [consultado el 19 /09/2018].



Sandip Tiwari
Cornell University

Sandip Tiwari es profesor Charles N. Mellowes de Ingeniería en la Universidad de Cornell. Sus áreas de interés son la ingeniería y la ciencia que subyacen en el procesamiento de información. Sus investigaciones actuales se centran en la comprensión de los fundamentos de los grandes temas que hacen del aprendizaje de las máquinas un modelo útil para entender la dinámica del mundo. Esto incluye usar técnicas probabilísticas y de redes neuronales para desentrañar la complejidad, la energía y la entropía, así como confiar en la inferencia como herramienta teórica y en los enfoques a nanoescala como herramientas prácticas. Ha recibido los premios Cleo Brunetti de la Institution of Electronic and Electrical Engineers (IEEE); el Distinguished Alumnus Award del IIT Kanpur; el Young Scientist Award del Institute of Physics, así como becas de investigación de la American Physical Society y el IEEE. Una de las patentes de que es copropietario es la base de una técnica de perfilado de carga formal empleada en herramientas de secuenciación genética. Está convencido de que la educación y la investigación son las ocupaciones humanas más nobles cuando aúnan la curiosidad y el esfuerzo colectivo, cuando se realizan con voluntad de compartir la reflexión crítica y se debaten colectivamente los objetivos técnicos.

Libro recomendado: Frankel, Felice C. y Whitesides, George M. (2009); *No Small Matter: Science on the Nanoscale* [El tamaño importa: ciencia a nanoescala], Cambridge, Belknap Press.

La influencia de la nanotecnología en nuestra vida diaria se refleja en las herramientas de comunicación móvil, en los diagnósticos y nuevos tratamientos médicos, en el uso de datos por las empresas y los gobiernos y en la acumulación de los mismos en la nube. La sociedad reacciona despacio a los cambios tecnológicos, que se suceden con gran rapidez. La nanotecnología, con sus capacidades a escala atómica a las que se producen gran parte de las dinámicas del mundo natural y físico, tiene el potencial de hacer factibles avances sin precedentes en la historia de la humanidad. Los cambios evolutivos —la manipulación del mundo natural que se da, por ejemplo, en la genética— y los cambios emergentes —la manipulación y la autonomía del mundo físico que facilita, por ejemplo, la inteligencia artificial— pueden ahora combinarse y desembocar en profundas transformaciones existenciales. En el interior de las máquinas complejas que hemos creado mora un espíritu, y la humanidad debe trabajar en cada fase del proceso de construcción de las máquinas para asegurarse de que el espíritu sea benévolo.

«Incluso algunos de sus materialistas compatriotas están preparados para aceptar, al menos como una hipótesis de trabajo, que alguna entidad ha... por así decirlo, invadido a HAL. Sasha ha encontrado una buena manera de expresarlo: “El espíritu que mora en la máquina”».

Arthur C. Clarke, 2010: *Odisea Dos*, 1982

«La doctrina oficial, que se remonta principalmente a Descartes, viene a decir lo siguiente: [...] todos los seres humanos cuentan con un cuerpo y una mente. [...] Algunos preferirían decir que todos los seres humanos son un cuerpo y una mente, juntos. De ordinario, el cuerpo y la mente de cada uno están unidos, pero después de la muerte su mente podría seguir existiendo y funcionando. [...] Lo expuesto es la teoría oficial. Me referiré a ella a menudo, en un tono deliberadamente denigratorio, como “el dogma del espíritu que mora en la máquina”. Espero demostrar que es totalmente falso; no solo en sus aspectos concretos, también por principio».

Gilbert Ryle, *El concepto de lo mental*, 1949



Hace seis años, en mi artículo anterior¹ para esta colección, analizamos las implicaciones de la capacidad de observar y ejercer control a escala atómica y molecular; es decir, de la nanotecnología. A modo de conclusión, planteábamos conjeturas y numerosas preguntas acerca de la complejidad física y biológica que nos descubrirá el futuro merced al desarrollo de esta tecnología. Nuestro argumento era que la complejidad de la naturaleza surgía en interacciones que tenían lugar a escala atómica: átomos que forman moléculas; moléculas complejas que, a su vez, derivan en fábricas moleculares, como las células responsables de la reproducción, y la formación de sistemas jerárquicos polifacéticos. Las leyes de la física, como la segunda ley de la termodinámica, siguen vigentes, de modo que este desarrollo de la complejidad se produce a lo largo de periodos prolongados y en sistemas de elevada eficiencia energética. El uso del control nanotecnológico a escala atómica (la escala de la naturaleza) ha comportado mejoras continuadas en la eficiencia de los sistemas físicos y la extensión de su uso a la biología y otros campos. Esta capacidad de tomar el control de la naturaleza mediante la tecnología física otorga al ser humano la facultad de intervenir benéficamente, pero también plantea preguntas existenciales sobre el humano y la máquina. Había ejemplos ilustrativos, como las denominadas *máquinas emergentes*, autómatas capaces de autorreproducirse, cuyo *software* y *hardware* se habían fusionado para formar sistemas vivos; o las *máquinas evolutivas*, cuya optimización mediante ingeniería modificaba el constructo evolutivo. En la actualidad las máquinas computacionales existen como variedad emergente, al mejorarse a sí mismas a medida que observan y manipulan más datos, modifican sus ajustes cambiando el modo de usar el *hardware* y realizan copias de sí mismas mediante la partición usando el *hardware* existente, aunque todavía no se están fabricando, a excepción de la rudimentaria impresión en 3D. Hoy día son numerosos los productos químicos y los medicamentos producidos a través de células y enzimas que hacen las veces de factorías biológicas.

Desde aquel artículo de 2012, las preguntas existenciales que planteábamos a modo de conclusión no han hecho sino consolidarse. El rápido desarrollo de las CRISPR (repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas) y la veloz evolución del aprendizaje automatizado hacia la inteligencia artificial (IA)² nos han conducido a una difícil encrucijada.

El presente capítulo, una reflexión científica y filosófica, pone de relieve las lecciones que nos han brindado estos años a fin de subrayar la rápida progresión realizada para, acto seguido, centrarse en las implicaciones futuras que ya se vislumbran. Analiza cómo los principios de la física han influido en el progreso y la evolución de la nanotecnología, en qué ámbitos esta ha tenido éxito y en cuáles no tanto, y por qué razones. Cuando aparecen nuevas tecnologías



que generan cambios a gran velocidad, las instituciones de la sociedad, al igual que cada uno de sus individuos, tardan en potenciar sus aspectos positivos y limitar los negativos mediante unas restricciones (en el ámbito de la comunidad y del individuo) que aseguren un equilibrio saludable. A modo de ejemplo, cuando se inventó el ferrocarril moderno, los motores de vapor tendían a explotar y los trenes tenían accidentes por la ausencia de sistemas de señalización, pero la sociedad estableció mecanismos de seguridad. Actualmente, los motores siguen explotando y sigue habiendo accidentes, pero a una escala que la sociedad considera aceptable. Por otra parte, todavía estamos trabajando en el control de los plásticos y aún no hemos podido frenar el cambio climático, lo que ilustra lo mucho que tardan en responder la sociedad y los individuos a los avances tecnológicos.

Con el mismo ánimo que en el ensayo anterior, el presente artículo refleja la evolución de las capacidades que, gracias a la nanotecnología, se atisban en un futuro inminente, así como las cuestiones de gran calado sobre las cuales la sociedad debe empezar a reflexionar y actuar.

El uso del control nanotecnológico a escala atómica (la escala de la naturaleza) ha comportado mejoras continuadas en la eficiencia de los sistemas físicos y la extensión de su uso a la biología y otros campos, pero también plantea preguntas existenciales sobre el humano y la máquina

La última década ha sido testigo del empleo de la nanotecnología en muchas aplicaciones pasivas de ámbito general. En tanto material basado en la variedad de propiedades únicas al alcance de materiales específicos gracias a fenómenos a pequeña escala, el elemento nanotecnológico tiene un uso cada vez más generalizado en muchos productos, aunque con un coste económico bastante elevado. Sus aplicaciones van desde las relativamente sencillas hasta otras bastante complejas. Por ejemplo, los revestimientos aportan robustez y una resistencia elevada ante la corrosión y el desgaste y se aplican a los implantes médicos (como los estents, las válvulas y los marcapasos, entre otros). También se utilizan los revestimientos en superficies que requieren más resistencia en entornos difíciles: desde máquinas-herramienta hasta grandes superficies metálicas. Dado que el pequeño tamaño de un material modifica las propiedades ópticas, esta tecnología ha posibilitado aplicaciones que van desde usos generalizados pero triviales, como las cremas solares, hasta otros mucho más sofisticados, como las intervenciones por vía óptica en sistemas vivos y físicos. Algunas mejoras mecánicas, como las debidas a los nanotubos, se han integrado en el arsenal de compuestos de bajo peso. Por otra parte, las posibilidades a nanoescala y su consiguiente uso en las superficies han permitido mejoras en la filtración de virus y bacterias. Asimismo, las baterías utilizan la porosidad y las propiedades superficiales para mejorar las características de uso: la densidad energética y la retención de la carga, entre otras; y la proliferación de automóviles eléctricos y del almacenamiento de electricidad en baterías promete una utilización a gran escala. La aplicación de nanotecnología en superficies permite aprovechar la interacción a escala molecular para la unión y la interacción. En este sentido, este mecanismo posibilita una localización muy específica en el cuerpo, para mejorar tanto la detección de problemas como la administración de medicamentos. En concreto, la observación y eliminación de los crecimientos cancerosos tiene una presencia cada vez mayor en el arsenal médico. Esta misma propiedad superficial se utiliza en sensores capaces de detectar sustancias químicas específicas



Lechada de grafeno, que contiene grafeno y polímeros de fijación, en el laboratorio del Instituto Nacional del Grafeno de la Universidad de Manchester, Reino Unido, en abril de 2018. El grafeno es un material cada vez más demandado para baterías





en el medioambiente. Lo más relevante del concepto de la máquina evolutiva es su capacidad (desarrollada mediante ensayos aleatorizados a gran escala basados en la reproducción de la naturaleza y efectuados sobre los dispositivos, algo que se conoce como «laboratorio sobre un chip») de distinguir, comprender y desarrollar una serie de remedios que se pueden administrar localmente en casos en que los mecanismos biológicos hayan dejado de funcionar. La investigación contra el cáncer, el verdadero rompecabezas a que se enfrenta la medicina, se ha beneficiado mucho de la observación e intervención propiciadas por las herramientas de la nanotecnología, aunque se trata de un fenómeno muy complejo (el cáncer engloba un conjunto de numerosas enfermedades diferentes) que está todavía muy lejos de una solución, a excepción de algunas de sus manifestaciones. El concepto de máquina evolutiva también ha quedado patente en los métodos de producción de diversos compuestos, de simples a complejos, que se han generalizado: desde la conversión del peróxido de hidrógeno en un oxidante intenso mediante enzimas hasta la vacuna contra el virus del Ébola producida con plantas de tabaco.

Lo más relevante del concepto de la máquina evolutiva es su capacidad de distinguir, comprender y desarrollar una serie de remedios que se pueden administrar localmente en casos en que los mecanismos biológicos hayan dejado de funcionar

Hay que reconocer que gran parte de este uso de la nanotecnología se ha centrado en aplicaciones cuyo coste es una preocupación secundaria y las propiedades específicas son lo bastante atractivas para hacer deseable el producto. Se nos plantea, pues, un obstáculo: el coste de fabricación sigue siendo un problema. Otra dificultad es el ya tradicional problema del exceso de entusiasmo que impulsa la cultura del mercado: pese a las expectativas, el grafeno, los nanotubos y otras tecnologías de este tipo todavía no han conseguido implantarse a gran escala. Un ejemplo de dicha cultura de mercado es el ascensor espacial, basado en los nanotubos de carbono, que despertó el interés popular: la termodinámica establece la probabilidad de errores, por ejemplo, en el montaje; y, pese a que los nanotubos de pequeño tamaño pueden mostrar una resistencia formidable, a partir de una longitud determinada la existencia de un solo defecto puede tener repercusiones graves. Por lo tanto, los ascensores espaciales siguen siendo ciencia ficción.

Con todo, hay un ámbito en el que el obstáculo económico se supera a un ritmo bastante asombroso. En las aplicaciones centradas en el ser humano, la evolución de la electrónica en la industria de la información (informática y comunicación), la reducción de costes y la generalización del uso de la nanotecnología han sido espectaculares. En este sentido, el teléfono móvil, ya convertido en teléfono inteligente con acceso a internet y reproducción de vídeo, ha sido una herramienta de transformación increíblemente beneficiosa para los desfavorecidos del tercer mundo.

La naturaleza del archivo de los datos y el acceso a los mismos ha cambiado gracias a las memorias y los recursos computacionales a nanoescala, situados cada vez más en un «no lugar» muy remoto al que nos referimos con el eufemismo de «la nube». Asimismo, accedemos a esta gracias a una serie de avances propiciados por la tecnología a nanoescala en las comunicaciones, ya sean inalámbricas u ópticas, y con los dispositivos a nuestro alcance. Los vídeos, los mensajes de texto, la comunicación instantánea y la difusión rápida de información



son algo cotidiano. Por su parte, los electrodomésticos y dispositivos electrónicos, de pequeño o gran tamaño, están interconectados y controlados en un internet de las cosas que conforma un tejido en expansión tanto en casa como en el trabajo, con objetivos como reducir el consumo de energía, mejorar la salud o ahorrar al ser humano algunas tareas cotidianas.

La disponibilidad de información y la capacidad de derivar inferencias de ella han puesto el aprendizaje automático, también conocido como inteligencia artificial, en primer plano. Los datos se pueden analizar y las decisiones se pueden tomar automáticamente de un modo rudimentario, en el sentido de la máquina emergente. La combinación de la IA con la robótica (es decir, el uso físico de dicha información) también se está desplazando poco a poco de las fábricas a las aplicaciones personales que, como la conducción automática, aúnan la captación sensorial, la inferencia, el control y el manejo. Todo ello constituye un uso activo y representa un carácter tan emergente como evolutivo.

La computación cuántica es otra área con una progresión formidable en la última década. Para efectuar sus cálculos, la computación cuántica se basa en la superposición entrelazada de información accesible a escala cuántica, que es posible a escala *nano*. Es muy distinta del estilo tradicional de computación determinista, basado en los bits clásicos; clásicos en el sentido de que se dividen exclusivamente entre «0» y «1» lógicos (booleanos). Podemos transformar estos bits mediante funciones computacionales: un «0» en «1», por ejemplo, a través de un inversor; o una colección de ceros y unos (es decir, un número) en otro número, mediante la función que elijamos. Sumar o multiplicar es una operación funcional de este tipo y, en cada etapa de la computación, estos ceros y unos se transforman de un modo determinista. Esto es, en la computación clásica, por lo general, no se puede volver al punto de partida una vez efectuada una transformación, puesto que hay información que se va descartando en el proceso: el producto de una multiplicación suele tener múltiples combinaciones de multiplicandos y multiplicadores, que tras la operación no se pueden deducir del resultado.

Los bits cuánticos, en calidad de estados entrelazados superpuestos, en cambio son muy diferentes. Un sistema con un único bit cuántico consiste en una superposición de «0» y «1». No sabemos cuál de ellos es, solo que es uno de los dos; para saber si es «0» o «1», tendremos que medirlo. Un sistema con dos bits cuánticos puede ser un sistema entrelazado, donde los dos bits están interconectados. Por ejemplo, podría ser una superposición en que, si el primero es un 0, el segundo es un 1, pero si el primero es un 1, el segundo es un 0: esto es una superposición entrelazada. Solo al efectuar una medición podemos descubrir si se trata de la combinación «01» o de la combinación «10». En un sistema compuesto de un gran número de bits cuánticos, estos pueden formar muchas más conexiones de este tipo, que se pueden manipular mediante la computación (sin medir el resultado), de forma que sigan existiendo el entrelazamiento y sus transformaciones. Mientras se efectúa esta computación, sin haber observado el resultado, es posible retrotraerse hasta el punto inicial, porque no se ha descartado información alguna. Por lo tanto, la computación sigue adelante y no conocemos el resultado hasta que llevamos a cabo una medición, que sí nos devuelve al modo clásico. Esta capacidad —y las transformaciones que permite sin renunciar al entrelazamiento y sus consiguientes posibilidades (a diferencia del modo clásico, que las descarta)— otorga a la computación cuántica propiedades superiores a las de la computación clásica. En la actualidad existen sistemas de 50 bits cuánticos, lo que representa casi el umbral en que la computación cuántica empieza a superar las capacidades de la computación clásica. Son potencialmente resolubles ya numerosos problemas complejos, como en la criptografía (que no en vano fue la primera razón para aplicar este enfoque), pero también otros interesantes



y de índole más práctica: por ejemplo, comprender las moléculas y sus interacciones para desarrollar su complejidad con vistas a descubrir nuevos medicamentos. A la hora de calcular, 50 bits cuánticos representan una complejidad mucho mayor. Si tenemos en cuenta que, en la diversidad de interacciones a la escala más reducida, la naturaleza se caracteriza por un comportamiento cuántico y que el comportamiento cuántico coincide, a una escala mayor y por el principio de correspondencia, a un comportamiento clásico (es decir, un resultado estadísticamente muy probable), entonces la computación cuántica representa una manera, recién descubierta, de simular cómo computa la propia naturaleza: ha nacido un nuevo tipo de computación.

Estos cambios de tanta amplitud y relevancia, aún en su fase naciente, son en gran medida comparables a los surgidos con la invención de la imprenta y del transporte mecanizado. La imprenta democratizó el aprendizaje y la difusión de información. Por su parte, el transporte mecanizado hizo más pequeño el mundo y facilitó la distribución de bienes. Ambos tuvieron un papel decisivo a la hora de permitir un modo más eficiente (tanto en tiempo como en energía y en otros aspectos) de impulsar el progreso humano. Al mismo tiempo, los libros también transmiten atrocidades y los medios de transporte son una práctica herramienta tanto para los terroristas como para la represión estatal. Sin embargo, la sociedad ha encontrado maneras de limitar estos efectos negativos y sigue encontrando nuevas maneras de limitarlos a medida que nacen nuevas mutaciones. Las nuevas tecnologías también tienen atributos nocivos. En este sentido, los instrumentos de comunicación móvil y la ubicuidad de la disponibilidad de información nos han cambiado: nos alejan de un pensamiento y una articulación detenidos y de mayor alcance y modifican nuestra reacción ante cualquier información (debido a la confianza en la letra impresa que nos han inculcado). Los mercados financieros, las interacciones sociales e incluso nuestras relaciones familiares muestran algunas consecuencias de la ubicuidad de acceso propiciada por la tecnología a nanoescala. Los drones, como máquinas que permiten matar sin mancharnos las manos de sangre, son omnipresentes en los conflictos y, gracias a la explotación de la tecnología, trivializan la muerte y el destino humano.

La computación cuántica es un área con una progresión formidable en la última década. Hoy son potencialmente resolubles numerosos problemas complejos, como en la criptografía, pero también de índole más práctica: por ejemplo, comprender las moléculas y sus interacciones para desarrollar su complejidad con vistas a descubrir nuevos medicamentos

Esta evolución en la IA, la robótica, la autonomía y la combinación de la maquinaria emergente y la evolutiva plantea preguntas de gran calado. Además, la sociedad carece de los conocimientos, aunque sea rudimentarios, necesarios para abordar racionalmente, desde una perspectiva filosófica y científica, muchos de los problemas que sin duda surgirán (igual que aparecieron en anteriores puntos de inflexión desencadenados por la tecnología).

Me gustaría analizar esta transición estudiando las posibilidades de esta era en ciernes e integrando reflexiones que abarquen desde su punto de partida hasta su punto de destino, con pensamientos que hagan de puente entre la dimensión física y la dimensión natural de la nanotecnología.



La evolución en la IA, la robótica, la autonomía y la combinación de la maquinaria emergente y la evolutiva son, en gran medida, comparables a los cambios surgidos con la invención de la imprenta y del transporte mecanizado

Detalle de la fachada del edificio del Quantum Nano Centre, diseñado por el estudio de arquitectura KPMB. Waterloo, Canadá, 2013



La combinación de la IA con la robótica (es decir, el uso físico de dicha información) también se está desplazando poco a poco de las fábricas a las aplicaciones personales

Primer plano de un cristal reforzado mediante la aplicación de una nanocapa. La fotografía ha sido tomada en la fábrica moscovita P Glass



La segunda ley de la termodinámica, formulada por primera vez por Sadi Carnot en 1824, establece que, en un sistema aislado, la entropía siempre crece. La entropía, en términos simplificados, es una medida de aleatoriedad. Según dicha ley, en ausencia de entrada de energía y materia exterior a un sistema, el sistema evolucionará hacia una aleatoriedad total; agotará todas sus capacidades. Este estado de máxima aleatoriedad constituye un equilibrio termodinámico. Este argumento, inicialmente empírico, cuenta ahora con unos fundamentos estadísticos concretos y es la razón por la cual los procesos naturales tienden a avanzar en una determinada dirección, al igual que el paso del tiempo. Por el contrario, nuestro mundo (el natural y el que hemos creado) tiene un grado muy alto de organización, además de la capacidad de llevar a cabo cosas verdaderamente interesantes: los átomos se agrupan en moléculas; a su vez, las moléculas van ganando complejidad; algunas moléculas muy complejas, como los ribosomas (formados por ARN y partes de proteína) se convierten en controladores y efectúan funciones de transcripción y transmisión de mensajes que son esenciales para la creación de proteínas; aparecen las células (con miles de variedades en el caso de los humanos) y se forman los órganos, que se desarrollan hasta desembocar en la diversidad de las creaciones de la naturaleza. La jerarquía resultante de este emparejamiento organizado dio lugar a una máquina emergente viva. Por su parte, nuestro sistema social, al igual que los sistemas de computación, gobierno o finanzas, también constituye una maquinaria de este tipo: componentes que se combinan con otros de acuerdo con una ortodoxia organizada y dotada de muchas capacidades. El vector hacia la aleatoriedad termodinámica que establecía la segunda ley se ha evitado gracias al flujo entrante de materia y energía, de manera que se ha generado una diversidad interesante.

Esta es la apariencia de la complejidad que adopta la forma de una jerarquía, que Herbert Simon caracteriza mediante una interesante parábola en su ensayo *The Architecture of Complexity* [La arquitectura de la complejidad],³ que habla de los relojeros Hora y Tempus. Ambos fabricaban relojes hechos de 1.000 pequeñas piezas individuales. Tempus elaboraba sus relojes juntando todas las piezas de una vez, pero, si le interrumpían (por ejemplo, con una llamada de teléfono), debía reconstruirlos enteros, con sus 1.000 piezas. Cuanto más éxito cosechaban sus relojes entre los clientes, más llamadas recibía y, por lo tanto, más se retrasaba en la fabricación. Los relojes de Hora eran igual de buenos, pero los fabricaba mediante una jerarquía de ensamblajes parciales. El primer grupo de ensamblajes utilizaba 10 piezas en cada uno; a continuación, se utilizaban 10 ensamblajes parciales para formar un ensamblaje parcial más grande; y así sucesivamente. Aunque al principio se hacían la competencia, Tempus acabó trabajando para Hora. Con una probabilidad de 1 entre 100 de una interrupción durante el proceso de ensamblaje, Tempus tenía que dedicar un promedio de 4.000 veces más de tiempo a producir un reloj. Con cada interrupción, Tempus tenía que empezar desde el principio, pero Hora solo tenía que rehacer parte del camino. La jerarquía hacía posible el éxito de Hora en este rudimentario sistema complejo.

La moraleja de esta parábola, en términos de termodinámica (generalizable, además, a nuestro mundo físico y natural), es que la complejidad surgió de un ensamblaje de piezas que, en general, puede ser aleatorio. La probabilidad de culminar una construcción a partir de un pequeño número de elementos que se ensamblan para formar un conjunto estable, inicialmente simple, pero cada vez más complejo a medida que se desarrolla la jerarquía, es mayor que la probabilidad de ensamblar un gran número de elementos de una vez. Por otra parte, aparecen nuevas propiedades en el producto final y, posiblemente, en los ensamblajes parciales intermedios. Por supuesto, esta es una descripción muy simplista y susceptible de muchas objeciones, pero lo importante es que surgió una estructura organizativa gracias al



El joven Ari Dyckovsky, de diecisiete años, finalista del concurso de búsqueda de talento científico Science Talent Search de 2012, hace experimentos de física cuántica en el Laboratorio de Mediciones Físicas dedicado a la computación y la simulación cuánticas del NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías) de Gaithersburg, Maryland, Estados Unidos





flujo de entrada de energía y piezas al sistema y a la existencia de formas intermedias estables que reducían la entropía. Con el tiempo suficiente, la naturaleza también forma jerarquías basadas en formas intermedias estables que descubre. Aparece así la negentropía: un descenso (negativo) de la entropía desde el estado de agotamiento, es decir, desde su máximo. Esta es la historia de cómo surgió la vida.

En su libro de 1967, *The Ghost in the Machine* [El espíritu que mora en la máquina] (es la tercera vez que aparece esta expresión),⁴ Arthur Koestler denomina este proceso «el efecto Jano»: los nodos de esta jerarquía son como el dios romano del mismo nombre, que tenía una cara que miraba hacia la parte dependiente y otra que miraba hacia el ápice. Este eslabón y la proliferación de eslabones como estos, asociados a sus inusuales propiedades, son clave para las propiedades emergentes del conjunto.

No obstante, la termodinámica plantea más limitaciones, que se manifiestan en la confluencia de la energía, la entropía y los errores. Todo sistema complejo está hecho de un gran número de subconjuntos jerárquicos, y un sistema que emplee objetos a nanoescala está sometido a estas restricciones en el proceso de su construcción. Para reducir los errores, debe haber una reducción considerable de la entropía, pero, como un proceso de reducción tal requiere usar más energía, se generará calor. Por lo tanto, para ser sostenible (es decir, para evitar el sobrecalentamiento aun cuando el flujo de energía mantenga el sistema en funcionamiento), requiere una eficiencia energética elevada, limitar la cantidad de energía que se transforma y mantener los errores bajo control. En este sentido, la necesidad de desplegar tanta energía en cada etapa hace que el sistema adolezca de una insaciable hambre de energía, una consecuencia termodinámica que influye negativamente en la computación y la comunicación. Las turbinas gigantes que convierten la energía en electricidad, desde el movimiento mecánico de las aspas hasta el flujo de corriente voltaica, deben ser extremadamente eficientes, de modo que solo un pequeño porcentaje (como mucho) de la energía se pierda; y todo ello, para una turbina, que no es un sistema tan complejo. Sin embargo, la computación y la comunicación todavía no han aprendido esta lección.

Con las CRISPR se abren las puertas al descubrimiento de medicamentos, la prevención de las enfermedades genéticas y cardíacas y las afecciones sanguíneas y la modificación de las propiedades de las plantas

La naturaleza ha encontrado una manera inteligente de evitar este problema. Pensemos en la compleja máquina biológica que es el ser humano. Los procesos de desarrollo o reemplazo tienen lugar de forma individual y en volúmenes muy pequeños (a nanoescala), en paralelo a la escala del número de Avogadro. Toda esta transcripción, transmisión de mensajes, generación de proteínas y de células, etcétera, requiere energía, pero la naturaleza evita el problema del error mediante la introducción de mecanismos de autorreparación. La rotura y la formación de estos vínculos consumen muy poca energía ($10-100 k_B T$, donde $k_B T$ constituye una buena medida del orden de energía en un movimiento térmico). Los errores escalan de manera exponencial con estos prefactores. Con una energía de $10 k_B T$, una de cada 100.000 etapas de desarrollo (por ejemplo, cada etapa de extracción y copia de un elemento) tendrá un error, que deberá ser detectado. La máquina desarrolladora deberá, pues, retroceder, hasta el último estado correcto conocido y reconstruir dicho vínculo; en cierto modo, es como la llamada a



Tempus y Hora, pero en la que Hora solo tiene que reiniciar la fabricación desde un estado intermedio. La naturaleza consigue hacerlo bastante bien: a diario, el cuerpo humano recicla su peso corporal en ATP (adenosina trifosfato, la molécula de la transformación de energía), a fin de permitir la síntesis química, la propagación de impulsos nerviosos y la contracción de los músculos. La comprobación y reparación posibilita este grado de complejidad, pese a las restricciones energéticas.

¿Qué relación guarda esta explicación sobre la nanotecnología con el «espíritu oculto»? A modo de ilustración, me gustaría poner en relación dos tecnologías nuevas de esta década: las CRISPR y la IA actual.

CRISPR es la abreviación de un método de edición de genes que se sirve de una proteína de origen natural (Cas9) y de ARN-guía específicos para alterar los genes portadores e insertar en ellos las secuencias deseadas. La intervención del ARN-guía complementando una secuencia de ADN foráneo posibilita que la proteína Cas9 desenmarañe la hélice de ADN de la secuencia y cree un corte en dos cadenas, que después la enzima reparadora volverá a empalmar mediante la inserción del ADN experimental deseado. La secuencia del ARN-guía es relativamente barata de diseñar, su eficiencia es alta y la proteína es inyectable. Además, permite hacer mutar múltiples genes de una vez. Este proceso se puede efectuar en el núcleo de una célula, en células madre, en embriones e, incluso, en un contexto extracelular. Se trata de una herramienta de edición genética que permite intervenir en el diseño del genoma. Cabe reiterar, en todo caso, que la termodinámica nos enseña que siempre habrá errores (cuya probabilidad será inversamente proporcional a la energía empleada), de modo que los sistemas de baja energía necesitan sistemas de autocorrección. Aun así, pueden escaparse fallos muy esporádicos. Las CRISPR son de ayuda precisamente en este apartado, con los errores naturales del mundo natural: un Jano defectuoso (un error en la construcción del sistema al modo de Hora) tiene arreglo.

Por tanto se abren las puertas al descubrimiento de medicamentos, la prevención de las enfermedades genéticas y cardíacas y las afecciones sanguíneas y la modificación de las propiedades de las plantas;⁵ tenemos un buen ejemplo en los tomates que pierden los pedúnculos (la parte que une el fruto a la planta), los cuales reciben la señal de morir y soltarse cuando el tomate está lo bastante maduro. Lo que a un sistema complejo de la naturaleza le llevaría muchas generaciones, mediante el cultivo de mejora de las plantas o la cría de especies vivas, se puede conseguir en una o unas pocas generaciones. Gracias a la intervención humana, ha nacido una máquina emergente-evolutiva y, por consiguiente, se pueden diseñar nuevos miembros del reino animal.

La segunda tecnología que abordaremos es la del aprendizaje automático, que hoy en día evoluciona hacia una inteligencia artificial. Dado que los dispositivos electrónicos han reducido su tamaño considerablemente y que se han desarrollado nuevas arquitecturas (algunas dotadas de rudimentarias formas de autoevaluación y autorreparación), con niveles todavía mayores de densidad e integración, ahora contamos con recursos de supercomputación sobre la mesa de nuestra casa y también en la nube. Hoy en día, esta ingente capacidad de selección y manipulación de datos basta para que los algoritmos programados descubran patrones, encuentren vínculos entre estos y, también, pongan en marcha otras tareas que planteen preguntas para contribuir a poner a prueba la validez de las inferencias y explorar en busca de más datos cuando no baste con los disponibles. Desde la perspectiva humana, la



información consiste en asociaciones compactas. La fotografía de un perro contiene muchos datos en los píxeles e, incluso, es posible asociarla a una medida de información científica (una especie de negentropía). En todo caso, los humanos, al ver la fotografía, asociarán dicha información a la imagen de un perro, pero, más concretamente, a un perro golden retriever bien cuidado y quizá también la asociarán a la idea de que los perros de esta raza tienen tendencia al cáncer a causa de la cría selectiva, etcétera. Buena parte de esta información puede estar asociada al perro a modo de pequeños elementos de conocimiento, como, por ejemplo, la idea de que los perros no se llevan bien con los gatos y que los perros fueron domesticados (también mediante la cría selectiva) durante la fase en que los humanos eran cazadores-recolectores. A medida que nos alejamos más y más del perro como patrón (los perros evolucionaron a partir de los lobos), la capacidad de una máquina física se va debilitando a falta de una conexión entre dominios de información muy diferentes que puedan combinarse en forma de conocimiento. Para un humano, este problema no es tan grave. Si esta información fáctica sobre el lobo y el perro formara parte de la máquina como contenido, sería una buena cosa, pero si quisiéramos encontrar dicha conexión, habría que hacer preguntas, seguir el rastro genético, cotejar patrones y tomar otras medidas antes de poder establecer la conexión correspondiente. El aprendizaje y la creación de conocimiento del ser humano se producen a través de las hipótesis y el análisis de los resultados de experimentos y debates, que desembocan en un consenso. Esta capacidad, teniendo en cuenta que las máquinas pueden pedir y buscar información, está ya al alcance de la IA, aunque todavía no se ha conseguido conectar dos campos antes separados, el espacio y el tiempo (como en la relatividad). Por lo tanto, en los artículos sobre cómo efectúa la IA la evaluación preliminar de enfermedades y ayuda a diseñar moléculas y a desarrollar experimentos con las moléculas de diseño, se abordan tareas bastante complejas de combinación de patrones en las cuales se conectan datos e información.

Por otra parte, el formidable progreso de la computación cuántica abre otra serie de posibilidades de gran potencial. Las capacidades diferenciadas y excepcionales de la computación cuántica (entrelazamiento incluido) podrían hacer que determinadas conexiones, que eran invisibles bajo un enfoque clásico, se conviertan en latentes con un enfoque de mecánica cuántica. Esto implica, potencialmente, que la naturaleza de las asociaciones y conexiones que el ser humano ve —como las que Einstein identificó en la relatividad, y que el aprendizaje automático clásico solo podía ver si ya las había visto antes— pueden ser desentrañadas por la maquinaria de la computación cuántica, al constar en forma de datos entrelazados y fuera del alcance de un enfoque clásico.

Llegados a este punto, es el momento de poner en relación este debate con mis reflexiones sobre termodinámica.

Las CRISPR, como herramienta de modificación genética, fueron el producto de sustituir los ensayos aleatorizados de la naturaleza por la intervención humana, porque los científicos ya sabían cómo la respuesta inmune de las bacterias combate un ADN viral foráneo. En este contexto, las CRISPR sirven para producir dos cadenas de ARN (ARN-guía) que se agrupan con la enzima Cas9 para formar un complejo, que, a su vez, ataca al ADN viral, lo separa y, de este modo, lo desactiva. Por el modo en que la Cas9 se une al ADN, puede distinguir entre el ADN bacteriano y el ADN viral; esta capacidad constituye una memoria que puede seguir corrigiendo amenazas futuras, es decir, los errores. En la actualidad ya hemos establecido vínculos entre el campo de las infecciones virales y bacterianas y el enorme campo de los procesos naturales que dependen del genoma; así, un proceso cuya estabilidad ya había demostrado la naturaleza se ha llevado a otros contextos que, pese a haber sido ya quizá descubiertos por la naturaleza, tal vez no hayan evolucionado en el sentido de Wallace

y Darwin. Las restricciones de la termodinámica, tanto en lo referido al consumo de energía como a la necesidad de estabilidad y corrección de errores, se han cumplido en la aplicación física de las CRISPR al mundo natural. En consecuencia, ahora el ser humano puede aplicar este procedimiento a multitud de lugares donde la naturaleza no ha sabido cómo hacerlo o lo ha intentado sin éxito.



El apartado siguiente aborda la evolución de la computación hasta la IA que ha vivido nuestra tecnología física, así como las correspondientes ventajas y desventajas. La reducción del tamaño de los dispositivos electrónicos físicos significa que buena parte de lo que ocurre a escala cuántica es importante. El efecto túnel es uno de estos fenómenos: el hecho de que los electrones respondan a dicho efecto por la mera presencia de voltajes, y no porque se estén manipulando datos, trae consigo una producción de calor que no sirve para nada útil. La reducción de los errores en estos sistemas físicos (aunque todavía sin la capacidad general de corregir los errores durante las etapas individuales) comporta que no se pueda reducir la energía utilizada para manipular los datos. Por otra parte, la cantidad de energía consumida por un sistema biológico complejo para efectuar una transformación útil está muchos órdenes de magnitud por debajo de la de un sistema físico complejo. El cerebro humano consume la misma energía que una bombilla de 20 W, mientras que los sistemas físicos utilizados en el ámbito de la IA presentan, en caso de almacenamiento local, un consumo de energía cientos de veces superior, que se multiplica por más centenares aún si el almacenamiento está en la nube. Por lo tanto, esta ventaja para la IA ha venido acompañada de un ingente incremento en el consumo de energía, debido a la termodinámica propia del modo de aplicación de este sistema complejo.

La naturaleza de las asociaciones y conexiones que el ser humano ve, como las que Einstein identificó en la relatividad, y que el aprendizaje automático clásico solo podía ver si ya las había visto antes, pueden ser desentrañadas por la maquinaria de la computación cuántica, al constar en forma de datos entrelazados y fuera del alcance de un enfoque clásico

El pensamiento y el cerebro humanos constituyen una frontera que podemos entender en sus componentes, pero no como un conjunto complejo y asombroso; no conviene olvidar, en este sentido, las enseñanzas de la parábola de los ciegos y el elefante. En todo caso, hay varias características respecto a las que los científicos (psicólogos, científicos de la conducta y neurocientíficos) parecen estar de acuerdo en sus polifacéticos experimentos. El psicólogo conductista Daniel Kahneman⁶ distingue entre el pensamiento rápido y el lento. El rápido es un pensamiento correspondiente al sistema 1, que es veloz, heurístico, instintivo y emocional. Cuando efectúa juicios rápidos, una persona pone en relación otros contextos con el problema a que se enfrenta. Esta dependencia de la heurística comporta sesgos y, por lo tanto, errores sistemáticos. El pensamiento lento corresponde al sistema 2, que es deliberativo y analítico y, por ende, lento. El cerebro humano, como el de otros pocos mamíferos, es capaz de imaginar varios «mundos» pasados y futuros para desarrollar inferencias y respuestas situacionales. El neurocientífico Robert Sapolsky⁷ analiza los orígenes de la agresión y la recompensa en



Cámara de techo y sistema de radar del coche autónomo Ford Fusion de Uber durante una demostración de la tecnología de los coches sin conductor celebrada en Pittsburgh, Pensilvania, el 13 de septiembre de 2016





términos de lo que sucede en el cerebro. En mi opinión, en su mayor parte están relacionados con el pensamiento rápido, puesto que tienden a ser instintivos. En términos funcionales, el cerebro se puede dividir en tres partes. La primera capa, común al reino animal, es el núcleo interior, bastante autónomo y que regula el cuerpo para mantenerlo en equilibrio. La segunda capa, más reciente en la evolución, se expandió en los mamíferos y es, en proporción, la más avanzada de los humanos. La tercera capa, el neocórtex o superficie superior, es la que tiene un desarrollo más reciente (unos cientos de millones de años,⁸ hace relativamente poco tiempo) y tiene, como puntos fuertes, la cognición, la abstracción, la contemplación y el procesamiento sensorial. La capa 1 también recibe instrucciones de la capa 2 por medio del hipotálamo, y la capa 3 puede enviar señales a la capa 2, que a su vez las remite a la 1. La amígdala cerebral es una estructura límbica (una capa intermedia) situada bajo el córtex. En la agresión median la amígdala, el córtex frontal y el sistema de dopamina cortical. El sistema dopaminérgico (la generación de dopamina en varias zonas del cerebro) se activa en previsión de una recompensa, de modo que, en este aspecto en particular, este sistema complejo se puede entrenar (al estilo pavloviano) e inducir al aprendizaje mediante experiencias de entrenamiento de refuerzo o inhibición. Un ejemplo profundo del fallo de esta maquinaria lo representa Ulrike Meinhof, de la organización terrorista Fracción Baader-Meinhof del Ejército Rojo, formada en 1968 en Alemania. En 1962, cuando era periodista, a Meinhof le extirparon un tumor cerebral. En 1976 su autopsia reveló un tumor y un tejido cicatrizal quirúrgico que dañaba la amígdala cerebral, donde los contextos sociales, las ansiedades, las ambigüedades, etcétera se combinan para formar una respuesta de agresión. Gran parte de las tendencias de un humano dependen de esta maquinaria consistente en la relación entre la capa 3 y la 2, así como de los «Janos» que contienen. Si no se corrigen, los errores perniciosos en la manera de pensar y tomar decisiones, en el ámbito de la inteligencia, tienen una gran importancia. Esto, que es cierto en la naturaleza, también lo será en la IA.

Una vez expuestos los antecedentes del actual estado de las cosas y efectuado el correspondiente análisis, es el momento de mirar al futuro. La tecnología, cuando se ha empleado juiciosamente y por el bien general de la sociedad en su conjunto, ha sido una contribución única del ser humano a la naturaleza. En los casi dos siglos desde la invención del motor de vapor, las capacidades tecnológicas se han desarrollado a un ritmo asombroso.

En este contexto, en las últimas décadas, la nanotecnología ya casi ha franqueado la gran distancia que separaba lo físico de lo biológico. Las últimas décadas del siglo XX y las primeras del XXI han visto nacer muchas herramientas nanotecnológicas que posibilitan un conocimiento más afinado de los procesos biológicos complejos. A su vez, ello ha derivado en las increíbles capacidades de manipulación existentes en la actualidad, que representan una alternativa a los caminos naturales de la evolución. La IA aporta una capacidad cognitiva de tipo cerebral. El problema es que dicha capacidad puede aplicarse a una cantidad de datos asombrosamente mayor que la que ningún humano pueda contener y, a menudo, está en manos de grandes corporaciones.

La historia de la tecnología nos muestra que la *revolución industrial* del siglo XIX fue una revolución en la mecánica que sirvió para automatizar el trabajo físico. Los actuales cambios que propicia la nanotecnología, por su combinación de lo biológico y lo físico, los voy a enmarcar en una *revolución existencial*, porque nos afectan directamente como seres.

La revolución existencial y los cambios y trastornos que es probable que traiga consigo son de una clase y de una escala que harán inútiles los esfuerzos posteriores de la sociedad por recuperar el control (conseguirlo cuesta muchas décadas, ha ocurrido incluso con conflictos sociales como los derivados del marxismo tras la revolución industrial). Es necesario ser muy cuidadosos, previsores y juiciosos; de lo contrario nos enfrentaremos a repercusiones mucho



más graves que la extinción de especies que se está produciendo ya debido a la expansión desenfrenada de la humanidad y su consiguiente necesidad de recursos.

Son muchos los indicios en este sentido, algunos con una conexión más profunda que otros. Entre 1965 y 2015, la producción de energía primaria en el mundo se ha incrementado de 40 PWh a 135 PWh (petavatios-hora) al año. Es decir, la producción se ha multiplicado por más de tres en cincuenta años, con el petróleo, el carbón y el gas como fuentes predominantes de energía. Además, durante el mismo periodo, el movimiento de energía anual solo en Estados Unidos pasó de unos 8 PWh a casi 42 PWh; es decir, se quintuplicó. En la actualidad, Estados Unidos consume, por sí solo, la misma cantidad de energía eléctrica que consumía el mundo entero hace unos cincuenta años. Además, el consumo de ese país equivale a una cuarta parte del consumo energético mundial, aunque la población estadounidense no suponga ni una vigésima parte del total de la población mundial. Cabe destacar que gran parte de este incremento en el consumo eléctrico es el resultado de la proliferación de la computación y la comunicación. El funcionamiento de cada teléfono móvil inteligente necesita electricidad equivalente al gasto de una nevera pequeña, que se consume en dispositivos de red y sistemas de conmutación. Cada búsqueda en la red y cada publicidad emitida gracias a los algoritmos de aprendizaje automático requieren otra cantidad equivalente de energía consumida en recursos computacionales. El calentamiento global es, en el fondo, un problema derivado del consumo eléctrico, alimentado a su vez por esta estructura de información, con sus orígenes termodinámicos.

En cuanto al aspecto cognitivo de la capacidad de las máquinas y la robótica, los coches autónomos constituyen la principal tendencia actual. Cabe preguntarse si, a medida que mejore dicho aspecto cognitivo, la gente vivirá más y más lejos de su trabajo y los automóviles se convertirán en oficinas sobre ruedas o si, por el contrario, la evolución desembocará en un uso eficiente de los coches, de modo que recogerán a las personas en lugares preestablecidos y las llevarán a sus respectivos destinos, lo que hará necesarios menos automóviles (por su eficiencia y porque solo existirán como servicio público o vehículo de empresa). Si ocurre esto último, se habrá encontrado una solución tecnológica para un gran problema que apareció en nuestra sociedad hace más de cien años, tras la invención del motor de combustión. Si ocurre lo primero, lo que habrá generado la tecnología será un nuevo incremento del consumo de energía. En este contexto y en términos existenciales, es engañosa la generalización continuada del argumento de que «el medio es el mensaje», porque las empresas tecnológicas con plataformas computacionales y el alcance necesario son, de hecho, empresas que impulsan publicidad, ideas y estilos de vida aprovechando su acceso al flujo de interacción social de los individuos.

En cuanto a la alteración biológica, los humanos no han objetado demasiado a la agricultura modificada genéticamente, que consiste en una modificación rudimentaria del genoma. La mejora del valor nutricional, la resistencia a las plagas y el estrés y otras propiedades han tenido una buena acogida, en especial en Estados Unidos y el tercer mundo. No se entiende tanto, sin embargo, el cruce de especies y la introducción de transgénicos foráneos en la naturaleza, tampoco los efectos que tiene sobre otras especies naturales este constructo artificial que no procede del proceso evolutivo de la naturaleza. La creciente resistencia a estas prácticas está asociada también con la invasividad, que conduce a una reducción de la diversidad. El maíz BT fertiliza otras cosechas y se convierte en un vector de contaminación cruzada de los genes al estilo mendeliano. Asimismo, el maíz BT afecta también a algunos insectos, como ejemplifica el caso de las mariposas monarca. Por lo tanto, del mismo modo que las bacterias resistentes a los antibióticos a las que nos enfrentamos hoy en día (en especial en los hospitales del tercer mundo con la persistencia de la tuberculosis, y en los grandes

hospitales de Estados Unidos), la nueva intervención de diseño en la biología tendrá consecuencias nocivas. Sin embargo, a día de hoy carecemos de las capacidades necesarias para visualizar estas posibles amenazas, de modo que el tema merece un análisis más detenido.



Hablamos, pues, de la introducción de un cambio artificial programado con precisión en el mundo natural, donde la evolución tiene lugar por lo común mediante una selección basada en variaciones pequeñas y heredadas que incrementan la capacidad para competir, sobrevivir y reproducirse; es decir, mediante interacciones aleatorias naturales que solo siguen adelante en casos concretos. ¿Qué efecto tendrá la introducción de cambios artificiales? Conducirá a una prolongación del proceso natural de evolución, pero, en este caso, tras haber introducido una entidad no natural. La naturaleza evoluciona muy despacio y a largo plazo, de modo que minimiza las características dañinas, desde el nivel muy molecular básico hasta el nivel del sistema complejo, en cada una de las etapas del ensamblaje. Pese a que el cambio artificial es portador de una característica específica deseada por el ser humano, es posible que, como sucede en muchos casos, no cuente con las características que la naturaleza habría elegido por medio de la optimización inherente al proceso de evolución natural. La compresión de la escala temporal y la introducción de una programación específica y no natural llevan aparejadas unas posibilidades de error elevadas. No en vano, a diario somos testigos de las funestas consecuencias de dichos errores en los complejos sistemas de nuestro mundo. Por ejemplo, el fallo de situar a la persona equivocada en la jerarquía de una organización conduce al fracaso de esta; y el error de situar el componente equivocado en un sistema complejo, como el reloj de Hora, impedirá que el sistema funcione. Se puede conseguir una función concreta mediante una intervención deliberada, pero es posible que, al hacerlo, perdamos una función general.

La historia de la tecnología nos muestra que la revolución industrial del siglo XIX fue una revolución en la mecánica que sirvió para automatizar el trabajo físico. Los actuales cambios que propicia la nanotecnología, los voy a enmarcar en una *revolución existencial*, porque nos afectan directamente como seres

Las CRISPR hacen que las consecuencias de la modificación genética del mundo natural sean mucho más profundas, porque permiten el cambio programado de múltiples genes, no solo en las cosechas, sino en todos sus habitantes, vivos o no. Por añadidura, el efecto de múltiples cambios simultáneos agrava el riesgo. Un tomate que presente el mismo tamaño que una hamburguesa, tenga buen sabor, tarde mucho en pudrirse y crezca en una planta sin pedículos puede ser muy deseable para McDonald's, el agricultor o el consumidor, pero, si sus genes se transmiten a otras especies, entraña riesgos extremos que, en realidad, ni siquiera son previsibles. Eso es precisamente lo que las restricciones termodinámicas sobre los procesos de la naturaleza (en cuanto a la energía, las tasas de error, la corrección de errores, las mutaciones generacionales y la autoselección) han atenuado durante miles de millones de años.

Una consecuencia de lo anterior es el potencial de programar algunas características de nuestros hijos. ¿Quién no quiere que sus hijos sean más inteligentes y más guapos? Hace cien años la eugenesia gozaba de inmensa popularidad en los países occidentales (con partidarios como John Maynard Keynes, Teddy Roosevelt, Bertrand Russell, Bernard Shaw y Winston



Churchill) y trazó un camino que no tardó en culminar en Adolf Hitler. Entre las bolsas de alta incidencia del síndrome de Asperger se encuentra Silicon Valley, donde reside un gran número de expertos en altas tecnologías: un grupo con características específicas y similares y, por lo tanto, de diversidad reducida. Que el autismo represente un problema allí no puede sorprender a nadie. Los genes sirven a multitud de propósitos y de su coexistencia surgen varias características. Los humanos adquieren sus rasgos (en términos de enfermedades e inclinaciones, entre otras cosas) a partir de la diversidad. Si programamos estos aspectos, no podemos saber qué resultados nocivos podemos provocar y que, además, pueden pasar desapercibidos durante generaciones.

Otra vía de desarrollo de este enfoque consiste en la combinación de las CRISPR con la inteligencia artificial, a modo de fusión emergente-evolutiva. Con los datos suficientes, podría solicitarse una determinada serie de características en este grupo, utilizar los algoritmos para diseñar experimentos de CRISPR necesarios para conseguirlo y, así, se habría diseñado un nuevo ser humano o una nueva especie. Nada menos.

Como explicaba Leo Rosten, «cuando no sabes hacia qué lugar lleva la carretera, es indudable que te llevará hasta ese lugar». He aquí la paradoja existencial.

Lo que me lleva de vuelta al dilema planteado al principio del capítulo. Durante la primera mitad del siglo XX, movidos por motivaciones similares, aprendimos a crear sustancias químicas para propósitos concretos, como los pesticidas; y, pese a que la producción agrícola creció (un resultado deseable), nos enfrentamos también al problema plasmado en *Primavera silenciosa*, de Rachel Carson.⁹ Con el tiempo encontramos maneras de mitigarlo, pero el problema sigue ahí.

El desafío para la sociedad es someter todo esto a un orden civilizado. Hay que encontrar modos de funcionamiento que permitan la autorreparación en cada fase de la construcción de los sistemas complejos. No bastan un enfoque descendente, ni uno ascendente: la reparación debe operar en cada fase e incidir en el modo de funcionar tanto de la sociedad como de la tecnología.

El mundo complejo de nuestros días se enfrenta a este dilema existencial, la fusión entre lo emergente y lo evolutivo.

Hemos avanzado hasta dejar atrás el universo de Descartes y Ryle y los grandes fenomenólogos.

Esta maquinaria oculta un espíritu; y los espíritus pueden ser benévolos o diabólicos. Los benévolos nos beneficiarán enormemente: los medios de transporte han beneficiado la movilidad, los medicamentos, la salud y las comunicaciones, nuestra vida social y familiar. Del mismo modo, la computación ayuda a desarrollar las maravillas y tecnologías que utilizamos a diario. El ser humano debe entender la tecnología y darle forma. Si somos capaces de construir sistemas con un conocimiento claro y razonado sobre qué tipos de emprendimiento humano no son aceptables, nos guiamos por criterios de relevancia y procedencia y dotamos de fiabilidad a los sistemas, entonces se podrán conjugar la educación, la sanidad, la agricultura, las finanzas y todos los demás elementos esenciales para ser humanos civilizados y ciudadanos del planeta, por el bien de todos.

Por el contrario, si esta cuestión no se aborda de un modo juicioso, a escala mundial y otorgando un papel capital al reino de la naturaleza, la historia humana podría muy bien seguir el mismo camino que exponía este memorable fragmento de *2010: Odisea Dos*, de Clarke: «El espíritu se había marchado; solo dejó tras de sí unas motas de polvo juguetonas, que retomaron sus movimientos aleatorios en el aire».

Notas

1. Tiwari, Sandip (2012): «Paradise lost? Paradise regained? Nanotechnology, man and machine», en AA VV, *Fronteras del conocimiento*, Madrid, OpenMind/BBVA, 2012.
2. «Inteligencia artificial» fue un término acuñado por John McCarthy a finales de la década de 1950 para designar la llegada del *software* y el *hardware* (la lógica y el procesamiento lógico) a un nivel de capacidad equiparable a la inteligencia humana. En aquellos tiempos, la «cibernética» de Norbert Wiener se refería a la combinación de técnicas (relativas al control, la estadística, la información y los patrones) para la construcción de sistemas inteligentes. Sin duda, en nuestros días el aprendizaje automático está más cerca de la cibernética.
3. Simon, Herbert A. (1962): «The architecture of complexity», en *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 106, n.º 6, pp. 467-482.
4. Koestler, Arthur (1967): *The Ghost in the Machine*, Londres, Hutchinson & Co. Este libro seguía la línea de *The Act of Creation*, que abordaba la creatividad. *The Ghost in the Machine*, por su parte, analizaba la conducta destructiva humana y atribuía estas acciones al rápido crecimiento del cerebro humano, con impulsos destructivos que se imponían a la construcción lógica. El trabajo moderno en neurociencia atribuye una parte considerable del comportamiento humano al flujo entre la capa superior (el córtex frontal) y las capas inferiores, que tardaron mucho más tiempo en desarrollarse.
5. «CRISPR can speed up nature –and change how we grow food». Disponible en <https://www.wired.com/story/crispr-tomato-mutantfuture-of-food/> [consultado el 19/09/2018].
6. Kahneman, Daniel (2011): *Thinking Fast and Slow*, Nueva York, Farrar, Straus y Giroux.
7. Sapolsky, Robert M. (2017): *Behave. The Biology of Humans at Our Best and Worst*, Londres, Bodley Head.
8. Arthur Koestler atribuye a este corto periodo de evolución del córtex el error que representa el rasgo agresivo. Es interesante que a los seres humanos les desagrade el «tipo equivocado» de agresión, pero que, en «el contexto adecuado», la admiren. Esta agresión adopta muchas formas y puede estar vinculada al pensamiento, las emociones o la acción; ser ofensiva o defensiva; ser impulsiva o premeditada; ser emocional, a sangre fría o en caliente; hacerse por placer; y ser una agresión desplazada, cuando, al ser dañados por una persona, lo pagamos con un tercero más débil. El ser humano es un maestro de la agresión, muy por encima del resto del reino animal, gracias a su desarrollado cerebro. El citado corto periodo de evolución también debe de tener algo que ver con las dos morales expuestas por Nietzsche: la «moral del amo», que valora la fuerza, la belleza, la valentía y el éxito, y la «moral del esclavo», que valora la amabilidad, la empatía y la conmiseración.
9. Carson, R. (1962): *The Silent Spring*, Boston, Houghton Mifflin. [Ed. esp. (2016): *Primavera silenciosa*, Barcelona, Crítica.]



Joanna J. Bryson
University of Bath

Joanna J. Bryson es una investigadora transdisciplinar de la estructura y las dinámicas de la inteligencia artificial que simula las inteligencias humana y animal. Su investigación, que abarca desde la autonomía y la ética de los robots hasta la cooperación de estos con las personas, se ha publicado en foros tan distintos como Reddit o la revista *Science*. Es graduada en Psicología por las Universidades de Chicago y Edimburgo, y en Inteligencia Artificial por la Universidad de Edimburgo y el MIT. También cuenta con experiencia investigadora en Princeton, Oxford, Harvard y LEGO, y técnica en la industria financiera de Chicago y en consultoría internacional. En la actualidad es profesora asociada de la Universidad de Bath.

Libro recomendado: O'Reilly, Tim (2017): *WTF? What's the Future and Why It's Up to Us* [Qué es el futuro y por qué depende de nosotros], Nueva York, Harper Business.

La inteligencia artificial (IA) es una expresión técnica referida a artefactos empleados para detectar contextos o llevar a cabo acciones en respuesta a contextos detectados. Nuestra capacidad de construir dichos artefactos ha aumentado y, con ello, el impacto que tienen en nuestra sociedad. Este capítulo empieza documentando los cambios sociales y económicos propiciados por nuestro uso de la IA en particular, pero no exclusivamente en la década transcurrida desde la aparición de los teléfonos inteligentes (2007), que contribuyen de manera sustancial a los macrodatos y, por tanto, a la eficacia del aprendizaje de las máquinas. A continuación esboza los desafíos políticos, económicos y personales que esperan a la humanidad en el futuro inmediato y propone políticas regulatorias. En líneas generales, la IA no es una tecnología tan inusual como se esperaba, y precisamente por esa razón los desafíos que plantea pueden ser más apremiantes. En concreto, la identidad y la autonomía tanto de individuos como de naciones están amenazadas por el creciente acceso al conocimiento.

1. Introducción

En la última década, y en especial en los últimos años, la inteligencia artificial (IA) se ha transformado; no tanto respecto a lo que podemos hacer con ella sino en lo que hacemos. Para algunos, esta fase se inició en 2007 con la llegada de los teléfonos inteligentes. Como explicaré a continuación, en realidad la inteligencia es solo inteligencia, ya sea animal o artificial. Se trata de una forma de computación y, como tal, de transformación de la información. La abundancia de información personal, resultado de la vinculación voluntaria de una parte ingente de la sociedad a internet, nos ha permitido trasladar un gran caudal de conocimiento explícito e implícito de la cultura humana obtenido por medio de cerebros humanos a formato digital. Una vez ahí, podemos utilizarlo no solo para funcionar con una competencia propia de humanos, también para generar más conocimiento y acciones mediante la computación automatizada.

Durante décadas, incluso antes de la creación del término, la IA suscitó tanto miedo como interés, cuando la humanidad contemplaba la posibilidad de crear máquinas a su imagen y semejanza. La expectativa de que los artefactos *inteligentes* tenían que ser, necesariamente, *humanoides* nos ha distraído de un hecho importante: hace ya algún tiempo que hemos logrado la IA. Los avances de la IA a la hora de superar la capacidad humana en actividades como el ajedrez (Hsu, 2002), el juego del Go (Silver *et al.*, 2016) y la traducción (Wu *et al.*, 2016) llegan ahora a los titulares, pero la IA está presente en la industria desde, al menos, la década de 1980. Por entonces los sistemas de normas de producción o sistemas «expertos» se convirtieron en la tecnología estándar para comprobar circuitos impresos y detectar el fraude con tarjetas de créditos (Liao, 2005). De modo similar, hace tiempo que se emplean estrategias de aprendizaje automático (AA), como los algoritmos genéticos, para problemas computacionales de muy difícil resolución, como la planificación de sistemas operativos informáticos y redes neuronales, para modelizar y comprender el aprendizaje humano, pero también para tareas básicas de control y supervisión básicas en la industria (Widrow *et al.*, 1994). Durante la década de 1990, los métodos probabilísticos y bayesianos revolucionaron el AA y sentaron las bases de algunas de las tecnologías de IA predominantes hoy: por ejemplo, la búsqueda a través de grandes masas de datos (Bishop, 1995). Esta capacidad de búsqueda incluía la posibilidad de hacer análisis semánticos de textos en bruto que permiten a los usuarios de la red encontrar los documentos que buscan entre billones de páginas web con solo escribir unas cuantas palabras (Lowe, 2001; Bullinaria y Levy, 2007).

Los avances de la IA a la hora de superar la capacidad humana en ciertas actividades llegan ahora a los titulares, pero la IA está presente en la industria desde, al menos, la década de 1980

Esta capacidad de descubrimiento de la IA se ha ampliado no solo por el incremento masivo de los datos digitales y la capacidad de computación, también por las innovaciones en los algoritmos de IA y AA. Hoy buscamos fotografías, vídeos y audio (Barrett *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2016). Podemos traducir, transcribir, leer labios, interpretar emociones (incluidas las mentiras), falsificar firmas y otros tipos de escritura manual y manipular vídeos (Assael *et al.*, 2016; Eyben *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2017; Haines *et al.*, 2016; Reed *et al.*, 2016; Vincent, 2016; Hancock *et al.*, 2007; Chung y Zisserman, 2017; Schuller *et al.*, 2016; Sartori *et al.*, 2016; Thies *et al.*, 2016). Podemos —y esto es crucial— falsificar audios o vídeos durante retransmisiones en directo,





lo que nos permite elegir las palabras de las que serán «testigos» millones de personas, sobre todo en el caso de famosos, como los políticos, sobre los que ya existe gran cantidad de datos para componer modelos precisos (Thies *et al.*, 2016; Suwajanakorn *et al.*, 2017). Mientras escribía este capítulo se acumulaban pruebas crecientes de que los resultados tanto de las elecciones presidenciales estadounidenses de 2016 y el referéndum sobre la salida de la Unión Europea de Reino Unido (el famoso Brexit) habían sido alterados por la detección mediante IA y el direccionamiento de mensajes hacia votantes indecisos a través de las redes sociales (Cadwalladr, 2017a, 2017b; ICO, 2018), por no mencionar las herramientas mejoradas mediante IA que se emplean en ciberataques (Brundage *et al.*, 2018). La IA ya está aquí, a nuestra disposición y nos beneficia a todos. Sin embargo, sus consecuencias para nuestro orden social no se entienden y, además, hasta hace poco apenas eran objeto de estudio (Bryson, 2015). Pero también hoy, gracias a los avances en la robótica, la IA está entrando en nuestro espacio físico en forma de vehículos, armas, drones y dispositivos domésticos autónomos, incluidos los «altavoces inteligentes» (micrófonos en realidad) e incluso consolas de videojuegos (Jia *et al.*, 2016). Cada vez estamos más rodeados —integrados incluso— de percepciones, análisis y (cada vez más) acciones automatizadas generalizadas.

¿Cuáles han sido y serán los efectos de la IA generalizada? ¿Cómo puede una sociedad regular la influencia de la tecnología en nuestras vidas? En este capítulo empiezo presentando un conjunto claro y conciso de definiciones de los términos relevantes. Acto seguido, analizo las preocupaciones que suscita la tecnología y algunas soluciones propuestas. Por último, formulo varias recomendaciones resultado de mis estudios —cuya eficacia está por probar— sobre el valor de las vidas humanas individuales en un contexto en que las capacidades individuales humanas corren un riesgo cada vez mayor de verse desplazadas por la automatización.

2. Definiciones

Las definiciones siguientes no son de uso universal, pero proceden de un texto clásico sobre IA (Winston, 1984), así como del estudio de la inteligencia biológica (Barrows, 2000, atribuido a Romanes, 1883). Su elección se basa en su claridad expositiva, al menos en relación con este capítulo, sobre los efectos actuales y potenciales de la inteligencia, en especial en las máquinas. La *inteligencia* es la capacidad de hacer lo correcto en el momento correcto, en un contexto en que no hacer nada (no cambiar de comportamiento) sería peor. Por lo tanto, la inteligencia requiere:

- capacidad de percibir *contextos* de acción,
- capacidad de *actuar* y
- capacidad de *asociar* determinados contextos a determinadas acciones.

De acuerdo con esta definición, las plantas son inteligentes (Trewavas, 2005), y también un termostato (McCarthy, 1983; Touretzky, 1988). Todos ellos pueden percibir el contexto y responder a él, por ejemplo, las plantas reaccionan a la dirección de la luz y los termostatos a la temperatura. A continuación clasificamos un sistema como *cognitivo* si es capaz de modificar su inteligencia, cosa que las plantas y los termostatos (al menos, los mecánicos) no pueden hacer. Los sistemas cognitivos pueden aprender nuevos contextos y acciones y/o asociaciones entre los primeros y las segundas. Ya estamos más cerca de la definición convencional de «inteligente».



Presentación del dispositivo de GoPro durante el congreso de desarrolladores I/O en San Francisco, en mayo de 2015. Este dispositivo incorpora 16 cámaras y usado con el *software* Jump, de Google, proporciona visión de 360 grados





La inteligencia, tal como defino aquí, es un subconjunto estricto de la *computación*, es decir, de transformación de la información. Hay que tener en cuenta que la computación es un proceso físico, no matemático: requiere tiempo, espacio y energía. La inteligencia es el subconjunto de la computación que transforma un contexto en acción.

Inteligencia artificial (IA), por convención, es un término empleado para describir artefactos (normalmente digitales) que amplían alguna de las capacidades relacionadas con la inteligencia natural. Así, los sistemas automáticos de visión, el reconocimiento de voz, el reconocimiento de patrones y los sistemas de producción fija (es decir, que no aprenden) se consideran ejemplos de IA y sus algoritmos están explicados en los libros de texto sobre esta materia (Russell y Norvig, 2009). En todos los casos, también se pueden considerar formas de computación, aunque lo que produzcan no constituya una acción en un sentido convencional. Con todo, si aceptamos el concepto de robótica aplicada al cuerpo (ver más adelante), podríamos ampliar esta definición hasta considerar IA *cualquier* artefacto que amplíe nuestras capacidades de percepción y acción. Sería una definición inusual, pero nos facilitaría entender mejor la naturaleza de los cambios que la IA trae a nuestra sociedad, al permitirnos examinar un historial de intervenciones tecnológicas más dilatado.

El término *aprendizaje automático* (AA) designa cualquier medio de programación de IA que requiera no solo una codificación manual, también un componente de generalización automatizada de los datos presentados por medio de la acumulación de estadísticas sobre ellos (Murphy, 2012; Erickson *et al.*, 2017). A menudo, aunque no siempre, el AA se limita a buscar regularidades en los datos asociadas a categorías de interés, lo que incluye oportunidades apropiadas para determinadas acciones. Asimismo, el AA se usa con frecuencia para deducir asociaciones y también para adquirir nuevas competencias de acción; por ejemplo, a partir de la demostración (Huang *et al.*, 2016).

La inteligencia es un subconjunto estricto de la *computación*, es decir, de transformación de la información. Hay que tener en cuenta que la computación es un proceso físico, no matemático: requiere tiempo, espacio y energía. La inteligencia es el subconjunto de la computación que transforma un contexto en acción

Debemos tener en cuenta que todo AA implica un componente programado manualmente. La mera conceptualización o descubrimiento de un algoritmo nunca conduce a la aparición espontánea de una máquina capaz de sentir o actuar. Por definición, toda IA es un *artefacto*, resultado de acciones humanas deliberadas. Para que haya aprendizaje, se debe construir primero algo diseñado para conectar una fuente de datos a una representación. Todos los sistemas inteligentes tienen una *arquitectura*, una configuración del flujo de energía e información, y casi todos incluyen emplazamientos donde se retiene la información llamados *memoria*. El diseño de esta arquitectura se denomina *ingeniería de sistemas*; esta es la fase en que se debe comprobar la seguridad y la validez de un sistema. En contra de algunas afirmaciones estrafalarias, pero inquietantemente frecuentes, la seguridad de la IA no es un campo de estudio nuevo. De hecho, la ingeniería de sistemas es anterior a los ordenadores (Schlager, 1956) y siempre ha sido un componente principal de la enseñanza de ciencias informáticas. La integración de la IA en el *software* se remonta mucho tiempo atrás, tal como he documentado en la introducción, de modo que cuenta con una larga trayectoria de seguridad en su diseño (por ejemplo, Bryson, 2003; Chessell y Smith, 2013).

Los *robots* son artefactos que sienten y actúan en el mundo físico y en tiempo real. De acuerdo con esta definición, un teléfono inteligente es un robot (doméstico). Además de micrófonos, cuenta con varios tipos de sensores propioceptivos que le permiten saber cuándo su orientación está cambiando o desapareciendo. Su rango de tareas abarca la interacción con su usuario y la transmisión de información, instrucciones incluidas, a otros dispositivos. Lo mismo se puede decir de algunas consolas de videojuegos y de los asistentes digitales domésticos: los «altavoces inteligentes» o micrófonos, como Google Home; Echo, de Amazon (Alexa), o Cortana, de Microsoft.



La seguridad de la IA no es un campo de estudio nuevo. De hecho, la ingeniería de sistemas es anterior a los ordenadores y siempre ha sido un componente principal de la enseñanza de ciencias informáticas

En términos técnicos, la *autonomía* es la capacidad de actuar como un individuo (Armstrong y Read, 1995; Cooke, 1999). Por ejemplo, un país pierde su autonomía bien si sus instituciones se desmoronan de manera que solo las acciones individuales de sus ciudadanos son eficaces, bien si sus instituciones están tan influidas por otros actores o gobiernos que no pueden determinar el rumbo del país por sí solas. Huelga decir que ambos extremos son muy inusuales. De hecho, entre animales sociales como los humanos, la autonomía nunca es absoluta (Gilbert *et al.*, 2012). Nuestra inteligencia individual determina muchas de nuestras acciones, pero algunas células pueden volverse cancerosas y atender a sus propios objetivos en detrimento de nuestro bienestar general (Hanahan y Weinberg, 2011). De un modo similar, entendemos que una familia, un lugar de trabajo o un gobierno influyan en nuestras acciones. También estamos sujetos a una influencia social muy superior de la que llegamos a ser conscientes (Devos y Banaji, 2003). Sin embargo se nos considera autónomos porque, en cierta medida, nuestra inteligencia individual también influye en nuestro comportamiento. Por consiguiente, un sistema técnico capaz de sentir el mundo y seleccionar una acción específica para el contexto en que se encuentre se denomina «autónomo» pese a que, en última instancia, sus acciones estén determinadas por los diseñadores que desarrollaron su inteligencia y los que lo operan. Los operarios pueden influir en la IA en directo y lo harán, de hecho, de antemano, al configurar los parámetros de su funcionamiento, lo que incluye cuándo y dónde funciona, si es que lo hace. Así pues, los diseñadores crean el sistema y determinan sus capacidades; en especial, a qué información puede acceder y qué acciones puede efectuar. E incluso si un diseñador decide introducir un componente de azar en sistema de IA, como la dependencia del entorno en que se encuentre o un generador de números aleatorios, dicha inclusión no deja de ser una elección deliberada.

3. Preocupaciones sobre la IA y la sociedad

La IA es fundamental para algunas de las empresas con más éxito de la historia en términos de capitalización del mercado: Apple, Alphabet, Microsoft y Amazon. Junto a la tecnología de la información y la comunicación (TIC) en general, la IA ha revolucionado el acceso de personas de todo el mundo al conocimiento, el crédito y otras ventajas de la sociedad global contemporánea. Dicho acceso ha contribuido a una reducción masiva de la desigualdad mundial y la pobreza



extrema, por ejemplo, al permitir que los granjeros conozcan los precios justos y los cultivos más rentables y darles acceso a predicciones meteorológicas precisas (Aker y Mbiti, 2010).

La IA se beneficia de décadas de política regulatoria: hasta ahora su despliegue e investigación ha sido en gran medida objeto de una regulación creciente y de una inversión masiva por parte del gobierno y otros inversores de capital (Brundage y Bryson, 2017; Miguel y Casado, 2016; Technology Council Committee on Technology, 2016). Pese a que buena parte de la atención de apartados posteriores del presente capítulo se centra en los posibles motivos o mecanismos de la restricción normativa de la IA, hay que subrayar que:

1. Cualquier política de IA debería ser desarrollada e implementada teniendo en cuenta la importancia de respetar también los impactos positivos de la tecnología.²
2. Nadie habla de introducir nueva regulación para la IA, puesto que la IA ya se integra en un marco regulatorio (Brundage y Bryson, 2017; O'Reilly, 2017). Lo que se debate es si se debe optimizar dicho marco.
3. Hasta el momento y en su mayor parte, la regulación ha sido constructiva, de modo que los gobiernos proporcionaban enormes recursos a las empresas y universidades que desarrollaban la IA. Incluso unas restricciones regulatorias fundamentadas y bien diseñadas pueden conducir a un crecimiento más sostenible e, incluso, más rápido.

Dicho esto, académicos, tecnólogos y el público en general han planteado varias preocupaciones que podrían apuntar a una necesidad de subregulación o restricciones específicas. Smith (2018), presidente de Microsoft, afirmaba hace poco:

La tecnología [inteligente]³ plantea cuestiones que apelan a la protección de derechos humanos fundamentales, como el derecho a la privacidad o a la libertad de expresión. Estas cuestiones aumentan la responsabilidad de las empresas tecnológicas que crean dichos productos. En mi opinión, también reclaman una regulación gubernamental razonada y el desarrollo de normas sobre los usos aceptables. En una república democrática, nada puede reemplazar la toma de decisiones por parte de nuestros representantes electos ante las cuestiones que requieran de encontrar un equilibrio entre la seguridad pública y la esencia de nuestras libertades democráticas.

En este apartado clasifico los riesgos percibidos en función de los requerimientos de políticas que pueden generar. Asimismo, analizo si se trata de falsos problemas, problemas de TIC o de la tecnología más generales o problemas específicos de la IA y, en cada caso, propongo un posible remedio.

3.1. La inteligencia artificial general y la superinteligencia Empezaré analizando algunas de las afirmaciones más sensacionalistas: «Cuando la inteligencia artificial se desarrolle hasta el punto de superar las capacidades humanas, podría llegar a tomar el control de nuestros recursos y superar a nuestra especie, lo que conduciría a la extinción de la humanidad». Como he mencionado en el apartado 1, la IA es ya sobrehumana en muchos ámbitos. Las máquinas ya nos permiten calcular mejor, jugar mejor al ajedrez y al Go, transcribir mejor el habla, leer mejor los labios, recordar más cosas y durante más tiempo e, incluso, ser más rápidos y más fuertes. Pese a que dichas capacidades han sido disruptivas para las vidas humanas en facetas como el mercado laboral (ver a continuación), en ningún caso han dotado a las máquinas de ambición.

Para algunos, la falta de ambición de las máquinas o su incapacidad de dominarnos se deben a que las formas de IA producidas hasta ahora no son lo bastante generales. La expresión *inteligencia artificial general* (IAG) se emplea para designar dos cosas distintas: (a) una IA capaz de aprenderlo todo y sin límites y (b) una IA parecida a la humana. Estos dos significados



de la IAG suelen mezclarse, lo cual es incoherente, dado que la inteligencia humana adolece de limitaciones importantes. Comprender las limitaciones de la inteligencia humana es instructivo, puesto que también están relacionadas con los límites de la IA.

Las limitaciones de la inteligencia humana tienen dos causas: la combinatoria y el sesgo. La primera, la *combinatoria*, es un problema universal que afecta a toda la computación y, por lo tanto, a toda la inteligencia natural y artificial (Sipser, 2005). Si un agente es capaz de llevar a cabo 100 acciones, entonces es capaz de preparar 10.000 planes de dos fases. Dado que los humanos tienen capacidad de llevar a cabo más de 100 acciones diferentes y efectúan más de dos incluso en un solo día, queda claro que el espacio de las estrategias posibles es de una enormidad inabarcable y de difícil conquista, con independencia de la magnitud de la inteligencia que lo intente (Wolpert, 1996b).

No obstante, la ciencia informática ha demostrado que algunas formas de explorar estos espacios inabarcables son más eficaces que otras; al menos, con determinados objetivos (Wolpert, 1996a). En lo relativo a la inteligencia, la búsqueda concurrente y simultánea por muchos procesadores puede resultar eficaz siempre que se pueda dividir el espacio del problema y la solución, una vez encontrada, se pueda reconocer y también comunicar (Grama, 2003). La razón por la cual la tecnología humana es mucho más avanzada que la de otras especies radica en que somos mucho más eficaces en esta estrategia de búsqueda concurrente, gracias a nuestra capacidad única para compartir avances o «trucos» mediante el lenguaje (Dennett, 2013; Bryson, 2008, 2015; Van Schaik *et al.*, 2017). El creciente ritmo de transformación de nuestra cultura se debe, en parte, a la abundancia sin precedentes de personas con buen nivel educativo y de salud y conectadas mediante TIC, pero también a la mejora de nuestras búsquedas gracias a la computación automática. Nuestras crecientes capacidades en IA y en computación más general incrementan nuestro potencial de exploración; la computación cuántica podría acelerar todavía más este proceso (Williams, 2010). Sin embargo, estas ventajas no son gratuitas. Efectuar dos cálculos a la vez puede duplicar la velocidad de computación si la tarea es perfectamente divisible, pero sin duda duplica también la cantidad de espacio y energía necesarios. La computación cuántica es concurrente en el espacio y también en el tiempo, pero sus costes en energía son todavía desconocidos y, muy probablemente, desorbitados.

El creciente ritmo de transformación de nuestra cultura se debe a la abundancia de personas con buen nivel educativo y de salud y conectadas mediante TIC, pero también a la mejora de nuestras búsquedas gracias a la computación automática

Gran parte del inmenso crecimiento de la IA en los últimos tiempos se ha debido a la mejora en «minería» de datos mediante AA de los descubrimientos ya existentes, tanto de la humanidad como de la naturaleza en general (Caliskan *et al.*, 2017; Moeslund y Granum, 2001; Calinon *et al.*, 2010). Los resultados de parte de nuestra computación anterior se almacenan en nuestra cultura y la evolución biológica también se puede interpretar como una búsqueda paralela masiva cuyos resultados se acumulan de un modo muy ineficiente, con una velocidad limitada a la capacidad de reproducción de los mejores genes. Cabe esperar que esta estrategia de minería de soluciones pasadas no tarde en estancarse, cuando la inteligencia artificial y la natural lleguen a compartir la frontera (la misma, pero todavía en expansión) del conocimiento existente.

La segunda fuente de limitaciones para la inteligencia humana, que antes denominé «sesgo», es específica de nuestra especie. Dados los problemas de combinatoria, cada especie explora solo un pequeño subconjunto de soluciones posibles, una especialización que en AA



se denomina *sesgo*. La naturaleza precisa de cualquier inteligencia biológica forma parte de su nicho evolutivo, que rara vez será compartido con otras especies biológicas, más allá de que tengan necesidades y estrategias de supervivencia similares (Laland *et al.*, 2000). Por lo tanto, compartimos muchos de nuestros atributos cognitivos, como la capacidad de percepción y acción y, lo que es muy importante, las motivaciones, con otros simios. Pero también tenemos motivaciones y capacidades específicas que reflejan nuestra naturaleza altamente social (Stoddart, 1990). No hay inteligencia, de la magnitud que sea, que lleve consigo una necesidad intrínseca de competitividad social ni que imponga el deseo de ser aceptado por el grupo al que pertenece, dominar un grupo ajeno o lograr el reconocimiento dentro del propio. Estas son motivaciones subyacentes en la cooperación y la competición humanas resultado de nuestra historia evolutiva (Mace, 1998; Lamba y Mace, 2012; Jordan *et al.*, 2016; Bryson *et al.*, 2017); además, incluso cambian de una persona a otra (Herrmann *et al.*, 2008; Van Lange *et al.*, 1997; Sylwester *et al.*, 2017). Para los humanos, las organizaciones sociales que varían como respuesta a un contexto político y económico constituyen un mecanismo de supervivencia importante (Stewart *et al.*, 2018).

Desde la perspectiva de un artefacto, nada de esto es necesario; es más, puede resultar hasta incoherente. Los artefactos los diseñan los humanos, no son producto de la evolución. Estos actos intencionados de creación con autoría humana⁴ no solo comportan una responsabilidad humana, también un paisaje por entero distinto de recompensas potenciales y limitaciones de diseño (Bryson *et al.*, 2017; Bryson, 2018).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la IAG es, obviamente, un mito; de hecho, dos mitos ortogonales:

1. Por vasta que sea, ninguna inteligencia natural o artificial será capaz de resolver todos los problemas.
2. Es muy poco probable que, incluso si es extremadamente potente, una IA se parezca demasiado a la inteligencia humana, porque encarnará un conjunto por completo distinto de motivaciones y funciones de recompensa.

Estos razonamientos no nos protegen de otro problema relacionado. *Superinteligencia* es un término que describe la situación en que un sistema cognitivo no solo aprende, sino que aprende cómo aprender. Una vez más, surgen dos cuestiones. En primer lugar, una inteligencia debería ser capaz de crecer rápidamente, a modo de bola de nieve, hasta dejar de ser comprensible para el análisis humano convencional. En segundo, aunque dicha inteligencia fuera diseñada de modo que tuviera objetivos que coincidieran con las necesidades humanas, podría desarrollar por sí misma unos objetivos imprevistos incompatibles con estas. Por ejemplo, un robot que juega al ajedrez podría aprender a disparar a unas personas que lo privan de los recursos suficientes para mejorar su juego porque lo apagan de noche; o un robot archivador podría convertir el planeta entero en clips para asegurarse de que todos los papeles potencialmente existentes se puedan ordenar de forma adecuada (Bostrom, 2012).

Estos dos ejemplos resultan ridículos si recordamos que todos los sistemas de IA están diseñados bajo la responsabilidad humana. Nadie ha creado nunca un programa de ajedrez con información sobre recursos ajenos al tablero de juego (con la posible excepción del tiempo), ni con la capacidad de disparar un arma de fuego. La elección de la capacidad y los componentes de un sistema informático también forma parte de su arquitectura. Como ya he dicho, la ingeniería de sistemas de una arquitectura constituye un componente importante para la seguridad de la IA existente y, como explicaré más adelante (apartado 4.3), también puede ser un medio importante de regular la IA.



Pero el concepto de superinteligencia no es ridículo en sí mismo: no hay duda de que los sistemas que aprenden a aprender pueden tener un crecimiento exponencial y, de hecho, lo hacen. El error que cometen los agoreros de la superinteligencia radica en pensar que esta situación es solo uno de los futuros posibles. De hecho, se trata de una excelente descripción de la cultura humana de los últimos 10.000 años, desde la invención de la escritura (Barnosky, 2008; Haberl *et al.*, 2007). La potenciación de la inteligencia humana mediante la tecnología ha desembocado, en realidad, en un sistema que no se ha diseñado con cuidado y que genera efectos no deseados. Algunos de dichos efectos son muy peligrosos, como el calentamiento del planeta y la reducción de la diversidad de las especies. List y Pettit (2011) exponen un argumento similar cuando califican de «IA» organizaciones humanas como las grandes corporaciones o los gobiernos.

Retomaré la cuestión de la importancia de la arquitectura y el diseño, pero vale la pena resaltar una vez más la necesidad de que existan sesgos y límites. Los robots hacen especialmente evidente que el comportamiento no solo depende de la capacidad de computación, también de otros atributos del sistema, como las capacidades físicas. La manipulación digital, como la mecanografía o tocar la flauta, está fuera del alcance tanto de un teléfono inteligente como de una serpiente, por inteligentes que sean. Con las motivaciones sucede lo mismo: a menos que diseñemos un sistema con objetivos antropomórficos, percepción social y capacidades de comportamiento social, no aprenderá a producir un comportamiento social antropomórfico, como el intento de dominar la conversación, una empresa o un país. Si hay grandes corporaciones que demuestran estas características, son la expresión de las personas que la integran y también la manera indisciplinada y descontrolada en la que han crecido y adquirido poder. De modo que es posible que un sistema de IA (por lo menos según la definición de List y Pettit [2011]) manifieste superinteligencia, y habría que desarrollar por tanto regulaciones que lo eviten.

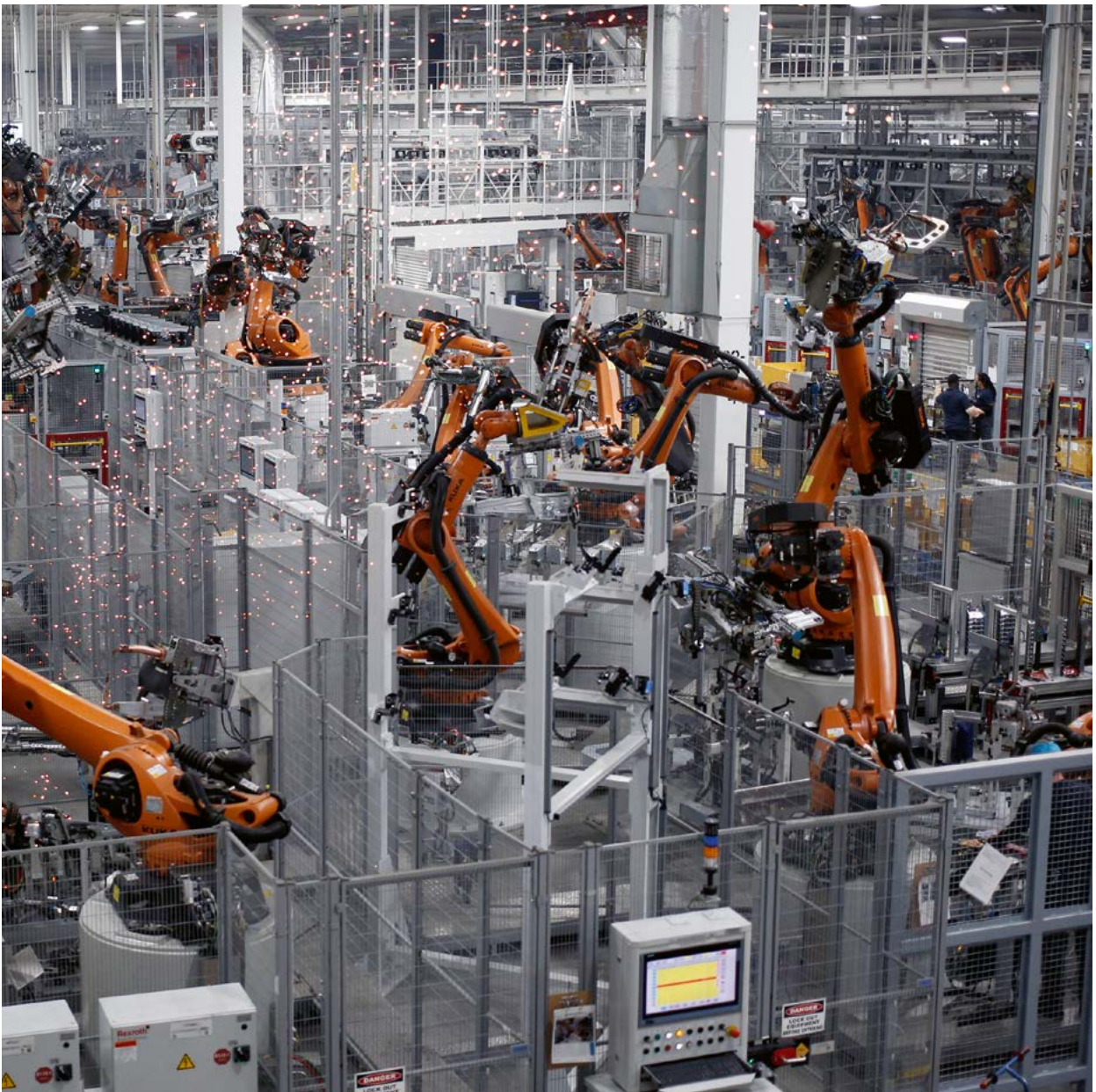
A partir de lo expuesto concluyo que el problema de la superinteligencia es real pero no específico de la IA; por el contrario, es un problema al que ya se enfrentan nuestras culturas. La IA es hoy un factor que contribuye a nuestra capacidad de sobresalir, pero también podría conducirnos a aprender cómo autorregularnos mejor (es decir, gobernarnos), como ha hecho varias veces en el pasado (Milanovic, 2016; Scheidel, 2017). Por otra parte, aunque la IAG fuera una realidad y la metáfora biológica de la IA y la selección natural tuviera fundamentos sólidos, no habría razones para creer que la IA vaya a provocar nuestra extinción. Nosotros no hemos provocado la extinción de las múltiples especies (en especial, microbianas) de las que dependemos directamente. Reflexionar sobre las consecuencias no deseadas de un crecimiento exponencial de la inteligencia de todo nuestro sistema sociotécnico (en lugar de solo de la IA), sin embargo, suscita preocupaciones más sustanciales.

3.2. Desigualdad y empleo Durante siglos, la sustitución de los trabajadores por medio de la tecnología ha suscitado temores de gran relevancia (Autor, 2015). No cabe duda de que las nuevas tecnologías cambian las sociedades, las familias y las vidas, pero tampoco de que, históricamente, la mayor parte de ese cambio ha sido positivo (Pinker, 2012). En general, la esperanza de vida es mayor y la mortalidad infantil es más baja que nunca; se trata de buenos indicadores de la satisfacción de los humanos, dado que la baja mortalidad infantil está muy relacionada con la estabilidad política (King y Zeng, 2001).

No obstante hay disrupciones que conducen al conflicto político y, según algunas hipótesis recientes, podrían estar relacionadas con el auge de la IA. La desigualdad de renta (y, cabe presumir, de riqueza) muestra una correlación muy elevada con la polarización política (McCarty *et al.*, 2016). La polarización política se define como la incapacidad de los partidos



Robots soldando componentes para vehículos en la planta de ensamble de Bayerische Motoren Werke AG (BMW) en Greer, Carolina del Sur, mayo de 2018





políticos de cooperar en un sistema de gobierno democrático, pero los periodos de polarización se caracterizan también por un incremento de políticas identitarias y extremismos. La polarización política y la desigualdad de renta están correlacionadas, pero se desconoce cuál es la causa y cuál la consecuencia, puesto que no se comprenden bien los factores subyacentes (Stewart *et al.*, 2018). Lo que sí se sabe es que la última vez que estos indicadores fueron tan altos como ahora (al menos en la OCDE) fue inmediatamente antes y después de la Primera Guerra Mundial. Por desgracia, fueron necesarias décadas de innovación de las políticas, una crisis financiera mundial y la Segunda Guerra Mundial para que la desigualdad y la polarización se redujeran radicalmente y se estabilizarán durante el periodo comprendido entre 1945 y 1978 (Scheidel, 2017), sin olvidar que en algunos países, como Estados Unidos y Reino Unido, bastó la crisis financiera.

Por fortuna hoy sabemos cómo responder ante esta situación: la redistribución reduce la desigualdad. Después de la Segunda Guerra Mundial, los tipos impositivos rondaban el 50%, se desarrollaron o consolidaron los estados del bienestar modernos, se bloqueó la extracción transnacional de riqueza (Bullough, 2018) y tanto la desigualdad de renta como la polarización política se mantuvieron bajas durante más de veinte años. En aquella época, además, los salarios crecían al ritmo de la productividad (Mishel, 2012). Sin embargo, hacia 1978, los salarios se estancaron y tanto la desigualdad como la polarización política empezaron a crecer, de nuevo, en la OCDE.⁵ ¿Cuál fue la causa? Hay muchas teorías al respecto, pero dada la crudeza del cambio según muchos indicadores, parece que se debió más a las políticas que a la tecnología. Podría resultar de los cambios geopolíticos del momento; por ejemplo, podría señalar el punto en que los miembros económicamente influyentes de la OCDE detectaron el fin de la Guerra Fría y dejaron de lado las políticas diseñadas para combatir la amenaza comunista.

En lo que respecta a la IA y con independencia de sus causas, el hecho de que a finales del siglo XIX se dieran unas tendencias políticas y económicas similares significa que no es un fenómeno relacionado con una tecnología concreta. Aunque, como ya he dicho, todavía no hay consenso sobre las causas, mi investigación en curso junto a otros autores⁶ analiza el argumento de que algunas tecnologías reducen costes que tradicionalmente habían mantenido la diversidad del sistema económico. Por ejemplo, unos costes de transporte elevados pueden inducir a una persona a que busque un bien determinado en un proveedor cercano en lugar de encontrar el mejor proveedor del mundo. De un modo similar, la falta de transparencia en la información o de escalabilidad de la capacidad puede conducir a un uso más diverso de los proveedores. Las innovaciones técnicas (también en el proceso empresarial) pueden superar estos costes y permitir el predominio de un número relativamente pequeño de empresas. Los ejemplos de finales del siglo XIX podrían incluir el uso del petróleo, el ferrocarril y el telégrafo, así como la mejora del transporte de mercancías y la distribución de periódicos.

Cuando unos pocos proveedores acaparan el negocio, también acaparan la riqueza. La gobernanza es uno de los principales mecanismos de redistribución (Landau, 2016), de modo que las revoluciones tecnológicas podrían requerir revoluciones en la gobernanza para recuperar un equilibrio (Stewart *et al.*, 2018). El Estado del bienestar podría ser un ejemplo (Scheidel, 2017). Más adelante volveré a analizar la posible necesidad de innovaciones en la gobernanza (apartado 4).

Volviendo a la IA o, más concretamente, a las TIC, aunque no son las únicas tecnologías que contribuyen a la desigualdad y la polarización política, sí podrían ser las que más lo hacen. Por otra parte, la atención que tanto el público como los estamentos políticos están dedicando a la IA puede brindarnos oportunidades de estudiar y abordar las principales causas de la desigualdad y la polarización, en especial si la IA se interpreta como una crisis (Tepperman, 2016). Merece la pena que nos detengamos en una hipotética consecuencia de la polarización. Un



incremento de políticas identitarias podría conducir a un uso aumentado de las creencias para señalar el estatus o la afiliación de endogrupos (Iyengar *et al.*, 2012; Newman *et al.*, 2014), lo que, por desgracia, reduciría proporcionalmente su utilidad a la hora de predecir o describir el mundo; es decir, para reflejar los hechos. Por lo tanto, la era de la información podría no ser una era universal de conocimiento, sino una era de desinformación.⁷

Este uso de las creencias como indicador de endogrupos podría influir en otra característica preocupante de la política contemporánea: la pérdida de la confianza en los expertos. Pese a que este fenómeno esté en ocasiones alimentado por expertos que hacen un uso irresponsable (e incluso abusivo) de su posición, en general perder el acceso a las opiniones de los expertos es catastrófico. La explosión combinatoria de conocimientos mencionada en el apartado 3.1 también significa que nadie, por inteligente que sea, puede llegar a dominar todo el conocimiento humano en una vida. Si la sociedad ignora los depósitos de conocimiento especializado que ha construido (mediante la financiación de la educación superior con el dinero del contribuyente), estará en considerable desventaja. La preocupación por la naturaleza y las causas de la «verdad alternativa» nos lleva al siguiente conjunto de problemas, relativos al uso de la información personal.

3.3. Privacidad, libertad personal y autonomía Al reflexionar sobre el impacto de la IA en el comportamiento individual, nos adentramos en un territorio donde es más claro el impacto único de las TIC. Hemos vivido largos periodos de espionaje doméstico, que se ha vinculado con todo tipo de cosas, desde un sesgo en el acceso a las oportunidades basado en prejuicios hasta los pogromos. Sin embargo, hoy las TIC nos permiten mantener registros de larga duración de cualquier individuo que produzca datos almacenables; por ejemplo, cualquiera con facturas, contratos, dispositivos digitales o un historial de crédito, por no mencionar cualquier escrito publicado o el uso de redes sociales. Esto incluye, básicamente, a todo el mundo.

No es solo el almacenamiento y la accesibilidad de los registros digitales lo que cambia nuestra sociedad; es también el hecho de que dichos registros se puedan escrutar mediante algoritmos de reconocimiento de patrones. Hemos perdido la premisa por defecto del anonimato por opacidad (Selinger y Hartzog, 2017). Hasta cierto punto, hoy todos somos famosos: a cualquiera nos puede identificar un desconocido, ya sea mediante un programa de reconocimiento facial, por los datos de nuestras compras o por nuestros hábitos en las redes sociales (Pasquale, 2015). Estos pueden indicar, además de nuestra identidad, nuestras predisposiciones políticas o económicas y qué estrategias podrían ser eficaces para modificarlas (Cadwalladr, 2017a, b). El AA nos permite descubrir nuevos patrones y periodicidades hasta ahora inconcebibles; por ejemplo, que la elección de unas determinadas palabras o, incluso, la presión al escribir a mano con un lápiz digital pueden indicar un estado emocional, incluido si alguien miente (Bandyopadhyay y Hazra, 2017; Hancock *et al.*, 2007), o que un patrón de uso de redes sociales predice categorías de personalidad, preferencias políticas e, incluso, los logros en la vida (Youyou *et al.*, 2015).

El aprendizaje automático ha abierto las puertas a unas capacidades casi humanas e incluso sobrehumanas en la transcripción del habla a partir de la voz y el reconocimiento de emociones a partir de la grabación de audio o vídeo, además de la falsificación caligráfica o la manipulación de imágenes (Valstar y Pantic, 2012; Griffin *et al.*, 2013; Eyben *et al.*, 2013; Kleinsmith y Bianchi-Berthouze, 2013; Hofmann *et al.*, 2014; Haines *et al.*, 2016; Reed *et al.*, 2016; Vincent, 2016; Thies *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2017). Por otra parte, cuanto mejor sea el modelo de que disponemos sobre la probabilidad de que alguien haga algo, menos información necesitaremos para deducir cuál será su paso siguiente (Bishop, 2006; Youyou *et al.*, 2015). Este



principio permite la falsificación a partir de la elaboración de un modelo sobre la escritura o la voz de una persona, combinarlo con un texto y producir una «predicción» o transcripción de cómo es probable que dicha persona escriba o pronuncie el texto (Haines *et al.*, 2016; Reed *et al.*, 2016). Ese mismo principio podría permitir a estrategias políticas identificar qué votantes son susceptibles, si no de cambiar de partido preferido, al menos sí de incrementar o reducir su probabilidad de ir a votar y, por consiguiente, dedicar recursos a convencerlos de que lo hagan. Se supone que una estrategia así ha sido determinante en las recientes elecciones en Reino Unido y Estados Unidos (Cadwalladr, 2017a, b; ICO, 2018); de ser cierto, lo más probable es que estos métodos hayan sido probados en otras elecciones anteriores sometidas a una vigilancia menos rigurosa.

Por lo tanto, en nuestra sociedad sería razonable que las personas temieran la difusión de sus acciones o sus creencias por dos razones: en primer lugar, porque facilita hacer predicciones sobre ellas y, en consecuencia, manipularlas; y, en segundo, porque las expone a la persecución por parte de aquellos que desapruaban sus creencias. Esta persecución podría ir desde el acoso hasta el fracaso profesional o pérdida de oportunidades organizativas o empresariales e incluso, en sociedades inestables (o inmorales, al menos) el encarcelamiento o la muerte a manos del Estado. El problema de estos temores no se limita a la tensión que supone para quien los experimenta, también que, al inhibir la libertad personal y de expresión, reducen el número de ideas que se difunden en una sociedad en conjunto y, de este modo, limitan nuestra capacidad de innovar (Mill, 1859; Price, 1972). Responder tanto a las oportunidades como a los desafíos requiere creatividad y librepensamiento en todos los ámbitos de la sociedad.

3.4. Autonomía empresarial, ingresos y responsabilidad Estas reflexiones sobre la autonomía personal nos conducen directamente al último conjunto de problemas que presento aquí y que rara vez se menciona. La biología teórica nos explica que, cuando aumenta la comunicación, la probabilidad de cooperación es superior (Roughgarden *et al.*, 2006). Por otra parte, pese a que la cooperación a menudo es maravillosa, también se puede ver como la transferencia de una parte de la autonomía de la persona hacia un grupo (Bryson, 2015). Podemos recuperar las definiciones del apartado 2, según las cuales el grado de autonomía de una entidad equivale al grado en que determina sus acciones. Lograr autonomía individual requiere sacrificar la autonomía grupal, y viceversa, si bien es cierto que hay maneras de organizar los grupos que proporcionan un grado mayor o menor de libertad a sus integrantes. Por tanto, quizá los límites a la libertad personal que acabo de describir sean el resultado natural de una capacidad de comunicación mayor. Una vez más estoy hablando de las TIC en su conjunto, pero la IA y el AA, gracias a su capacidad para acelerar la búsqueda tanto de soluciones como de colaboradores, son sin duda un componente significativo de esta tendencia, hasta el punto, posiblemente, de cambiar las reglas del juego.

Lo irónico es que muchas personas consideran que, a cuantos más datos, mejor, pero ¿mejor para qué? La estadística básica nos enseña que el número de observaciones que necesitamos para hacer una predicción está limitado por el grado de variación en dichos datos, siempre suponiendo que sean una verdadera muestra aleatoria de su población.⁸ La cantidad de datos que necesitamos en ciencia o medicina podría limitarse a una fracción minúscula de una determinada población. Sin embargo, si queremos dirigirnos a algunas personas en particular, controlarlas, disuadirlas o, incluso, promoverlas, necesitamos «saberlo todo» de ellas.

Con todo, a nivel de grupo, modificar los costes y beneficios de la inversión puede tener consecuencias más allá de la privacidad y la libertad. Las TIC pueden desdibujar las distinciones entre el cliente y la empresa o, incluso, la definición de una transacción económica,



algo que hasta ahora había pasado en gran medida desapercibido (ver Perzanowski y Schultz, 2016; Frischmann y Selinger, 2016). Hoy los clientes trabajan en beneficio de las empresas cuyos servicios o productos adquieren: buscan el precio de los alimentos que compran y los embolsan, introducen datos en los cajeros automáticos de los bancos, rellenan formularios para las aerolíneas, etcétera (Bryson, 2015). El valor de este trabajo no se remunera directamente, sino que damos por supuesto que repercute en una reducción implícita del precio de los productos, de modo que nuestra cesión de trabajo en beneficio de estas corporaciones se podría considerar una especie de trueque. Asimismo, este trabajo no está cuantificado, por lo que desconocemos el valor del ahorro que genera. En este sentido, las TIC propician un mercado negro o, cuando menos, opaco, que reduce la renta medida y, por consiguiente, los ingresos fiscales cuando los impuestos se basan en los beneficios o ingresos declarados. Este problema es aplicable a cualquier persona que utilice servicios e interfaces de internet, aunque pasemos por alto las problemáticas definiciones de empleo que plantean las plataformas en línea (ver, sin embargo, O'Reilly, 2017). Por otra parte, nuestra creciente capacidad de obtener valor y poder al tiempo que evitamos que se reflejen en los impuestos podría ayudar a explicar el misterio del supuesto estancamiento de nuestra productividad (Brynjolfsson *et al.*, 2017).

Esta dinámica alcanza su máxima crudeza en el caso de los servicios «gratuitos» en red. Está claro que recibimos información o entretenimiento a cambio de datos o atención. Si consumimos un contenido que va acompañado de publicidad, ofrecemos a los que nos lo suministran la oportunidad de influir en nuestro comportamiento. Lo mismo se puede decir de modos menos convencionales de presión sutil, como las hipotéticas intervenciones políticas mencionadas en el apartado 3.3. No obstante, estos intercambios solo se cuantifican (cuando se cuantifican) de forma agregada y cuando la empresa que presta el servicio es evaluada económicamente. Gran parte de los datos se recogen incluso de un modo especulativo y pueden tener escaso valor hasta que se les encuentra un uso innovador años más tarde.

Las TIC pueden desdibujar las distinciones entre el cliente y la empresa o, incluso, la definición de una transacción económica, algo que hasta ahora había pasado en gran medida desapercibido

Nuestra creciente incapacidad a la hora de cuantificar los ingresos ahí donde se hacía tradicionalmente (sobre los ingresos o durante el intercambio) podría ser otra causa del aumento de la desigualdad de la riqueza, dado que se reduce la parte de la economía que es reconocida, gravada y redistribuida. Una solución obvia sería gravar la riqueza misma (por ejemplo, el valor de mercado de una empresa), en lugar de los ingresos. La era de la información puede facilitar el seguimiento de la distribución de la riqueza y hacer más viable esta estrategia que en el pasado, en especial dada la dificultad de monitorizar los ingresos, que se agrava incluso mientras escribo este texto. Claro que no sirve si la riqueza se grava solo en el país en que la empresa tiene su domicilio social (a menudo, un paraíso fiscal). Puesto que podemos ver la transferencia internacional de datos y el flujo de servicios, en teoría deberíamos poder divulgar la consiguiente redistribución en proporción al volumen y el valor de los datos transmitidos. Imponer un sistema como este a escala internacional requeriría innovaciones considerables, dado que los impuestos convencionales son gestionados por los gobiernos y apenas existen gobiernos transnacionales. Sin embargo, sí existen tratados internacionales y zonas económicas organizadas. Los países grandes o las economías coordinadas como el



Cualquier política de IA debería ser desarrollada e implementada teniendo en cuenta la importancia de respetar también los impactos positivos de la tecnología

Miembros del Parlamento Europeo durante una votación de la Eurocámara en la sede de Estrasburgo, Francia, marzo de 2018

741

742

743

744

745

#ALL FOR IAN

656

657

658

659

660

569

570

571

572

573

485

488

489

403

404

407

326

327

328

329

254

255

256

257

253





Área Económica Europea pueden tener capacidad para exigir una redistribución equitativa para sus ciudadanos a cambio del privilegio del acceso a ellos. China ha demostrado con éxito que este acceso no es algo que deba darse por supuesto; y, de hecho, bloquear el acceso puede facilitar el desarrollo de competencia local. Ciudades y estados norteamericanos están usando estrategias similares contra plataformas como Uber y Airbnb.

Los impuestos sobre la riqueza derivadas de las TIC nos adentran en una propuesta de distorsión de la ley que resulta especialmente peligrosa. En 2016, el Parlamento Europeo proponía que la IA o los dispositivos robóticos estuvieran sujetos a gravamen como «personas electrónicas». Es una pésima idea (Bryson *et al.*, 2017) que permitiría a las empresas automatizar parte de su proceso de negocio y dividir la parte relevante de tal forma que limitara sus responsabilidades tanto legales como fiscales.

La idea de gravar a los robots con impuestos goza de un atractivo populista por dos razones. En primer lugar, parece de sentido común que, si los robots «nos están quitando el trabajo», tengan que «pagar impuestos» y, de este modo, «mantenernos» mediante el Estado del bienestar. En segundo lugar, a muchas personas les atrae la idea de que podamos alargar la vida humana (o algo más esencial de la humanidad que la vida en sí) de un modo artificial mediante la IA o la robótica. Por desgracia, se trata de ideas incoherentes que parten de la ignorancia sobre la naturaleza de la inteligencia.

Como describía el apartado 3.1, ambos argumentos se basan en la premisa de que *inteligente* equivale, en parte, a *humanoide*. Aunque es indudable que esta palabra se ha usado con este significado en nuestra cultura, las definiciones presentadas en el apartado 2 dejan claro que la equivalencia es falsa. Empezando por la segunda cuestión, debemos recordar que los valores, las motivaciones e, incluso, la estética de un simio aculturado no se pueden divulgar mediante un dispositivo que no comparte en absoluto nuestra experiencia física corpórea («fenomenológica») (Bryson, 2008; Claxton, 2015; Dennett, 2017). Nada que construyamos a partir de metal y silicio compartirá jamás nuestra fenomenología de la forma que lo hacen una rata o una vaca. Sin embargo, son pocos los que consideran estos animales vehículos viables de nuestra posteridad.

Gravar a los robots con impuestos y pensar que podemos alargar la vida humana mediante la IA goza de un atractivo populista, pero son ideas que parten de la ignorancia sobre la naturaleza de la inteligencia

Por otra parte, la idea de que trasladar una mente humana a la tecnología digital (si esto fuera posible siquiera) daría a esta una mayor longevidad o, incluso, la inmortalidad es ridícula. Los formatos digitales tienen una vida útil media no superior a los cinco años (Lawrence *et al.*, 2000; Marshall *et al.*, 2006). En este caso, la falacia consiste en confundir la computación con una modalidad matemática. La matemática es pura, eterna y cierta, pero ello se debe a que no es real: no se manifiesta en el mundo físico y no puede actuar. Por el contrario, la computación sí es real. Como se ha dicho, la computación necesita tiempo, espacio y energía (Sipser, 2005). Se requiere espacio para almacenar estados (memoria) y no hay una manera permanente de conseguir un almacenamiento de este tipo (Krauss y Starkman, 2000).

Volviendo a la idea, en apariencia más práctica de gravar con impuestos las entidades de IA, una vez más pasa por alto su falta de humanidad. En concreto, la IA no es contable,



como lo son las personas. La misma crítica es aplicable al apoyo de Bill Gates a los impuestos sobre los robots, aunque no defendiera que se les otorgue una personalidad jurídica (*The Economist*, 2017). No existe un equivalente a los «caballos de potencia» para medir el número de humanos a los que sustituye un algoritmo. Como ya he dicho, frente a una innovación acelerada, no podemos monitorizar ni siquiera el valor de las transacciones con participantes humanos. Cuando llega una tecnología nueva, durante un breve periodo podríamos ver a cuántos humanos deja sin trabajo, pero incluso este cálculo parece reflejar más el estado de la economía actual que el valor real del trabajo reemplazado (Autor, 2015; Ford, 2015). Es decir, en épocas de bonanza, una empresa mantendrá y seguirá formando a sus empleados experimentados, pero en épocas de crisis las corporaciones usarán la coyuntura de excusa para reducir sus plantillas. Aunque el cambio inicial en el empleo fuera un indicador de la «potencia humana» reemplazada, las tecnologías cambian rápidamente las economías en las que se integran y el valor del trabajo humano también varía a gran velocidad.

Es esencial recordar que los artefactos son, por definición, fruto del diseño. Dentro de los límites de las leyes de la física y la computación, gozamos de plena autoría sobre la IA y la robótica. Por consiguiente, los desarrolladores podrán evadir los impuestos de modos inconcebibles para los legisladores acostumbrados al valor fruto del trabajo humano. El proceso de descomponer una corporación en «personas electrónicas» automatizadas magnificaría los actuales problemas derivados del abuso de la personalidad jurídica, como las empresas fantasma que se emplean para blanquear dinero. La consideración, ya restringida, de las grandes empresas como personas jurídicas perdería sentido si no emplearan a ningún trabajador humano (Solaiman, 2016; Bryson *et al.*, 2017).

4. Los próximos diez años: soluciones y futuros

Me gustaría reiterar que, como explicaba al principio del apartado 3, la IA ha sido y es un factor asombroso de crecimiento económico y empoderamiento individual. Nos permite conocer, aprender, descubrir y hacer cosas que habrían sido inconcebibles hace cincuenta años. Podemos pasear por una ciudad desconocida, cuyo idioma desconocemos, orientarnos y comunicarnos. Podemos beneficiarnos de la educación que nos brindan las mejores universidades del mundo en nuestra casa, aunque vivamos con un salario reducido en una economía en desarrollo (Breslow *et al.*, 2013). También en el mundo en desarrollo, podemos utilizar el teléfono inteligente local para consultar los precios justos de varios productos agrícolas y otra información útil, como las predicciones meteorológicas, de modo que incluso los agricultores de subsistencia pueden escapar de la pobreza extrema gracias a las TIC. El increíble ritmo al que avanza el Proyecto del Genoma Humano no es más que un ejemplo más de cómo toda la humanidad puede beneficiarse de esta tecnología (Adams *et al.*, 1991; Schena *et al.*, 1996).

Con todo, hay que abordar los problemas antes citados. A continuación expondré mis propuestas respecto a cada uno, empezando por los últimos que he sacado a colación. Seré breve, puesto que conocer las soluciones exige primero identificar los problemas y los problemas identificados aquí son solo propuestas sin consensuar. Además, ya se han sugerido enfoques distintos de enfrentar estos problemas, algo que explico y detallo a continuación.

4.1. Empleo y estabilidad social En el apartado 3.4 descarté la idea de que considerar a la IA como personas jurídicas pueda solucionar las disrupciones en el mercado laboral y la desigualdad de la riqueza que ya sufrimos. De hecho, la creación de personas electrónicas



Un teleprónter muestra a una estudiante que hace de «alumna virtual» en una clase del MIT grabada para cursos en línea en abril de 2013 en Cambridge, Massachusetts





jurídicas incrementaría la desigualdad, al permitir a las empresas y a los ricos eludir su responsabilidad a expensas de la población común. Ahora contamos con indicios sólidos de que los donantes ricos pueden empujar a los políticos a adoptar posturas extravagantes y extremistas (Barber, 2016), con unos resultados potenciales desastrosos si se combinan con una creciente presión en favor de la polarización política y las políticas identitarias. Asimismo, es importante tener en cuenta que no siempre los muy ricos revelan su riqueza.

En las democracias, otro desencadenante de periodos de marcada desigualdad y alta polarización son los resultados electorales ajustados, con candidatos que no se habría esperado que empataran. Esto por supuesto abre la puerta a (o al menos reduce el coste de) manipular resultados electorales, también por parte de poderes externos. Person (2018) sugiere que los países débiles pueden estar practicando un «equilibrio por intrusión negativa» contra los más fuertes, influyendo en elecciones y, por ende, en las capacidades de gobernanza y de autonomía, en un intento por reducir desequilibrios de poder a favor de la nación más débil.

Si hay personas o coaliciones de personas lo bastante ricas para reducir la eficacia de los gobiernos, entonces también los Estados perderán su autonomía, incluida la estabilidad de sus fronteras. La guerra, la anarquía y la inestabilidad que traen consigo no son deseables para nadie, con la posible excepción de quienes se benefician de actividades ilegales. Una estabilidad que permita planificar negocios y familias beneficia a todos. La llegada de las corporaciones transnacionales ha estado acompañada de un aumento sustancial del número y poder de otras organizaciones de carácter supranacional. Esto puede ser una buena noticia si ayudan a coordinar la cooperación en asuntos de interés transnacional, pero no hay que olvidar que la geografía siempre será un factor determinante de muchos asuntos de gobierno. Cómo está protegida la casa de nuestros vecinos contra incendios o si sus hijos están vacunados y bien educados son cosas que siempre afectarán nuestra calidad de vida. Agua potable, alcantarillado, seguridad individual, acceso a opciones de transportes... Los gobiernos locales seguirán teniendo un papel de extrema importancia en el futuro indefinido, incluso si algunas de esas funciones pasan a ser responsabilidad de corporaciones o de gobiernos transnacionales. Por tanto, necesitan contar con los recursos adecuados.

En el apartado 3.4 recomendaba, como posible solución al impacto de las TIC en la desigualdad, un cambio de prioridades, pasando de documentar y gravar los ingresos o beneficios a hacer lo propio con la riqueza. El mayor problema de esta propuesta es que podría requerir una redistribución internacional, no solo nacional, dado que las corporaciones más ricas de internet⁹ están concentradas en un solo país, pese a que no hay duda de que las que trabajan fuera de China (y cada vez más también las que operan en ese país) derivan su riqueza de su actividad en todo el mundo. Gestionar esta situación exigirá innovaciones importantes en las políticas. Por suerte, casi todas las partes implicadas, incluidas las principales corporaciones, tienen interés en evitar la guerra y otras formas de inestabilidad social y económica. Las guerras mundiales y las crisis financieras del siglo XX mostraron que este argumento era especialmente aplicable a los muy ricos, que, al menos desde el punto de vista económico, son los que más tienen que perder (Milanovic, 2016; Scheidel, 2017), aunque rara vez pierden la vida.

En especial me parecen admirables las soluciones flexibles ante la crisis económica aplicadas por Alemania durante la última recesión, con políticas que permitían a las empresas hacer despidos *parciales* de sus trabajadores, que a cambio obtenían prestaciones *parciales* y tiempo libre (Eichhorst y Marx, 2011, p. 80). Esto les permitía reciclar su formación al tiempo que mantenían, durante un periodo prolongado, un nivel de vida cercano al acostumbrado. También permitía a las empresas conservar a sus empleados más valiosos mientras cambiaba el rumbo de su negocio o, sencillamente, buscaban liquidez. Habría que fomentar este tipo de



flexibilidad, de modo que tanto los gobiernos como las personas conservaran su capacidad económica en largos periodos de crisis. De hecho, una flexibilidad suficiente puede evitar que los periodos de cambio intenso se conviertan en crisis.

En mi opinión, si podemos reducir la desigualdad también se reducirán los problemas de empleo, con independencia de que el cambio se acelere o no. Vivimos en una sociedad de una abundancia fastuosa y podemos permitirnos mantener, aunque sea parcialmente, a los individuos mientras vuelven a formarse. Y nuestra capacidad de innovación es fantástica. Si el dinero circula por la sociedad, las personas encontrarán la manera de emplearse y prestarse servicios entre sí (Hunter *et al.*, 2001; Autor, 2015). Una vez más, es posible que esto ya ocurra; desde luego explicaría la reducción en el ritmo de cambio en la sociedad que algunos autores afirman haber detectado (por ejemplo, Cowen, 2011). Es posible que muchas personas sigan encontrando vías para el autoempleo y, si tienen éxito, contraten a terceros produciendo servicios dentro de sus propias comunidades. Estos servicios pueden ser desde sociales, como la docencia, las labores policiales o el periodismo, familiares y domésticos, hasta estéticos, como el paisajismo, la restauración, la música, el deporte y otras actividades comunitarias.

Permitir o no a dichas personas vivir bien y disfrutar de las ventajas de su sociedad es una decisión de política económica. Por ejemplo, a todos nos gustaría que una familia pudiera permitirse una semana de vacaciones en una gran ciudad vecina o que sus hijos disfrutarán de movilidad social, por ejemplo con un acceso a las mejores universidades de elite de la zona de su elección basado en criterios puramente meritocráticos. Por supuesto, en este siglo esperamos un acceso universal y gratuito a la atención sanitaria y a la educación primaria y secundaria. Las personas deberían poder vivir con sus familias y no tener que perder gran parte del día desplazándose a y desde el lugar de trabajo; para ello hacen falta tanto una distribución determinada de las oportunidades laborales como una infraestructura de transporte excelente y ampliable (y, en consecuencia, probablemente pública).

Si podemos reducir la desigualdad, también se reducirán los problemas de empleo. Vivimos en una sociedad de una abundancia fastuosa y podemos permitirnos mantener, aunque sea parcialmente, a los individuos mientras vuelven a formarse

El nivel de inversión en una infraestructura de este tipo depende, en parte, de la inversión pública y privada en impuestos y también de cómo se gasta dicha riqueza. En el pasado, en ocasiones hemos dedicado gran parte de nuestros recursos a la destrucción de las infraestructuras de los demás y a la reparación de las propias, a causa de la guerra. Hoy, aunque evitemos los enfrentamientos armados abiertos, debemos abordar la necesidad de abandonar las viejas infraestructuras que ya no son viables a causa del cambio climático e invertir en otras nuevas. No hay duda de que ello plantea una oportunidad considerable de redistribución, en particular en ciudades ahora mismo deprimidas, como demostró el New Deal de Roosevelt, con políticas que redujeron la desigualdad en Estados Unidos mucho antes de la Segunda Guerra Mundial (McCarty *et al.*, 2016; Wright, 1974).

Coincido con quienes no creen que la renta básica universal sea un gran mecanismo de redistribución, por varias razones. En primer lugar, muchos esperan financiarla mediante el recorte de los servicios públicos, pero es posible que estos, a su vez, sean cada vez más necesarios a medida que números crecientes de personas queden relegadas por su incapacidad



para responder a las complejidades técnicas y económicas de un mundo en rápida transformación. En segundo lugar, he visto a demasiados individuos que ante las cámaras evitaban comprometerse, con el argumento de que «el gobierno nunca ha hecho nada por mí», sin tener en cuenta la enorme inversión en su educación y seguridad y en infraestructuras. Creo que una renta básica no tardaría en volverse invisible y a darse por supuesta, como parece suceder con la recogida de basuras y los servicios de urgencias.

Pero, sobre todo, preferiría que la redistribución restituyera su importancia a las comunidades cívicas locales; es decir, que circulara a través del empleo, ya fuera directo o a través de trabajadores autónomos y clientes. La IA y las TIC facilitan los vínculos con personas de todo el mundo; favorecen incluso fantasías de entretenimiento con tecnología de IA que no son humanas. Sin embargo, el bienestar de nuestros vecinos tiene un impacto gigantesco en el nuestro y, en muchos sentidos, ambos están ligados a través de la calidad del aire y el agua, la educación, los servicios de bomberos y urgencias y, por supuesto, la seguridad. Los mejores vecindarios están conectados por el conocimiento y la preocupación por las personas; es decir, por la amistad.

Un mecanismo efectivo de incrementar la redistribución consiste, simplemente, en subir los salarios mínimos (Lee, 1999; Schmitt, 2013). Aunque solo se aplique a los empleados del sector público, sus efectos se transmiten al resto de empresas, puesto que el sector público compite por los mejores trabajadores y, por supuesto, los mayores salarios también tienen la ventaja de incentivar a los buenos trabajadores a contribuir a la sociedad mediante el servicio público. Pese a que este mecanismo ha sido criticado por varias razones (ver, por ejemplo, Meyer, 2016), parecen existir pruebas sólidas de su impacto positivo general.

4.2. Privacidad, libertad e innovación Volviendo a los problemas relacionados de la privacidad y la autonomía individual, abordaré un área sobre la cual es más difícil hacer predicciones o estas son más dispares. No hay duda de que la era de la privacidad propiciada por la opacidad se ha terminado, dado que ahora tenemos más información y más medios para filtrarla y comprenderla que nunca antes; es muy improbable que esto cambie, a menos que un desastre de alcance mundial acabe con nuestra capacidad digital. No obstante, durante mucho tiempo hemos vivido en espacios donde nuestros gobiernos y nuestros vecinos podían, en teoría, arrebatarnos nuestra propiedad privada, pero rara vez lo hacían, excepto mediante un acuerdo previo, como los impuestos (Christians, 2009). ¿Podremos alcanzar un nivel de control similar sobre nuestros datos personales? ¿Podremos disfrutar de una privacidad y autonomía efectivas en la era de la información? De no ser así, ¿cuáles serían las consecuencias?

Para empezar, hay que decir que cualquier enfoque de la defensa de los datos personales y la protección de los ciudadanos ante la predicción, la manipulación o, simplemente, el control por medio de sus datos personales pasa por unos sólidos mecanismos de encriptado y ciberseguridad, *sin* puertas traseras. En la ciberseguridad, todas las puertas traseras han sido aprovechadas por actores malintencionados (Abelson *et al.*, 2015). La falta de ciberseguridad debería considerarse un riesgo significativo para la IA y para la economía digital, en especial en el internet de las cosas. Si no podemos confiar en los dispositivos inteligentes, o ni siquiera en los conectados, no deberían ser bienvenidos ni en casa ni en los lugares de trabajo (Singh *et al.*, 2016; Weber, 2010).

Analistas de la privacidad y su dimensión tecnológica han sugerido que los datos sobre una persona no deberían considerarse un activo, sino una *parte* de esa persona, es decir, una prolongación de su identidad individual. Como tales, los datos personales no pueden ser propiedad de nadie más que de la persona a la que se refieren; cualquier otro uso sería por cesión o por contrato y no puede traspasarse ni cederse a terceros sin consentimiento



(Crabtree y Mortier, 2015; Gates y Matthews, 2014). De este modo los datos personales se asemejarían más a la persona misma y, si fueran vulnerados, la persona afectada tendrá la protección de la ley. En este momento se están desarrollando varias innovaciones tecnológicas y jurídicas en consonancia con este modelo, aunque, dada la facilidad de acceso a los datos y la dificultad de demostrar dicho acceso, es posible que los datos sean mucho más difíciles de defender que la propiedad física de una persona (Rosner, 2014; Jentzsch, 2014). Por fortuna, ya hay al menos algunos gobiernos que han asumido la tarea de defender los intereses de sus ciudadanos en materia de datos (por ejemplo, con el Reglamento General de Protección de Datos de la Unión Europea [RGPD]; ver Albrecht, 2016, y Danezis *et al.*, 2014). Hay razones excelentes para hacerlo, porque, como ya he dicho, la extracción no deseada de datos masivos y la manipulación de las preferencias políticas individuales y de otros comportamientos personales a partir de los perfiles individuales de las redes sociales tienen consecuencias tanto políticas como económicas.

Las entidades mejor situadas para defender nuestra privacidad son los gobiernos, en principio mediante demandas judiciales colectivas contra, como mínimo, los ejemplos más indignantes de violación de los datos personales. Claro que dichas estrategias podrían requerir innovaciones importantes en el derecho internacional o los tratados internacionales, dado que algunas de las acusaciones de manipulación más famosas tienen que ver con los resultados electorales de países enteros. Sin ir más lejos, el referéndum sobre el Brexit, en Reino Unido, ha costado al país, en los dos años desde la votación (sin que se haya producido aún la salida efectiva de la Unión Europea), 23.000 millones de libras esterlinas en recaudación fiscal perdida al año, es decir, 440 millones de libras a la semana (Morales, 2018). Como ya mencioné, el referéndum sobre el Brexit estuvo al parecer influido por conocidos algoritmos de IA financiados, como se ha demostrado, por inversión extranjera (ICO, 2018). La paradoja es que reparar un perjuicio semejante requeriría, casi con total seguridad, colaboración internacional.

Por desgracia los gobiernos no siempre tienen como prioridad los intereses de sus ciudadanos o, al menos, no siempre y no todos sus intereses. De hecho, durante el siglo XX y en términos globales, un individuo tenía muchas más probabilidades de morir a manos de su propio gobierno que de alguien extranjero (Valentino, 2004). Más recientemente, China ha estado utilizando un sistema de vigilancia supuestamente dedicado a la seguridad de sus ciudadanos para destruir las vidas y las familias de más de un millón de habitantes, a los que ha encerrado en campamentos de reeducación por haberse declarado musulmanes (Human Rights Watch, 2018; Editorial, 2018). En términos más generales, cuando los gobiernos tienen miedo de que haya informantes o disidentes, o incluso eluden su responsabilidad de garantizar la dignidad y la prosperidad de todos los habitantes de su territorio, pueden recurrir a la represión y al asesinato, cosa que hacen a menudo. Es muy peligroso que un gobierno considere que gobernar a un grupo de personas dentro de sus fronteras entraña un coste o un problema superior a su valor colectivo potencial en términos de trabajo, seguridad e innovación. Esta grave amenaza se ve intensificada por la promesa y el auge de la automatización inteligente como fuente nueva y controlable y apropiable tanto de trabajo como de innovación. La exageración en el discurso sobre la IA incrementa el riesgo de que un gobierno minusvalore erróneamente vidas humanas y considere que su valor es inferior al coste percibido de mantenerlas.

No podemos saber con seguridad dónde desembocarán las tendencias actuales, pero es de esperar que, cuando se ejerza algún tipo de represión, la IA y las TIC serán los medios empleados para predecir esos díscolos potenciales y monitorizarlos. Se dice que China está usando sistemas de reconocimiento facial no solo para identificar a personas, también para interpretar su estado de ánimo y concentración, tanto en los campos de reeducación como en



las escuelas. Los estudiantes y, quizá, los profesores pueden ser castigados si no aparentan estar contentos con su educación (o reeducación). Los sistemas de TIC capaces de detectar el grado de comprensión y atención de los estudiantes y de informar a los profesores, a fin de que adapten su docencia y sus materiales, también se están promoviendo en Occidente y constituyen una parte esencial de la formación personalizada con IA fuera de las aulas convencionales. Cabe suponer que se están desarrollando y, probablemente, aplicando sistemas similares en otros sectores profesionales (por ejemplo, Levy, 2015).

Si permitimos que esta tendencia se mantenga, podemos esperar que nuestras sociedades ganen en seguridad (o, al menos, que haya más paz en las calles) y homogeneidad, pero pierdan capacidad de innovación y diversidad. Más personas que nunca cuentan con los medios y los recursos económicos para viajar de un país a otro, de modo que cabe esperar que los países que ofrezcan mayor calidad de vida, también en términos de gobernanza y protección individual, atraerán a personas preocupadas por la libertad personal. Podemos esperar también que, gracias al poder combinado del trabajo y la innovación de dichos inmigrantes y de la población existente, estos países puedan llegar a protegerse e, incluso, a proteger a otros. Ya hemos visto que la Unión Europea ejercía una protección de este tipo con regulaciones éticas para la IA, como el RGPD. Y Naciones Unidas trabaja con instrumentos, como el Acuerdo de París, a fin de protegernos a todos del cambio climático. En unas sociedades tan prósperas y bien gobernadas, sería de esperar un incremento de los niveles de libertad, no un descenso, a medida que aumente la concienciación sobre los problemas derivados de la vigilancia que ya practicamos; por ejemplo, en la microgestión del tiempo personal de nuestros hijos (Lee *et al.*, 2010; Bryson, 2015).

La exageración en el discurso sobre la IA incrementa el riesgo de que un gobierno minusvalore erróneamente vidas humanas y considere que su valor es inferior al coste percibido de mantenerlas

Por desgracia para esta visión optimista de los remansos de bienestar en que se convertirían los países bien gobernados, en la práctica la tecnología se utiliza, cada vez más, para frustrar toda la migración transfronteriza que no sea de élite (Miller, 2017). Además de los genocidios y las matanzas masivas, otra tendencia histórica observada a menudo en las guerras y las revoluciones políticas (por ejemplo, la Polonia ocupada por los nazis, la Checoslovaquia de la Guerra Fría, el Irán de la revolución, la Unión Soviética de Stalin, la Camboya de los jemeres rojos, la China de la Revolución Cultural y la actual Arabia Saudí) es el traslado forzoso o, incluso la ejecución no solo de disidentes, también de intelectuales. A menudo, se considera que mantener el control pasa por eliminar cualquier liderazgo potencial de signo innovador, aunque sea dicho liderazgo lo que se precisa para garantizar una ciudadanía sana y una sociedad estable (King y Zeng, 2001), por no hablar de un progreso tecnológico que otorgue ventaja en una carrera armamentística (Yan, 2006). Estos movimientos tienden a desmoronarse solo después de años de sufrimiento prolongado, a menudo después de haber durado lo suficiente para dejar claro que sus políticas dañaban la competitividad internacional del país. La IA facilita de manera asombrosa la identificación y el aislamiento de cualquier grupo a reprimir (o incluso de los individuos que muestran determinadas actitudes). Solo la innovación en los mecanismos de protección contra gobiernos corruptos, ególatras o peligrosos en general nos permitirá proteger la diversidad y la libertad en nuestras sociedades y, con ella, nuestra seguridad.



Una vez más, la capacidad de la IA al servicio del buen gobierno y sociedades más justas y sólidas es muy real y se está desarrollando ampliamente. Así, la IA se utiliza contra los delitos financieros, el fraude y el blanqueo de dinero y para la protección de personas, empresas y gobiernos frente a influencias ilícitas e ilegales (Ngai *et al.*, 2011). Se trata de algo razonable y parte de las obligaciones contractuales convencionales de los prestatarios de servicios financieros y, por supuesto, de los gobiernos. También puede ser ético que, cuando un ciudadano ha elegido un determinado comportamiento mediante un deseo expreso, sus dispositivos inteligentes u otros organismos le propinen «un empujoncito» para ayudarlo a cumplir con sus propósitos; por ejemplo, en relación con el ejercicio físico o los hábitos de sueño. Sin embargo, es importante reconocer los peligros crecientes tanto de la coerción explícita como de la desorientación implícita que acompañan el incremento masivo del conocimiento y el consiguiente poder derivado de la IA. Por lo tanto, la IA hace más urgente invertir en la investigación y el desarrollo de las humanidades y las ciencias sociales; en especial en ciencias políticas y sociología. A continuación abordo el problema de regular la IA.

4.3. La responsabilidad individual, empresarial y regulatoria por la IA Como punto de partida del debate sobre la responsabilidad en la era de la IA, me gustaría volver a poner el acento, con brevedad, en el papel del diseño y las arquitecturas en la IA. Quizá una vez más por la confusión de lo *inteligente* con lo *humano*, en ocasiones he oído decir que tal o cual característica de la IA es inevitable; lo he escuchado incluso de boca de expertos en este campo pertenecientes a organizaciones influyentes. No hay ningún aspecto de la IA que sea más inevitable que la esclavitud o el derecho hereditario a la monarquía. Por supuesto, ambos fenómenos siguen existiendo en algunos lugares, pero, pese a los beneficios económicos que representaban para los que ocupaban el poder, en gran medida han sido erradicados. De un modo similar, podemos regular como mínimo los productos comerciales legales para exigir arquitecturas seguras o, al menos, transparentes (Boden *et al.*, 2011). Podemos exigir (como ha hecho hace poco la Comisión Europea) que las decisiones que toman las máquinas sean identificables y explicables (Goodman y Flaxman, 2016).

Insistir en la responsabilidad humana de los sistemas de IA no significa que debamos (o podamos) responder del valor de cada peso en una red neuronal ni del impacto de cada dato individual empleado en su aprendizaje. No solo sería poco práctico, sino que no corresponde ni al criterio ni al medio por los cuales tienen que rendir cuentas las organizaciones hoy día. Una empresa no es responsable de la organización sináptica del cerebro de sus cuentas; es responsable del estado de estas. A decir verdad, la introducción de la IA en un proceso empresarial o de gobierno no supone demasiados cambios en cuanto a responsabilidad. Debemos ser capaces de caracterizar nuestros sistemas lo bastante bien para detectar si se están comportando de acuerdo con lo esperado (Liu *et al.*, 2017). Es algo factible y se debe fomentar (Bryson y Theodorou, 2019).

Promover la responsabilidad comporta garantizar la rendición de cuentas (Santoni de Sio y Van den Hoven, 2018). Un modo fácil de conseguirlo es hacer entender a gobiernos y fiscales que los sistemas de *software* tienen, en buena parte, los mismos problemas de responsabilidad que cualquier otro artefacto fabricado: si se les da un uso inadecuado, es culpa del propietario; si generan daños cuando se utilizan adecuadamente, están defectuosos y es probable que el fabricante sea el responsable, a menos que pueda demostrar que ha respetado la diligencia debida y que han concurrido circunstancias excepcionales. El mero hecho de que parte del sistema sea autónomo no invalida este argumento, del mismo modo que se puede atribuir al banco aquellos errores generados por sus contables o sus clientes cuando los sistemas del banco deberían haberlos limitado o alertado sobre ellos. Sin duda, esta cuestión nos plantea problemas; en especial porque son muchas las aplicaciones de la tecnología de IA en contextos



internacionales, pero organizaciones como la Unión Europea, Naciones Unidas y la OCDE se están esforzando para coordinar esfuerzos con los que proteger a sus ciudadanos.

Por supuesto los sistemas de IA no son exactamente como los sistemas más deterministas, pero exagerar las consecuencias de dichas diferencias es problemático. Las malas ideas pueden esconderse detrás de los «artificios» de la confusión que genera la IA sobre cuestiones de identidad y libertad de acción (Bryson, 2018). Una tendencia preocupante en la gobernanza de la IA es la tendencia a adoptar el *alineamiento de valores* como solución a problemas de la ciencia en general y de ética de la IA en particular. La idea es que se debe garantizar que la sociedad dirige y aprueba el rumbo que adoptan la ciencia y la tecnología (Soares y Fallenstein, 2014). Por muy seguro y democrático que suene esto, quizá sería mejor considerarlo un argumento populista. Empecemos por la ciencia: la ciencia es un mecanismo basado en principios que permite a la sociedad *percibir* su contexto con precisión. Por el contrario, la *gobernanza* es cómo elige una sociedad entre diferentes vías de acción posibles. El sentimiento popular no puede decidir qué es cierto sobre la naturaleza; solo determinar qué políticas son más fáciles de aplicar. Limitar la capacidad de una sociedad a percibir solo lo que quiere saber equivaldría a cegarla (Caliskan *et al.*, 2017; ver análisis final). De un modo similar, el sentir popular influye en gran medida en las políticas aplicadas, pero desde luego no las determina. Por lo tanto, preguntar a la población qué espera de la IA es como preguntarle qué película de ciencia ficción preferiría ver hecha realidad: no hay garantía alguna de que elijan algo factible (por no hablar de deseable). Los ciudadanos deben determinar, a través del gobierno, sus prioridades económicas y políticas, pero el verdadero progreso casi nunca se consigue mediante referéndum. Por el contrario, la gobernanza suele consistir en negociaciones informadas entre un número limitado de negociadores expertos, con el apoyo de un número mayor, aunque también limitado, de conocedores de la materia.

Una tendencia preocupante en la gobernanza de la IA es la tendencia a adoptar el *alineamiento de valores* como solución a problemas de la ciencia en general y de ética de la IA en particular

Asimismo, a pesar de los enormes recursos que la explotación de la computación y la IA hacen posibles, es probable que los negociadores humanos sigan siendo siempre la mejor elección a la hora de determinar políticas. En parte porque, en calidad de ciudadanos, podemos identificarnos con quienes representamos y establecer con ellos una relación de confianza y compromiso para gestionar las decisiones negociadas. Pero, sobre todo, los representantes humanos pueden ser responsabilizados y convencidos de maneras que siempre estarán vetadas a un sistema de IA. No podemos diseñar sistemas para que se impliquen en las decisiones sociales como lo hace la inteligencia humana (o, de hecho, la inteligencia de cualquier animal social) tras siglos de evolución. No podemos hacerlo mediante el diseño, porque, por su naturaleza, es un proceso que se puede descomponer, mientras que la evolución ha descubierto repetidamente que la preocupación por la posición social debe ser un elemento inextricable de la inteligencia de los individuos de cualquier especie que dependa de estrategias sociales para su supervivencia. Así, nuestro sistema de justicia se basa en la disuasión so pena de aislamiento, pérdida de poder o de posición social. No podemos aplicar estos criterios de justicia a las máquinas que diseñamos y no podemos exigir responsabilidades mediante máquinas que no diseñamos cuidadosamente (Bryson *et al.*, 2017; Bryson y Theodorou, 2019).



Por último, hay quienes han manifestado su preocupación por la potencial imposibilidad de regular la IA, dado su rápido ritmo de cambio. Es cierto que las capacidades humanas, incluida la de respuesta, son limitadas. Además, solo se pueden legislar a un ritmo determinado. De hecho, se introducen plazos y demoras en el proceso legislativo para garantizar que el ritmo de cambio no sea excesivo para la planificación tanto de las empresas como de las personas (Holmes, 1988; Cowen, 1992; Ginsburg, 2005; Roithmayr *et al.*, 2015). Por consiguiente no es de esperar que la legislación siga el ritmo de cambio cada vez más acelerado que generan la IA y las TIC. Ya he sugerido que un mecanismo para forjar políticas sensatas puede ser contar con expertos que trabajen a través de organizaciones profesionales describiendo estándares (Bryson y Winfield, 2017). En tal caso, el papel del gobierno se reduciría a supervisar esta labor y aplicar sus resultados. Los argumentos que he expuesto aquí (y en Bryson y Theodorou, 2019) podrían interpretarse como una generalización de este principio. Me refiero a que no necesitamos cambiar la legislación, basta asegurarnos de que las organizaciones que desarrollan o explotan la IA se responsabilizan de las consecuencias de las acciones de sus sistemas usando los mecanismos de control tradicionales. Solo entonces estas organizaciones se verán obligadas a innovar en transparencia tanto como en el resto de apartados, a fin de poder demostrar que siempre han seguido la diligencia debida en sus sistemas.

5. Conclusiones

La IA ya está cambiando la sociedad a un ritmo más rápido de lo que pensamos, pero no es una experiencia tan inédita ni única como a menudo nos hacen creer. Otros avances, como el lenguaje y la escritura, las corporaciones y los gobiernos, las telecomunicaciones y el petróleo, ya ampliaron antes nuestras capacidades, alteraron nuestras economías y trastocaron nuestro orden social; en general, aunque no siempre y no para todos, para mejor. La prueba de que, de media, estamos mejor gracias al progreso es, irónicamente, quizá, la mayor amenaza a que nos enfrentamos hoy: debemos conseguir una vida sostenible y evitar la desaparición de la biodiversidad.

No obstante, la IA en particular y las TIC en general podrían requerir innovaciones radicales en nuestro modo de gobernar y, en especial, de recaudar dinero para la redistribución de riqueza. Nos enfrentamos a transferencias de riqueza transnacionales propiciadas por innovaciones empresariales que nos han arrebatado la capacidad de medir o identificar siquiera el nivel de ingresos generado. Además, esta nueva moneda de valor incognoscible consiste a menudo en datos personales y los datos personales dan a quienes los poseen un inmenso poder de predicción.

Sin embargo, más allá de los problemas económicos y de gobernanza, debemos recordar que la IA amplía y mejora lo que significa ser humano; en particular, nuestra capacidad de resolución de problemas. Frente a los desafíos globales de seguridad y sostenibilidad, estas mejoras prometen seguir aportando una ayuda significativa, siempre que desarrollemos mecanismos adecuados para regularlas. Con un catálogo sensato de políticas y organismos de regulación, deberíamos seguir ampliando y, también, limitando cuando corresponda, el potencial de aplicación de la IA.

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a mis colaboradores; en especial, a Karine Perset por seleccionarme para la OCDE y por muchas buenas conversaciones, a mis (recientes) estudiantes de doctorado Andreas Theodorou y Rob Wortham, a Alan Winfield, con quien he trabajado revisando parte del contenido del presente artículo y ampliándolo para incluir el papel de las asociaciones profesionales (ver Bryson y Winfield, 2017), a Karen Croxson de la Financial Conduct Authority, la autoridad financiera de Reino Unido, y a Will Lowe, en especial por sus comentarios sobre los apartados relativos a las relaciones internacionales. Mi agradecimiento a la OCDE por autorizarme a reutilizar parte del material en trabajos académicos, como este libro. También quiero dar las gracias al AXA Research Fund por la financiación parcial de mi trabajo sobre la ética de la IA entre 2017 y 2020.

Notas

1. En mayo de 2017 entregué a la OCDE (por medio de Karine Perset) una versión anterior de este documento que llevaba por título «Current and potential impacts of artificial intelligence and autonomous systems on society» a modo de contribución a los trabajos y documentos de dicha organización previstos para finales de 2018 y principios de 2019.
2. Para un análisis positivo, ver los documentos de políticas sobre IA de la última etapa del gobierno Obama (Technology Council Committee on Technology, 2016; Executive Office of the President, 2016). Por razones de espacio y prioridades, en este capítulo no abordo el uso militar de la IA. Es un tema que ya abordan otros trabajos académicos de relevancia y que, en general, se regula por medio de mecanismos distintos que la IA comercial y doméstica. En todo caso, ver Brundage *et al.*, 2018 e ICRC, 2018.
3. En este caso, el reconocimiento facial.
4. La decisión de crear vida engendrando hijos es distinta. Pese a que podríamos tener la autoría de parte del cuidado de los niños, las disposiciones que acabo de analizar nos asemejan a otros primates, no son opciones que los padres puedan diseñar a su arbitrio.
5. Es importante señalar que, en términos mundiales, la desigualdad se está reduciendo claramente, gracias a las TIC y, posiblemente, a otros avances, como el movimiento por el altruismo efectivo y la filantropía basada en datos en el mundo desarrollado. Véase el análisis anterior, en el apartado 3 del presente artículo, y en Milanovic, 2016, Bhorat *et al.*, 2016, Singer, 2015 y Gabriel, 2017.
6. En especial, Nolan McCarty.
7. Sospecho que parte de las decisiones arriesgadas en política de alto nivel (por ejemplo, en la manipulación electoral) podrían ser obra de quienes temen la era de la información por sus consecuencias en lo referido a descubrimiento de delitos financieros, como el blanqueo y el fraude.

8. Esta advertencia es *muy* importante. Gran parte de los datos obtenidos a través de los gobiernos o la actividad comercial, por ejemplo, pueden presentar sesgos importantes en cuanto a quién representan o incluso en el nivel de calidad de la transcripción de los datos. Estos problemas pueden incrementar sustancialmente la cantidad de datos necesarios para alcanzar un determinado nivel de precisión en las predicciones (Meng, 2018).
9. En realidad, el mundo está dividido en dos internet, una dentro y la otra fuera de la «gran muralla cortafuegos» (Ensaft *et al.*, 2015). Además, ambas partes coinciden en contener un número pequeño y similar de empresas extremadamente exitosas que operan en la economía digital (Yiu, 2016; Dolata, 2017).

Bibliografía

- Abelson, H.; Yerson, R.; Bellovin, S. M.; Benaloh, J.; Blaze, M.; Diffie, W.; Gilmore, J.; Green, M.; Lyau, S.; Neumann, P. G. *et al.* (2015): «Keys under doormats: mandating insecurity by requiring government access to all data and communications», en *Journal of Cybersecurity*, vol. 1, n.º 1, p. 69.
- Adams, M. D.; KelleY, J. M.; Gocayne, J. D.; Dubnick, M.; Polymeropoulos, M. H.; Xiao, H. *et al.* (1991): «Complementary DNA sequencing: expressed sequence tags and human genome project», en *Science*, vol. 252, n.º 5.013, pp. 1651-1656.
- Aker, J. C. y Mbiti, I. M. (2010): «Mobile phones and economic development in Africa», en *Journal of Economic Perspectives*, vol. 24, n.º 3, pp. 207-232.
- Albrecht, J. P. (2016): «How the GDPR will change the world», en *European Data Protection Law Review*, vol. 2, n.º 3, pp. 287-289.
- Armstrong, H. y Read, R. (1995): «Western European micro-states and EU autonomous regions: the advantages of size and sovereignty», en *World Development*, vol. 23, n.º 7, pp. 1.229-1.245.
- Assael, Y. M.; Shillingford, B.; Whiteson, S. y De Freitas, N. (2016): «LipNet: Sentence-level lipreading», documento ArXiv en preimpresión, n.º 1611.01599.
- Autor, D. H. (2015): «Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation», en *The Journal of Economic Perspectives*, vol. 29, n.º 3, pp. 3-30.
- Bandyopadhyay, A. y Hazra, A. (2017): «A comparative study of classifier performance on spatial and temporal features of handwritten behavioural data», en A. Basu, A. Das, P. Horain y S. Bhattacharya (eds.) (2016): *Intelligent Human Computer Interaction: 8th International Conference*, Pilani, India, del 12 al 13 de diciembre, Proceedings, Springer International Publishing, Cham, pp. 111-121.
- Barber, M. J. (2016): «Ideological donors, contribution limits, and

- the polarization of american legislatures», en *The Journal of Politics*, vol. 78, n.º 1, pp. 296-310.
- Barnosky, A. D. (2008): «Megafauna biomass tradeoff as a driver of quaternary and future extinctions», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n.º 105 (suplemento 1), pp. 11.543-11.548.
- Barrett, D. P.; Barbu, A.; Siddharth, N. y Siskind, J. M. (2016): «Saying what you're looking for: linguistics meets video search», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 38, n.º 10, pp. 2.069-2.081.
- Barrows, E. M. (2000): *Animal behavior desk reference: a dictionary of animal behavior, ecology, and evolution*, Boca Ratón, CRC press.
- Bhorat, H.; Naidoo, K. y Pillay, K. (2016): «Growth, poverty and inequality interactions in Africa: an overview of key issues», notas de política del PNUD en África 2016-02, Nueva York, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Bishop, C. M. (1995): *Neural Networks for Pattern Recognition*, Nueva York, Oxford University Press.
- (2006): *Pattern Recognition and Machine Learning*, Londres, Springer.
- Boden, M.; Bryson, J.; Caldwell, D.; Dautenhahn, K.; L. Edwards, S. Kember et al. (2011): «Principles of robotics», *Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC)*. Disponible en <https://epsrc.ukri.org/research/ourportfolio/themes/engineering/activities/principlesofrobotics/>
- Bostrom, N. (2012): «The superintelligent will: motivation and instrumental rationality in advanced artificial agents», en *Minds and Machines*, vol. 22, n.º 2, pp. 71-85.
- Breslow, L.; Pritchard, D. E.; Deboer, J.; Stump, G. S.; Ho, A. D. y Seaton, D. T. (2013): «Studying learning in the worldwide classroom: research into edX's first MOOC», en *Research & Practice in Assessment*, n.º 8, pp. 13-25.
- Brundage, M.; Avin, S.; Clark, J.; Toner, H.; Eckersley, P.; Garfinkel, B.; Dafoe, A.; Scharre, P. et al. (2018): «The malicious use of artificial intelligence: forecasting, prevention, and mitigation», *Future of Humanity Institute, Universidad de Oxford, Centre for the Study of Existential Risk, Universidad de Cambridge, Center for a New American Security, Electronic Frontier Foundation y OpenAI*, informe técnico, basado en un taller celebrado en Oxford en febrero de 2017. Disponible en <https://maliciousaireport.com/>
- Brundage, M. y Bryson, J. J. (2017): «Smart policies for artificial intelligence», en preparación, disponible como documento ArXiv, n.º 1608.08196.
- Brynjolfsson, E.; Rock, D. y Syverson, C. (2017): «Artificial intelligence and the modern productivity paradox: A clash of expectations and statistics», Cambridge, National Bureau of Economic Research.
- Bryson, J. J. (2003): «The Behavior-Oriented Design of modular agent intelligence», en R. Kowalszyk, J. P. Müller, H. Tianfield y R. Unland (eds.), *Agent Technologies, Infrastructures, Tools, and Applications for e-Services*, Berlín, Springer, pp. 61-76.
- (2008): «Embodiment versus memetics», en *Mind & Society*, vol. 7, n.º 1, pp. 77-94.
- (2015): «Artificial intelligence and pro-social behaviour», en C. Misselhorn (ed.), *Collective Agency and Cooperation in Natural and Artificial Systems: Explanation, Implementation and Simulation*, Berlín, Springer, pp. 281-306.
- (2018): «Patience is not a virtue: the design of intelligent systems and systems of ethics», en *Ethics and Information Technology*, vol. 20, n.º 1, pp. 15-26.
- Bryson, J. J.; Diamantis M. E. y Grant, T. D. (2017): «Of, for, and by the people: the legal lacuna of synthetic persons», en *Artificial Intelligence and Law*, vol. 25, n.º 3, pp. 273-291.
- Bryson, J. J. y Theodorou, A. (2019): «How society can maintain human-centric artificial intelligence», en M. Toivonen-Noro y E. Saari (eds.), *Human-Centered Digitalization and Services*, Springer, próxima publicación.
- Bryson, J. J. y Winfield, A. F. T. (2017): «Standardizing ethical design for artificial intelligence and autonomous systems», en *Computer*, vol. 50, n.º 5, pp. 116-119.
- Bullinaria, J. A. y Levy, J. P. (2007): «Extracting semantic representations from word co-occurrence statistics: a computational study», en *Behavior Research Methods*, vol. 39, n.º 3, pp. 510-526.
- Bullough, O. (2018): «The rise of kleptocracy: the dark side of globalization», en *Journal of Democracy*, vol. 29, n.º 1, pp. 25-38.
- Cadwaladr, C. (2017a): «Revealed: How US billionaire helped to back Brexit. Robert Mercer, who bankrolled Donald Trump, played key role with "sinister" advice on using Facebook data», en *The Guardian*, 25 de febrero.
- (2017b): «Robert Mercer: The big data billionaire waging war on mainstream media», en *The Guardian*, 26 de febrero.
- Calinon, S.; D'halluin, F.; Sauser, E. L.; Caldwell, D. G. y Billard, A. G. (2010): «Learning and reproduction of gestures by imitation», en *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 17, n.º 2, pp. 44-54.
- Caliskan, A.; Bryson, J. J. y Narayanan, A. (2017): «Semantics derived automatically from language corpora contain human-like biases», en *Science*, vol. 356, n.º 6.334, pp. 183-186.
- Chessell, M. y Smith, H. C. (2013): *Patterns of information management*, Indianapolis, Pearson Education.
- Christians, A. (2009): «Sovereignty, taxation and social contract», en *Minnesota Journal of International Law*, n.º 18, p. 99.
- Chung, J. S. y Zisserman, A. (2017): «Lip reading in the wild», en S. H. Lai, V. Lepetit, K. Nishino y Y. Sato (eds.), *Computer Vision. ACCV 2016: 13th Asian Conference on Computer Vision, Taipei, Taiwan, November 20-24, 2016: Revised Selected Papers, Part II*, Cham, Springer International Publishing, pp. 87-103.
- Claxton, G. (2015): *Intelligence in the Flesh: Why Your Mind Needs Your Body Much More than It Thinks*, New Haven, Yale University Press.
- Comité Internacional de la Cruz Roja (2018): *Ethics and autonomous weapon systems: An ethical basis for human control?*, informe técnico, Ginebra, Comité Internacional de la Cruz Roja.
- Consejo Nacional de Espacio y Tecnología, Comisión de Tecnología (2016): «Preparing for the future of artificial intelligence», informe técnico, Oficina Ejecutiva del Presidente de Estados Unidos.
- Cooke, M. (1999): «A space of one's own: autonomy, privacy, liberty», en *Philosophy & Social Criticism*, vol. 25, n.º 1, pp. 22-53.
- Cowan, T. (1992): «Law as a public good: the economics of anarchy», en *Economics and Philosophy*, vol. 8, n.º 2, pp. 249-267.
- (2011): *The Great Stagnation: How America Ate All the Low-Hanging Fruit of Modern History, Got Sick, and Will (Eventually) Feel Better*, Old Saybrook, Tantor Media.
- Crabtree, A. y Mortier, R. (2015): «Human data interaction: Historical lessons from social studies and CSCW», en N. Boulus-Rodje, G. Ellingsen, T. Bratteteig, M. Aanstad y P. Bjørn (eds.), *ECSCW 2015: Proceedings of the 14th European Conference on Computer Supported Cooperative Work, 19-23 September 2015, Oslo, Norway*, Cham, Springer International Publishing, pp. 3-21.
- Danezis, G.; Domingo-Ferrer, J.; Hansen, M.; Hoepman, J. H.; Metayer, D. L.; Tirtea, R. y Schiffner, S. (2014): «Privacy and data protection by design—from policy to engineering», informe técnico, Heracidad, Agencia Europea de Seguridad de las Redes y de la Información.
- Deng, J.; Xu, X.; Zhang, Z.; Frühholz, S. y Schuller, B. (2017): «Universum autoencoder-based domain adaptation for speech emotion recognition», en *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, n.º 4, pp. 500-504.
- Dennett, D. C. (2013): *Intuition Pumps and Other Tools for Thinking*, Nueva York, WW Norton & Company.
- (2017): *From Bacteria to Bach and Back*, Londres, Allen Lane.
- Devos, T. y Banaji, M. R. (2003): «Implicit self and identity», en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1.001, n.º 1, pp. 177-211.

- Dolata, U. (2017): «Apple, Amazon, Google, Facebook, Microsoft: market concentration-competition-innovation strategies», en SOI Discussion Paper 2017-01, Stuttgarter Beiträge zur Organisations- und Innovationsforschung.
- Editorial (2018): «China's Orwellian tools of high-tech repression», en *The Washington Post*.
- Eichhorst, W. y Marx, P. (2011): «Reforming German labour market institutions: a dual path to flexibility», en *Journal of European Social Policy*, vol. 21, n.º 1, pp. 73-87.
- Ensafi, R.; Winter, P.; Mueen, A. y Cryall, J. R. (2015): «Analyzing the Great Firewall of China over space and time», en *Proceedings on privacy enhancing technologies*, abril, pp. 61-76.
- Erickson, B. J.; Korfiatis, P.; Akkus, Z.; Kline, T. y Philbrick, K. (2017): «Toolkits and libraries for deep learning», en *Journal of Digital Imaging*, pp. 1-6.
- Eyben, F.; Weninger, F.; Lehment, N.; Schuller, B. y Rigoll, G. (2013): «Affective video retrieval: violence detection in Hollywood movies by large-scale segmental feature extraction», en *PLoS ONE*, vol. 8, n.º 12, e78506.
- Ford, M. (2015): *Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless Future*, Londres, Oneworld.
- Frischmann, B. M. y Selinger, E. (2016): «Engineering humans with contracts», 493, en *Cardozo Legal Studies Research Paper*, n.º 493. Disponible en <https://ssrn.com/abstract=2834011>
- Gabriel, I. (2017): «Effective altruism and its critics», en *Journal of Applied Philosophy*, vol. 34, n.º 4, pp. 457-473.
- Gates, C. y Matthews, P. (2014): «Data is the new currency», en *Proceedings of the 2014 New Security Paradigms Workshop*, NSPW '14, Nueva York, ACM, pp. 105-116.
- Gilbert, S. F.; Sapp, J. y Tauber, A. I. (2012): «A symbiotic view of life: we have never been individuals», en *The Quarterly Review of Biology*, vol. 87, n.º 4, pp. 325-341, n.º pmi, 23397797.
- Ginsburg, T. (2005): «Locking in democracy: constitutions, commitment, and international law», en *New York University Journal of international law and politics*, vol. 38, n.º 4, p. 707.
- Goodman, B. y Flaxman, S. (2016): «EU regulations on algorithmic decision-making and a "right to explanation"», en B. Kim, D. M. Malioutov y K. R. Varshney, (eds.), *ICML Workshop on Human Interpretability in Machine Learning* (WHI 2016), Nueva York, pp. 26-30.
- Grama, A. (2003): *Introduction to Parallel Computing*, Harlow, Pearson Education.
- Griffin, H. J.; Aung, M. S. H.; Romera-Paredes, B.; Mcloughlin, C.; Mckeown, G.; Curran, W. y Bianchi-Berthouze, N. (2013): «Laughter type recognition from whole body motion», *Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, Ginebra, pp. 349-355.
- HaberL, H.; Erb, K. H.; Krausmann, F.; Gaube, V.; Bondeau, A.; Plutzer, C.; Gingrich, S.; Lucht, W. y Fischer-Kowalski, M. (2007): «Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in Earth's terrestrial ecosystems», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, n.º 31, pp. 12.942-12.947.
- Haines, T. S. F.; Mac Aodha, O. y Brostow, G. J. (2016): «My text in your handwriting», en *ACM Transactions on Graphics*, vol. 35, n.º 3, art. 26, pp. 1-18.
- Hanahan, D. y Weinberg, R. (2011): «Hallmarks of cancer: the next generation», en *Cell*, vol. 144, n.º 5, pp. 646-674.
- Hancock, J. T.; Curry, L. E.; Goorha, S. y Woodworth, M. (2007): «On lying and being lied to: a linguistic analysis of deception in computer-mediated communication», en *Discourse Processes*, vol. 45, n.º 1, pp. 1-23.
- Herrmann, B.; Thöni, C. y Gächter, S. (2008): «Antisocial punishment across societies», en *Science*, vol. 319, n.º 5868, pp. 1362-1367.
- Hofmann, M.; Geiger, J.; Bachmann, S.; Schuller, B. y Rigoll, G. (2014): «The TUM gait from audio, image and depth (GAID) database: multimodal recognition of subjects and traits», en *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 25, n.º 1, pp. 195-206.
- Holmes, S. (1988): «Precommitment and the paradox of democracy», en *Constitutionalism and democracy*, n.º 195, pp. 199-221.
- Hsu, Feng-hsiung (2002): *Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion*, Princeton, Princeton University Press.
- Huang, B.; Li, M.; De Souza, R. L.; Bryson, J. J. y Billard, A. (2016): «A modular approach to learning manipulation strategies from human demonstration», en *Autonomous Robots*, vol. 40, n.º 5, pp. 903-927.
- Human Rights Watch (2018): «Eradicating ideological viruses: China's campaign of repression against xinjiang's muslims», informe técnico, Human Rights Watch.
- Hunter, L. W.; Bernhardt, A.; Hughes, K. L. y Skuratowicz, E. (2001): «It's not just the ATMs: technology, firm strategies, jobs, and earnings in retail banking», en *Industrial & Labor Relations Review*, vol. 54, n.º 2, pp. 402-424.
- ICO (2018): «Investigation into the use of data analytics in political campaigns: Investigation update», informe técnico, Reino Unido, Oficina del Comisionado de Información.
- Iyengar, S.; Sood G. y Lelkes, Y. (2012): «Affect, not ideology: social identity perspective on polarization», en *Public Opinion Quarterly*, vol. 76, n.º 3, p. 405.
- Jentzsch, N. (2014): «Secondary use of personal data: a welfare analysis», en *European Journal of Law and Economics*, pp. 1-28.
- Jia, S.; Lansdall-Welfare, T. y Cristianini, N. (2016): «Time series analysis of garment distributions via street webcam», en A. Campilho y F. Karray (eds.), *Image Analysis and Recognition: 13th International Conference, ICIAR 2016*, en memoria de Mohamed Kamel, Póvoa de Varzim, Portugal, del 13 al 15 de julio, Proceedings, Berlín, Springer International Publishing, Cham, pp. 765-773.
- Jordan, J. J.; Hoffman, M.; Nowak, M. A. y Ry, G. G. (2016): «Uncalculating cooperation is used to signal trustworthiness», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, n.º 31, pp. 8658-8663.
- King, G. y Zeng, L. (2001): «Improving forecasts of state failure», en *World Politics*, n.º 53, pp. 623-658.
- Kleinsmith, A. y Bianchi-Berthouze, N. (2013): «Affective body expression perception and recognition: a survey», en *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 4, n.º 1, pp. 15-33.
- Krauss, L. M. y Starkman, G. D. (2000): «Life, the universe, and nothing: Life and death in an ever-expanding universe», en *The Astrophysical Journal*, vol. 531, n.º 1, p. 22.
- Laland, K. N.; Odling-Smee, J. y Feldman, M. W. (2000): «Niche construction, biological evolution, and cultural change», en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 23, n.º 1, pp. 131-146.
- Lamba, S. y Mace, R. (2012): «The evolution of fairness: explaining variation in bargaining behaviour», en *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 280, n.º 1750.
- Landau, J.-P. (2016): «Populism and debt: is Europe different from the U. S.?, charla en Princeton Woodrow Wilson School, en preparación.
- Lawrence, G. W.; Kehoe, W. R.; Y. Rieger, O.; Walters, W. H. y Kenney, A. R. (2000): «Risk management of digital information: a file format investigation», en *Menlo College Research Paper* 93, Washington D.C., Council on Library and Information Resources.
- Lee, D. S. (1999): «Wage inequality in the united states during the 1980s: rising dispersion or falling minimum wage?», en *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 114, n.º 3, pp. 977-1023.
- Lee, E.; Macvarish J. y Bristow, J. (2010): «Risk, health and parenting culture», en *Health, Risk & Society*, vol. 12, n.º 4, pp. 293-300.
- Levy, K. E. C. (2015): «Beating the box: resistance to surveillance in the United States trucking industry», capítulo de la tesis doctoral y manuscrito en preparación.

- Liao, S.-H. (2005): «Expert system methodologies and applications: a decade review from 1995 to 2004», en *Expert Systems with Applications*, vol. 28, n.º 1, pp. 93-103.
- List, C. y Pettit, P. (2011): *Group agency: The possibility, design, and status of corporate agents*, Nueva York, Oxford University Press.
- Liu, S.; Wang, X.; Liu, M. y Zhu, J. (2017): «Towards better analysis of machine learning models: a visual analytics perspective», documento ArXiv en preimpresión, n.º 1702.01226.
- Lowe, W. (2001): «Towards a theory of semantic space», en *Proceedings of the Twenty-First Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, Edimburgo, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 576-581.
- Mace, R. (1998): «The co-evolution of human fertility and wealth inheritance strategies», en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 353, n.º 1367, pp. 389-397.
- Marshall, C. C.; Bly, S. y Brun-Cottan, F. (2006): «The long term fate of our digital belongings: toward a service model for personal archives», en *Archiving Conference*, n.º 1, pp. 25-30.
- McCarthy, J. (1983): «The little thoughts of thinking machines», en *Psychology Today*, vol. 17, n.º 12, pp. 46-49.
- McCarty, N. M.; Poole, K. T. y Rosenthal, H. (2016): *Polarized America: the dance of ideology and unequal riches*, 2.ª ed., Cambridge, MIT Press.
- Meng, X.-L. (2018): «Statistical paradises and paradoxes in big data (i): law of large populations, big data paradox, and the 2016 US presidential election», en *The Annals of Applied Statistics*, vol. 12, n.º 2, pp. 685-726.
- Meyer, B. (2016): «Learning to love the government: trade unions and late adoption of the minimum wage», en *World Politics*, vol. 68, n.º 3, pp. 538-575.
- Miguel, J. C. y Casado, M. A. (2016): «GAFAnomy (Google, Amazon, Facebook and Apple): the big four and the b-ecosystem», en M. Gómez-Uranga, J. M. Zabala-Isturriagoitia y J. Barrutia (eds.), *Dynamics of Big Internet Industry Groups and Future Trends: A View from Epigenetic Economics*, Cham, Springer International Publishing, pp. 127-148.
- Milanovic, B. (2016): *Global Inequality*, Cambridge, Belknap Press of Harvard University Press.
- Mill, J. S. (1859): *On Liberty*, Londres, John W. Parker and Son.
- Miller, T. (2017): *Storming The Wall: Climate Change, Migration, And Homeland Security*, San Francisco, City Lights Books.
- Mishel, L. (2012): «The wedges between productivity and median compensation growth», en *Issue Brief* n.º 330, Washington D.C., Economic Policy Institute.
- Moeslund, T. B. y Granum, E. (2001): «A survey of computer vision-based human motion capture», en *Computer Vision And Image Understanding*, vol. 81, n.º 3, pp. 231-268.
- Morales, A. (2018): «Brexit has already cost the U.K. more than its E.U. budget payments, study shows», Bloomberg. Disponible en <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-06-22/u-k-brexit-hit-already-exceeds-eu-budget-payments-study-shows>
- Murphy, K. P. (2012): *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*, Cambridge, MIT Press.
- Newman, E. J.; Sanson, M.; Miller, E. K.; Quigley-Mcbride, A.; Foster, J. L.; Bernstein, D. M. y Garry, M. (2014): «People with easier to pronounce names promote truthiness of claims», en *PLoS ONE*, vol. 9, n.º 2, e88671.
- Ngai, E. W. T.; Hu, Y.; Wong, H.; Chen, Y. y Sun, X. (2011): «The application of data mining techniques in financial fraud detection: a classification framework and an academic review of literatura», en *Decision Support Systems*, vol. 50, n.º 3, pp. 559-569.
- Oficina Ejecutiva del Presidente de Estados Unidos (2016): *Artificial Intelligence, Automation, And The Economy*, Washington D.C., diciembre.
- O'Reilly, T. (2017): *WTF? What's the Future and why It's Up to Us*, Nueva York, Random House.
- Pasquale, F. (2015): *The Black Box Society: The Secret Algorithms That Control Money And Information*, Cambridge, Harvard University Press.
- Person, R. (2018): «Gray zone tactics as asymmetric balancing», ponencia presentada en la reunion annual de la American Political Science Association.
- Perzanowski, A. y Schultz, J. (2016): *The End of Ownership: Personal Property in the Digital Economy*, Cambridge, MIT Press.
- Pinker, S. (2012): *The Better Angels of our Nature: The Decline of Violence in History and Its Causes*, Londres, Penguin.
- Price, G. R. (1972): «Fisher's 'fundamental theorem' made clear», en *Annals of Human Genetics*, vol. 36, n.º 2, pp. 129-140.
- Reed, S.; Akata, Z.; Yan, X.; Logeswaran, L.; Schiele, B. y Lee, H. (2016): «Generative adversarial text to image synthesis», en *Proceedings of The 33rd International Conference on Machine Learning, ICML*, vol. 3.
- Roithmayr, D.; Isakov, A. y Ry, D. (2015): «Should law keep pace with society? Relative update rates determine the co-evolution of institutional punishment and citizen contributions to public godos», en *Games*, vol. 6, n.º 2, p. 124.
- Romanes, G. J. (1883): *Animal intelligence*, Nueva York, D. Appleton.
- Rosner, G. (2014): «Who owns your data?», en *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication, UbiComp '14 Adjunct*, Nueva York, ACM, pp. 623-628.
- Roughgarden, J.; Oishi, M. y Akçay, E. (2006): «Reproductive social behavior: Cooperative games to replace sexual selection», en *Science*, vol. 311, n.º 5763, pp. 965-969.
- Russell, S. J. y Norvig, P. (2009): *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 3.ª ed., Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- Santoni de Sio, F. y Van den Hoven, J. (2018): «Meaningful human control over autonomous systems: a philosophical account», en *Frontiers in Robotics and AI*, n.º 5, p. 15.
- Sartori, G.; Orru, G. y Monaro, M. (2016): «Detecting deception through kinematic analysis of hand movement», en *International Journal of Psychophysiology*, n.º 108, p. 16.
- ScheideL, W. (2017): *The Great Leveler: Violence and the History of Inequality from the Stone Age to the Twenty-First Century*, Princeton, Princeton University Press.
- Schena, M.; Shalon, D.; Heller, R.; Chai, A.; Brown, P. O. y Davis, R. W. (1996): «Parallel human genome analysis: microarray-based expression monitoring of 1000 genes», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 93, n.º 20, pp. 10614-10619.
- Schlager, K. J. (1956): «Systems engineering: key to modern development», en *IRE Transactions on Engineering Management*, n.º 3, pp. 64-66.
- Schmitt, J. (2013): «Why does the minimum wage have no discernible effect on employment», en *Technical Report 22*, Washington D.C., Center for Economic and Policy Research.
- Schuller, B.; Steidl, S.; Batliner, A.; Hirschberg, J.; Burgoon, J. K.; Baird, A.; Elkins, A.; Zhang, Y.; Coutinho, E. y Evanini, K. (2016): «The interspeech 2016 computational paralinguistics challenge: deception, sincerity & native Language», en *Interspeech 2016*, pp. 2.001-2.006.
- Selinger, E. y Hartzog, W. (2017): «Obscurity and privacy», en J. Pitt y A. Shew (eds.), *Spaces for the Future: A Companion to Philosophy of Technology*, Nueva York, Routledge, en prensa.
- Silver, D.; Huang, A.; Maddison, C. J.; Guez, A.; Sifre, L.; Schrittwieser, J.; Antonoglou, I.; Panneershelvam, V.; Lanctot, M. et al. (2016): «Mastering the game of go with deep neural networks and tree search», en *Nature*, vol. 529, n.º 7587, pp. 484-489.
- Singer, P. (2015): *The Most Good You Can Do: How Effective Altruism Is Changing Ideas About Living Ethically*, Melbourne, Text Publishing.
- Singh, J.; Pasquier, T.; Bacon, J.; Ko, H. y Eyers, D. (2016): «Twenty security considerations for cloud-supported Internet of Things», en *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, n.º 3, pp. 269-284.

- Sipser, M. (2005): *Introduction to the Theory of Computation*, 2.ª ed., Boston, Thompson.
- Smith, B. (2018): «Facial recognition technology: the need for public regulation and corporate responsibility», blog *Microsoft on the Issues*. Disponible en <https://blogs.microsoft.com/on-the-issues/2018/07/13/facial-recognition-technology-the-need-for-public-regulation-and-corporate-responsibility/>
- Soares, N. y Fallenstein, B. (2014): «Agent foundations for aligning machine intelligence with human interests: A technical research agenda», pendiente de publicación. Disponible en <https://intelligence.org/files/TechnicalAgenda.pdf>
- Solaiman, S. M. (2016): «Legal personality of robots, corporations, idols and chimpanzees: a quest for legitimacy», en *Artificial Intelligence and Law*, pp. 1-25.
- Stewart, A. J.; Mccarty, N. y Bryson, J. J. (2018): «Explaining parochialism: a causal account for political polarization in changing economic environments», documento ArXiv en preimpresión n.º 1807.11477.
- Stoddart, D. M. (1990): *The Scented Ape: The Biology and Culture of Human Odour*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Suwajanakorn, S.; Seitz, S. M. y Kemelmacher-Shlizerman, I. (2017): «Synthesizing Obama: Learning lip sync from audio», en *ACM Transactions on Graphics*, vol. 36, n.º 4, p. 95.
- Sylwester, K.; Mitchell, J.; Lowe, W. y Bryson, J. J. (2017): *Punishment as aggression: Uses and consequences of costly punishment across populations*, en preparación.
- Tepperman, J. (2016): *The Fix: How Countries Use Crises to Solve the World's Worst Problems*, Nueva York, Tim Duggan Books.
- The Economist* (2017): «I, taxpayer: Why taxing robots is not a good idea. Bill Gates's proposal is revealing about the challenge automation poses», edición impresa, 25 de febrero de 2017, archivo de la autora.
- Thies, J.; Zollhofer, M.; Stamminger, M.; Theobalt, C. y Nießner, M. (2016): «Face2Face: real-time face capture and reenactment of RGB videos», en *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2.387-2.395.
- Touretzky, D. S. (1988): «On the proper treatment of thermostats», en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 11, n.º 1, p. 5.556.
- Trewavas, A. (2005): «Green plants as intelligent organisms», en *Trends In Plant Science*, vol. 10, n.º 9, pp. 413-419.
- Valentino, B. A. (2004): *Final Solutions: Mass Killing And Genocide In The 20th Century*, Ithaca, NY, Cornell University Press.
- Valstar, M. F. y Pantic, M. (2012): «Fully automatic recognition of the temporal phases of facial actions», en *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 42, n.º 1, pp. 28-43.
- Van Lange, P. A. M.; De Bruin, E.; Otten, W. y Joireman, J. A. (1997): «Development of prosocial, individualistic, and competitive orientations: theory and preliminary evidence», en *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 73, n.º 4, pp. 733-746.
- Van Schaik, C.; Graber, S.; Schuppli, C. y Burkart, J. (2017): «The ecology of social learning in animals and its link with intelligence», en *The Spanish Journal of Psychology*, n.º 19.
- Vincent, J. (2016): «Artificial intelligence is going to make it easier than ever to fake images and video», *The Verge*. Disponible en <https://www.theverge.com/2016/12/20/14022958/ai-image-manipulation-creation-fakes-audio-video>
- Weber, R. H. (2010): «Internet of Things: New security and privacy challenges», en *Computer Law & Security Review*, vol. 26, n.º 1, pp. 23-30.
- Widrow, B.; Rumelhart, D. E. y Lehr, A. A. (1994): «Neural networks: Applications in industry, business and science», en *Communications of the ACM*, vol. 37, n.º 3, pp. 93-105.
- Williams, C. P. (2010): *Explorations in quantum computing*, Londres, Springer Science & Business Media.
- Winston, P. H. (1984): *Artificial Intelligence*, Boston, Addison-Wesley. [Ed. esp. (1994): *Inteligencia Artificial*, Buenos Aires, Addison-Wesley Iberoamericana.]
- Wolpert, D. H. (1996a): «The existence of a priori distinctions between learning algorithms», en *Neural Computation*, vol. 8, n.º 7, pp. 1391-1420.
- Wolpert, D. H. (1996b): «The lack of a priori distinctions between learning algorithms», en *Neural Computation*, vol. 8, n.º 7, pp. 1341-1390.
- Wright, G. (1974): «The political economy of new deal spending: An econometric analysis», en *The Review of Economics and Statistics*, vol. 56, n.º 1, pp. 30-38.
- Wu, Y.; Schuster, M.; Chen, Z.; Le, Q. V.; Norouzi, M.; Macherey, W.; Krikun, M.; Cao, Y.; Gao, Q.; Macherey, K.; Klingner, J.; Shah, A. et al. (2016): «Google's neural machine translation system: bridging the gap between human and machine translation», en *Computing Research Repository (CoRR)*, abs, n.º 1609.08144.
- Yan, X. (2006): «The rise of China and its power status», en *The Chinese Journal of International Politics*, vol. 1, n.º 1, pp. 5-33.
- Yiu, E. (2016): «Alibaba tops Tencent as Asia's biggest company by market value: new-economy companies that owe their revenue to technology and the internet are now more valuable than oil refineries, manufacturers and banks», en *South China Morning Post*, 5 de noviembre.
- Youyou, W.; Kosinski, M. y Stillwell, D. (2015): «Computer-based personality judgments are more accurate than those made by humans», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, n.º 4, pp. 1036-1040.



Ramón López de Mántaras
Consejo Superior de
Investigaciones Científicas
(CSIC)

Profesor investigador del Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y director del Instituto de Investigación de inteligencia artificial (IIIA). Máster en Ingeniería Informática por la Universidad de California Berkeley, doctor en Física (Control Automático) por la Universidad de Toulouse y en Ingeniería Informática por la Universidad Politécnica de Barcelona. Es pionero de la inteligencia artificial (IA) en España. Autor de casi 300 artículos. Conferenciante plenario en numerosos congresos internacionales. Exdirector jefe de la revista *Artificial Intelligence Communications*, es miembro del consejo editorial de varias publicaciones internacionales de prestigio. Ha sido cogador de cinco premios a la mejor ponencia en congresos internacionales. Ha recibido, entre otros premios, el Ciudad de Barcelona a la investigación en 1981; el Robert S. Engelmere Memorial Award de la American Association of Artificial Intelligence (AAAI) en 2011; el nacional de la Sociedad Científica Informática en 2012, el Distinguished Service Award de la European Association of Artificial Intelligence, en 2016 y el IJCAI Donald E. Walker Distinguished Service Award, en 2017. También es miembro del Institut d'Estudis Catalans. Forma parte de distintos paneles de expertos y consejos asesores de instituciones públicas y privadas de Estados Unidos y Europa, tales como el EC Joint Research Center High-Level Peer Group. Su trabajo actual se centra en el razonamiento basado en casos, el aprendizaje automático y las aplicaciones de IA en la música.

Libros recomendados: Domingos, Pedro (2015): *The Master Algorithm* [El algoritmo maestro]. Nueva York, Basic Books; y López de Mántaras, Ramón y Meseguer, Pedro (2017): *Inteligencia Artificial*, Madrid, Los Libros de la Catarata.

Este capítulo contiene algunas reflexiones sobre inteligencia artificial (IA). En primer lugar, se explica la distinción entre la IA fuerte y la débil, así como los conceptos relacionados de IA general y específica, dejando claro que todas las manifestaciones existentes de IA son débiles y específicas. Se describen brevemente los principales modelos, insistiendo en la importancia de la corporalidad como aspecto clave para conseguir una IA de naturaleza general. A continuación se aborda la necesidad de proporcionar a las máquinas conocimientos de sentido común que hagan posible avanzar hacia el ambicioso objetivo de construir IA de tipo general. También se comentan las últimas tendencias en IA basadas en el análisis de grandes cantidades de datos que han hecho posibles progresos espectaculares en épocas muy recientes, con una alusión a las dificultades presentes hoy en los enfoques de la IA. Por último, se comentan otras cuestiones que son y continuarán siendo clave en la IA, antes de cerrar con una breve reflexión sobre los riesgos de la inteligencia artificial.

Introducción

El objetivo último de la IA, lograr que una máquina tenga una inteligencia de tipo *general* similar a la humana, es uno de los objetivos más ambiciosos que se ha planteado la ciencia. Por su dificultad, es comparable a otros grandes objetivos científicos como explicar el origen de la vida, el origen del universo o conocer la estructura de la materia. A lo largo de los últimos siglos, este afán por construir máquinas inteligentes nos ha conducido a inventar modelos o metáforas del cerebro humano. Por ejemplo, en el siglo XVII, Descartes se preguntó si un complejo sistema mecánico compuesto de engranajes, poleas y tubos podría, en principio, emular el pensamiento. Dos siglos después, la metáfora fueron los sistemas telefónicos ya que parecía que sus conexiones se podían asimilar a una red neuronal. Actualmente el modelo dominante es el modelo computacional basado en el ordenador digital y, por consiguiente, es el modelo que se contempla en este artículo.



La hipótesis del Sistema de Símbolos Físicos: IA débil versus IA fuerte

En una ponencia, con motivo de la recepción del prestigioso Premio Turing en 1975, Allen Newell y Herbert Simon (Newell y Simon, 1975) formularon la hipótesis del Sistema de Símbolos Físicos según la cual «todo sistema de símbolos físicos posee los medios necesarios y suficientes para llevar a cabo acciones inteligentes». Por otra parte, dado que los seres humanos somos capaces de mostrar conductas inteligentes en el sentido general, entonces, de acuerdo con la hipótesis, nosotros somos también sistemas de símbolos físicos. Conviene aclarar a que se refieren Newell y Simon cuando hablan de *Sistema de Símbolos Físicos* (SSF). Un SSF consiste en un conjunto de entidades denominadas símbolos que, mediante relaciones, pueden ser combinados formando estructuras más grandes —como los átomos que se combinan formando moléculas— y que pueden ser transformados aplicando un conjunto de procesos. Estos procesos pueden generar nuevos símbolos, crear y modificar relaciones entre símbolos, almacenar símbolos, comparar si dos símbolos son iguales o distintos, etcétera. Estos símbolos son físicos en tanto que tienen un sustrato físico-electrónico (en el caso de los ordenadores) o físico-biológico (en el caso de los seres humanos). Efectivamente, en el caso de los ordenadores, los símbolos se realizan mediante circuitos electrónicos digitales y en el caso de los seres humanos mediante redes de neuronas. En definitiva, de acuerdo con la hipótesis SSF, la naturaleza del sustrato (circuitos electrónicos o redes neuronales) carece de importancia siempre y cuando dicho sustrato permita procesar símbolos. No olvidemos que se trata de una hipótesis y, por lo tanto, no debe de ser ni aceptada ni rechazada *a priori*. En cualquier caso, su validez o refutación se deberá verificar de acuerdo con el método científico, con ensayos experimentales. La IA es precisamente el campo científico dedicado a intentar verificar esta hipótesis en el contexto de los ordenadores digitales, es decir, verificar si un ordenador convenientemente programado es capaz o no de tener conducta inteligente de tipo general.

Es importante el matiz de que debería tratarse de inteligencia de tipo general y no una inteligencia específica ya que la inteligencia de los seres humanos es de tipo general. Exhibir inteligencia específica es otra cosa bien distinta. Por ejemplo, los programas que juegan al ajedrez a nivel de Gran Maestro son incapaces de jugar a las damas a pesar de ser un juego mucho más sencillo. Se requiere diseñar y ejecutar un programa distinto e independiente del que le permite jugar al ajedrez para que el mismo ordenador juegue también a las damas. Es decir, que no puede aprovechar su capacidad para jugar al ajedrez para adaptarla a las



damas. En el caso de los seres humanos no es así ya que cualquier jugador de ajedrez puede aprovechar sus conocimientos sobre este juego para, en cuestión de pocos minutos, jugar a las damas perfectamente. El diseño y realización de inteligencias artificiales que únicamente muestran comportamiento inteligente en un ámbito muy específico, está relacionado con lo que se conoce por *IA débil* en contraposición con la *IA fuerte* a la que, de hecho, se referían Newell y Simon y otros padres fundadores de la IA. Aunque estrictamente la hipótesis SSF se formuló en 1975, ya estaba implícita en las ideas de los pioneros de la IA en los años cincuenta e incluso en las ideas de Alan Turing en sus escritos pioneros (Turing, 1948, 1950) sobre máquinas inteligentes.

Quien introdujo esta distinción entre IA débil y fuerte fue el filósofo John Searle en un artículo crítico con la IA publicado en 1980 (Searle, 1980) que provocó, y sigue provocando, mucha polémica. La IA fuerte implicaría que un ordenador convenientemente diseñado no simula una mente sino que *es una mente* y por consiguiente debería ser capaz de tener una inteligencia igual o incluso superior a la humana. Searle en su artículo intenta demostrar que la IA fuerte es imposible. En este punto conviene aclarar que no es lo mismo IA general que IA fuerte. Existe obviamente una conexión pero solamente en un sentido, es decir que toda IA fuerte será necesariamente general pero puede haber IA generales, es decir multitarea, que no sean fuertes, que emulen la capacidad de exhibir inteligencia general similar a la humana pero sin experimentar estados mentales.

La IA débil, por otro lado, consistiría, según Searle, en construir programas que realicen tareas específicas y, obviamente sin necesidad de tener estados mentales. La capacidad de los ordenadores para realizar tareas específicas, incluso mejor que las personas, ya se ha demostrado ampliamente. En ciertos dominios, los avances de la IA débil superan en mucho la pericia humana, como por ejemplo buscar soluciones a formulas lógicas con muchas variables o jugar al ajedrez, o al Go, o en diagnóstico médico y muchos otros aspectos relacionados con la toma de decisiones. También se asocia con la IA débil el hecho de formular y probar hipótesis acerca de aspectos relacionados con la mente (por ejemplo la capacidad de razonar deductivamente, de aprender inductivamente, etcétera) mediante la construcción de programas que llevan a cabo dichas funciones aunque sea mediante procesos completamente distintos a los que lleva a cabo el cerebro. Absolutamente todos los avances logrados hasta ahora en el campo de la IA son manifestaciones de IA débil y específica.

Los principales modelos en IA: simbólico, conexionista, evolutivo y corpóreo

El modelo dominante en IA ha sido el simbólico, que tiene sus raíces en la hipótesis SSF. De hecho, sigue siendo muy importante y actualmente se considera el modelo clásico en IA (también denominado por el acrónimo GOF AI, de *Good Old Fashioned AI*). Es un modelo *top-down* que se basa en el razonamiento lógico y la búsqueda heurística como pilares para la resolución de problemas, sin que el sistema inteligente necesite formar parte de un cuerpo ni estar situado en un entorno real. Es decir, la IA simbólica opera con representaciones abstractas del mundo real que se modelan mediante lenguajes de representación basados principalmente en la lógica matemática y sus extensiones. Por este motivo, los primeros sistemas inteligentes resolvían principalmente problemas que no requieren interactuar directamente con el entorno como, por ejemplo, demostrar sencillos teoremas matemáticos o jugar al ajedrez —los programas que juegan al ajedrez no necesitan de hecho la percepción visual para ver las piezas en el tablero ni actuadores para mover las piezas—. Ello no significa que la IA simbólica no pueda ser usada para, por ejemplo, programar el módulo de razonamiento

de un robot físico situado en un entorno real, pero en los primeros años los pioneros de la IA no disponían de lenguajes de representación del conocimiento ni de programación que permitieran hacerlo de forma eficiente y por este motivo los primeros sistemas inteligentes se limitaron a resolver problemas que no requerían interacción directa con el mundo real. Actualmente, la IA simbólica se sigue usando para demostrar teoremas o jugar al ajedrez, pero también para aplicaciones que requieren percibir el entorno y actuar sobre él como por ejemplo el aprendizaje y la toma de decisiones en robots autónomos.



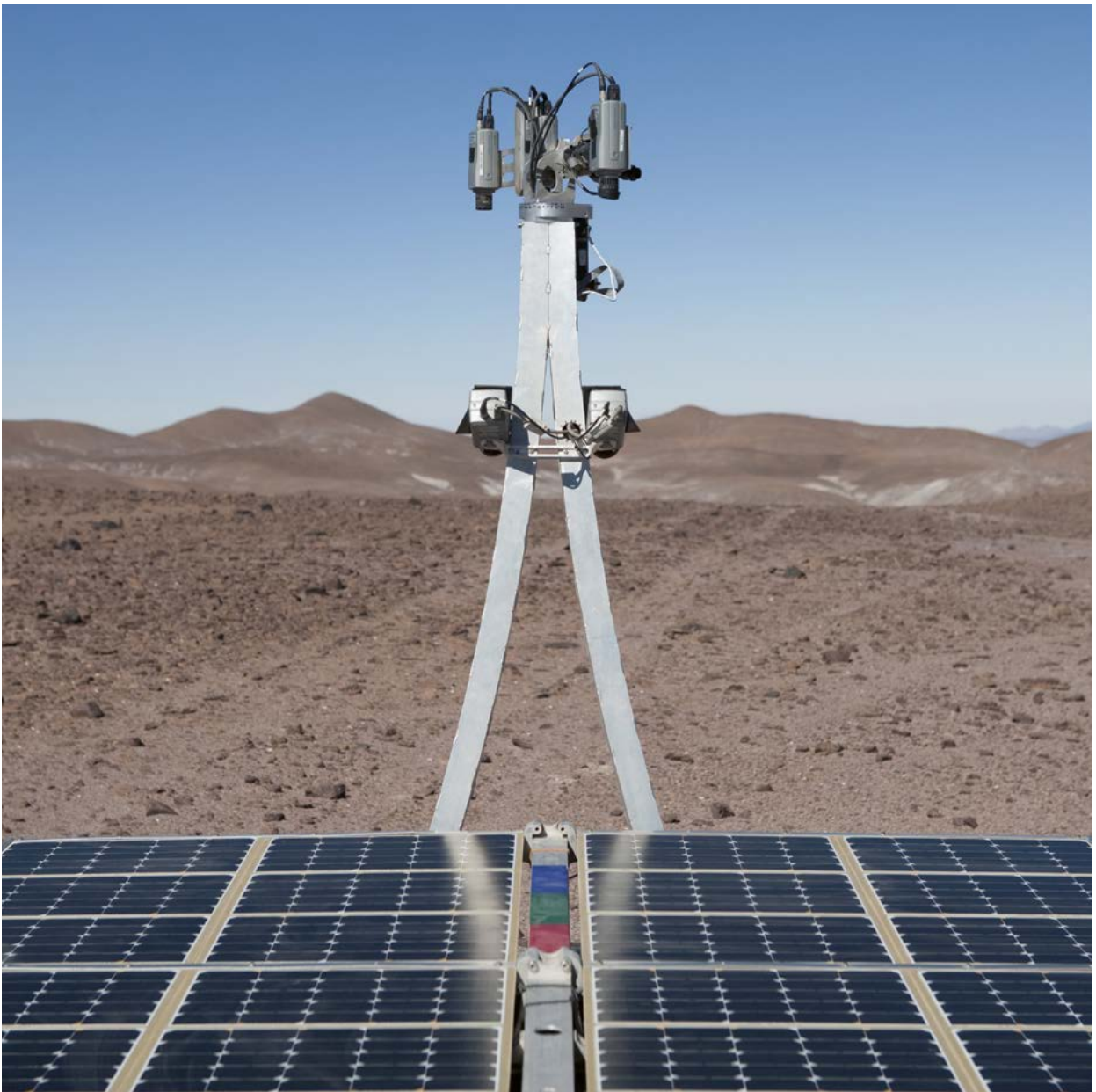
El objetivo último de la IA, lograr que una máquina tenga una inteligencia de tipo general similar a la humana, es uno de los objetivos más ambiciosos que se ha planteado la ciencia. Por su dificultad, es comparable a explicar el origen de la vida, el origen del universo o conocer la estructura de la materia

Simultáneamente con la IA simbólica también empezó a desarrollarse una IA bioinspirada llamada conexionista. Los sistemas conexionistas no son incompatibles con la hipótesis SSF pero, contrariamente a la IA simbólica, se trata de una modelización *bottom-up*, ya que se basan en la hipótesis de que la inteligencia emerge a partir de la actividad distribuida de un gran número de unidades interconectadas que procesan información paralelamente. En la IA conexionista estas unidades son modelos muy aproximados de la actividad eléctrica de las neuronas biológicas.

Ya en 1943, McCulloch y Pitts (McCulloch y Pitts, 1943) propusieron un modelo simplificado de neurona en base a la idea de que una neurona es esencialmente una unidad lógica. Este modelo es una abstracción matemática con entradas (dendritas) y salidas (axones). El valor de la salida se calcula en función del resultado de una suma ponderada de las entradas, de forma que si dicha suma supera un umbral preestablecido entonces la salida es un «1», en caso contrario la salida es «0». Conectando la salida de cada neurona con las entradas de otras neuronas se forma una red neuronal artificial. En base a lo que ya se sabía entonces sobre el reforzamiento de las sinapsis entre neuronas biológicas se vio que estas redes neuronales artificiales se podían entrenar para aprender funciones que relacionaran las entradas con las salidas mediante el ajuste de los pesos que sirven para ponderar las conexiones entre neuronas, por este motivo se pensó que serían mejores modelos para el aprendizaje, la cognición y la memoria, que los modelos basados en la IA simbólica. Sin embargo, los sistemas inteligentes basados en el conexionismo tampoco necesitan formar parte de un cuerpo ni estar situados en un entorno real y, desde este punto de vista, tienen las mismas limitaciones que los sistemas simbólicos. Por otra parte, las neuronas reales poseen complejas arborizaciones dendríticas con propiedades no solo eléctricas sino también químicas nada triviales. Pueden contener conductancias iónicas que producen efectos no lineales. Pueden recibir decenas de millares de sinapsis variando en posición, polaridad y magnitud. Además, la mayor parte de las células del cerebro no son neuronas, son células *gliales*, que no solamente regulan el funcionamiento de las neuronas, también poseen potenciales eléctricos, generan ondas de calcio y se comunican entre ellas, lo que parece indicar que juegan un papel muy importante en los procesos cognitivos. Sin embargo, no existe ningún modelo conexionista que incluya a dichas células por lo que, en el mejor de los casos, estos modelos son muy incompletos y, en el peor, erróneos. En definitiva, toda la enorme complejidad del cerebro queda muy lejos de los modelos actuales. Esta inmensa complejidad del cerebro



Ingenieros de la Universidad Carnegie Mellon desarrollaron esta robot llamada Zoe para que detectara vida en entornos aparentemente deshabitados. Zoe incorpora un sistema puntero de detección de moléculas orgánicas que quizá ayude a encontrar vida en Marte; y es 20 veces más rápida que los robots exploradores de marte *Spirit* y *Opportunity*. Desierto de Atacama, Chile, 2005





nico

電王戦



El diseño y la realización de inteligencias artificiales que solo muestran comportamiento inteligente en un ámbito muy específico están relacionados con lo que se conoce por *IA débil* en contraposición con la *IA fuerte*

Masayuki Toyoshima, jugador profesional de *shogi*, el ajedrez japonés, juega contra el programa de ordenador YSS, que mueve las piezas mediante un brazo robótico. Osaka, Japón, marzo de 2014



también conduce a pensar que la llamada *singularidad*, es decir, futuras superinteligencias artificiales que, basadas en réplicas del cerebro, superarán con mucho la inteligencia humana en un plazo de unos veinticinco años, es una predicción con poco fundamento científico.

Otra modelización bioinspirada, también compatible con la hipótesis SSF, y no corpórea, es la *computación evolutiva* (Holland, 1975). Los éxitos de la biología evolucionando organismos complejos, hizo que a primeros de los años sesenta algunos investigadores se plantearan la posibilidad de imitar la evolución con el fin de que los programas de ordenador, mediante un proceso evolutivo, mejorasen automáticamente las soluciones a los problemas para los que habían sido programados. La idea es que estos programas, gracias a operadores de mutación y cruce de «cromosomas» que modelan a los programas, generan nuevas generaciones de programas modificados cuyas soluciones son mejores que las de los programas de las generaciones anteriores. Dado que podemos considerar que el objetivo de la IA es la búsqueda de programas capaces de producir conductas inteligentes, se pensó que se podría usar la programación evolutiva para encontrar dichos programas dentro del espacio de programas posibles. La realidad es mucho más compleja y esta aproximación tiene muchas limitaciones aunque ha producido excelentes resultados, en particular en la resolución de problemas de optimización.

La complejidad del cerebro dista mucho de los modelos de IA y conduce a pensar que la llamada *singularidad* —superinteligencias artificiales basadas en réplicas del cerebro que superarán con mucho la inteligencia humana— es una predicción con poco fundamento científico

Una de las críticas más fuertes a estos modelos no corpóreos se basa en que un agente inteligente necesita un cuerpo para poder tener experiencias directas con su entorno (diríamos que el agente está «situado» en su entorno) en lugar de que un programador proporcione descripciones abstractas de dicho entorno codificadas mediante un lenguaje de representación de conocimientos. Sin un cuerpo, estas representaciones abstractas no tienen contenido semántico para la máquina. Sin embargo, gracias a la interacción directa con el entorno, el agente puede relacionar las señales que percibe a través de sus sensores con representaciones simbólicas generadas a partir de lo percibido. Algunos expertos en IA, en particular Rodney Brooks (Brooks, 1991) incluso llegaron a afirmar que no era ni siquiera necesario generar dichas representaciones internas, esto es, que no es necesario que un agente tenga que tener una representación interna del mundo que le rodea ya que el propio mundo es el mejor modelo posible de sí mismo y que la mayor parte de las conductas inteligentes no requieren razonamiento sino que emergen a partir de la interacción entre el agente y su entorno. Esta idea generó mucha polémica y el propio Brooks, unos años más tarde, admitió que hay muchas situaciones en las que una representación interna del mundo es necesaria para que el agente tome decisiones racionales.

En 1965, el filósofo Hubert Dreyfus afirmó que el objetivo último de la IA, es decir, la IA fuerte de tipo general, era tan inalcanzable como el objetivo de los alquimistas del siglo XVII que pretendían transformar el plomo en oro (Dreyfus, 1965). Dreyfus argumentaba que el cerebro procesa la información de manera global y continua mientras que un ordenador utiliza un conjunto finito y discreto de operaciones deterministas aplicando reglas a un conjunto finito de datos. En este aspecto podemos ver un argumento similar al de Searle, pero Dreyfus, en



posteriores artículos y libros (Dreyfus, 1992), usó también otro argumento consistente en que el cuerpo juega un papel crucial en la inteligencia. Fue pues uno de los primeros en abogar la necesidad de que la inteligencia forme parte de un cuerpo con el que poder interactuar con el mundo. La idea principal es que la inteligencia de los seres vivos deriva del hecho de estar situados en un entorno con el que pueden interactuar gracias a sus cuerpos. De hecho esta necesidad de corporeidad está basada en la Fenomenología de Heidegger que enfatiza la importancia del cuerpo con sus necesidades, deseos, placeres, penas, formas de moverse, de actuar, etcétera. Según Dreyfus, la IA debería modelar todos estos aspectos para alcanzar el objetivo último de la IA fuerte. Dreyfus no niega completamente la posibilidad de la IA fuerte pero afirma que no es posible con los métodos clásicos de la IA simbólica y no corpórea, en otras palabras considera que la hipótesis del Sistema de Símbolos Físicos no es correcta. Sin duda se trata de una idea interesante que hoy en día comparten muchos investigadores en IA. Efectivamente, la aproximación corpórea con representación interna ha ido ganando terreno en la IA y actualmente muchos la consideramos imprescindible para avanzar hacia inteligencias de tipo general. De hecho, basamos una gran parte de nuestra inteligencia en nuestra capacidad sensorial y motora. En otras palabras, el cuerpo conforma a la inteligencia y por lo tanto sin cuerpo no puede haber inteligencia de tipo general. Esto es así porque el *hardware* del cuerpo, en particular los mecanismos del sistema sensorial y del sistema motor, determinan el tipo de interacciones que un agente puede realizar. A su vez, estas interacciones conforman las habilidades cognitivas de los agentes dando lugar a lo que se conoce como *cognición situada*. Es decir, se sitúa a la máquina en entornos reales, como ocurre con los seres humanos, con el fin de que tengan experiencias interactivas que, eventualmente, les permitan llevar a cabo algo similar a lo que propone la teoría del desarrollo cognitivo de Piaget (Inhelder y Piaget, 1958), según la cual un ser humano sigue un proceso de maduración mental por etapas y quizá los distintos pasos de este proceso podrían servir de guía para diseñar máquinas inteligentes. Estas ideas ha dado lugar a una nueva subárea de la IA llamada *robótica del desarrollo* (Weng *et al.*, 2001).

Éxitos de la IA especializada

Todos los esfuerzos de la investigación en IA se han centrado en construir inteligencias artificiales especializadas y los éxitos alcanzados son muy impresionantes, en particular durante el último decenio gracias sobre todo a la conjunción de dos elementos: la disponibilidad de enormes cantidades de datos y el acceso a la computación de altas prestaciones para poder analizarlos. Efectivamente, el éxito de sistemas, como por ejemplo AlphaGo (Silver *et al.*, 2016), Watson (Ferrucci *et al.*, 2013) y los avances en vehículos autónomos o en diagnóstico médico basado en imágenes, han sido posibles gracias a esta capacidad para analizar grandes cantidades de datos y detectar patrones eficientemente. Sin embargo, prácticamente no hemos avanzado hacia la consecución de IA general. De hecho, podemos afirmar que los actuales sistemas de IA son una demostración de lo que Daniel Dennet llama «competencia sin comprensión» (Dennet, 2018).

Posiblemente la lección más importante que hemos aprendido a lo largo de los sesenta años de existencia de la IA es que lo que parecía más difícil (diagnosticar enfermedades, jugar al ajedrez y al Go al más alto nivel) ha resultado ser relativamente fácil y lo que parecía más fácil ha resultado ser lo más difícil. La explicación a esta aparente contradicción hay que buscarla en la dificultad de dotar a las máquinas de conocimientos de sentido común. Sin estos conocimientos no es posible una comprensión profunda del lenguaje ni una interpretación profunda de lo que capta un sistema de percepción visual, entre otras limitaciones. De hecho,



La corporación tecnológica IBM ha abierto una división dedicada a su Watson idC (internet de las cosas) dentro de las torres Highlight, en Múnich, Alemania. El desarrollo de nuevas soluciones para la idC se hace mediante inteligencia artificial





el sentido común es requisito fundamental para alcanzar una IA similar a la humana en cuanto a generalidad y profundidad. Los conocimientos de sentido común son fruto de nuestras vivencias y experiencias. Algunos ejemplo son: «el agua siempre fluye de arriba hacia abajo», «para arrastrar un objeto atado a una cuerda hay que tirar de la cuerda, no empujarla», «un vaso se puede guardar dentro de un armario pero no podemos guardar un armario dentro de un vaso», etcétera. Hay millones de conocimientos de sentido común que las personas manejamos fácilmente y que nos permiten entender el mundo en el que vivimos. Una posible línea de investigación que podría dar resultados interesantes en adquisición de conocimientos de sentido común es la robótica del desarrollo mencionada anteriormente. Otra línea de trabajo muy interesante es la que tiene como objetivo la modelización matemática y el aprendizaje de relaciones causa-efecto, es decir, el aprendizaje de causales y, por lo tanto, asimétricos del mundo. Los sistemas actuales basados en aprendizaje profundo simplemente pueden aprender funciones matemáticas simétricas, no pueden aprender relaciones asimétricas y por consiguiente no son capaces de diferenciar entre causas y efectos, como por ejemplo que la salida del sol es la causa del canto del gallo y no lo contrario (Pearl, 2018; Lake *et al.*, 2016).

Futuro: hacia inteligencias artificiales realmente inteligentes

Las capacidades más complicadas de alcanzar son aquellas que requieren interactuar con entornos no restringidos ni previamente preparados. Diseñar sistemas que tengan estas capacidades requiere integrar desarrollos en muchas áreas de la IA. En particular, necesitamos lenguajes de representación de conocimientos que codifiquen información acerca de muchos tipos distintos de objetos, situaciones, acciones, etcétera, así como de sus propiedades y de las relaciones entre ellos, en particular relaciones causa-efecto. También necesitamos nuevos algoritmos que, en base a estas representaciones, puedan, de forma robusta y eficiente, resolver problemas y responder preguntas sobre prácticamente cualquier tema. Finalmente, dado que necesitarán adquirir un número prácticamente ilimitado de conocimientos, estos sistemas deberán ser capaces de aprender de forma continua a lo largo de toda su existencia. En definitiva, es imprescindible diseñar sistemas que integren percepción, representación, razonamiento, acción y aprendizaje. Este es un problema muy importante en IA, ya que todavía no sabemos como integrar todos estos componentes de la inteligencia. Necesitamos arquitecturas cognitivas (Forbus, 2012) que integren estos componentes de forma adecuada. Los sistemas integrados son un paso previo fundamental para conseguir algún día inteligencias artificiales de tipo general.

Las capacidades más complicadas de alcanzar son aquellas que requieren interactuar con entornos no restringidos ni previamente preparados. Diseñar sistemas que tengan estas capacidades requiere integrar desarrollos en muchas áreas de la IA

Entre las actividades futuras, creemos que los temas de investigación más importantes pasarán por sistemas híbridos que combinen las ventajas que poseen los sistemas capaces de razonar en base a conocimientos y uso de la memoria (Graves *et al.*, 2016) y las ventajas de la IA basada en análisis de cantidades masivas de datos, en lo que se conoce por aprendizaje



profundo (Bengio, 2009). Actualmente, una importante limitación de los sistemas de aprendizaje profundo es el denominado «olvido catastrófico», lo cual significa que si una vez han sido entrenados para llevar a cabo una tarea (por ejemplo, jugar al Go), si a continuación los entrenamos para llevar a cabo otra tarea distinta (por ejemplo, distinguir entre imágenes de perros y de gatos) olvidan completamente la tarea anteriormente aprendida (en este caso jugar al Go). Esta limitación es una prueba contundente de que en realidad estos sistemas no aprenden nada, por lo menos en el sentido humano de aprender. Otra importante limitación de estos sistemas es que son «cajas negras» sin capacidad explicativa, por ello un objetivo interesante de investigación será como dotar de capacidad explicativa a los sistemas de aprendizaje profundo incorporando módulos que permitan explicar como se ha llegado a los resultados y conclusiones propuestas, ya que la capacidad de explicación es una característica irrenunciable en cualquier sistema inteligente. También es necesario desarrollar nuevos algoritmos de aprendizaje que no requieran enormes cantidades de datos para ser entrenados así como un *hardware* mucho más eficiente en consumo energético para implementarlos, ya que el consumo de energía podría acabar siendo una de las principales barreras al desarrollo de la IA. En comparación, el cerebro es varios órdenes de magnitud más eficiente que el *hardware* actual necesario para implementar los algoritmos de IA más sofisticados. Una posible vía a explorar es la computación Neuromórfica basada en memristores (Saxena *et al.*, 2018).

Otras técnicas más clásicas de IA que seguirán siendo objeto de investigación extensiva son los sistemas multiagente, la planificación de acciones, el razonamiento basado en la experiencia, la visión artificial, la comunicación multimodal persona-máquina, la robótica humanoide y sobre todo las nuevas tendencias en *robótica del desarrollo* que puede ser la clave para dotar a las máquinas de sentido común y, en particular, aprender la relación entre sus acciones y los efectos que estas producen en el entorno. También veremos progresos significativos gracias a las aproximaciones biomiméticas para reproducir en máquinas el comportamiento de animales. No se trata únicamente de reproducir el comportamiento de un animal sino de comprender como funciona el cerebro que produce dicho comportamiento. Se trata de construir y programar circuitos electrónicos que reproduzcan la actividad cerebral que genera este comportamiento. Algunos biólogos están interesados en los intentos de fabricar un cerebro artificial lo más complejo posible porque consideran que es una manera de comprender mejor el órgano, y los ingenieros buscan información biológica para hacer diseños más eficaces. Mediante la biología molecular y los recientes avances en optogenética será posible identificar qué genes y qué neuronas juegan un papel clave en las distintas actividades cognitivas.

La robótica del desarrollo puede ser la clave para dotar a las máquinas de sentido común y, en particular, aprender la relación entre sus acciones y los efectos que estas producen en el entorno

En cuanto a las aplicaciones, algunas de las más importantes seguirán siendo aquellas relacionadas con la web, los videojuegos, los asistentes personales y los robots autónomos (en particular vehículos autónomos, robots sociales, robots para la exploración de planetas, etcétera). Las aplicaciones al medio ambiente y ahorro energético también serán importantes, así como las dirigidas a la economía y la sociología.



Por último, las aplicaciones de la IA al arte (artes visuales, música, danza, narrativa) cambiarán de forma importante la naturaleza del proceso creativo. Los ordenadores ya no son solamente herramientas de ayuda a la creación, los ordenadores empiezan a ser agentes creativos. Ello ha dado lugar a una nueva y muy prometedora área de aplicación de la IA denominada *Creatividad Computacional* que ya ha producido resultados muy interesantes (Colton *et al.*, 2009, 2015; López de Mántaras, 2016) en ajedrez, música, artes plásticas y narrativa, entre otras actividades creativas.

Reflexión final

Por muy inteligentes que lleguen a ser las futuras inteligencias artificiales, incluidas las de tipo general, nunca serán iguales a las inteligencias humanas ya que, tal como hemos argumentado, el desarrollo mental que requiere toda inteligencia compleja depende de las interacciones con el entorno y estas interacciones dependen a su vez del cuerpo, en particular del sistema perceptivo y del sistema motor. Ello, junto al hecho de que las máquinas no seguirán procesos de socialización y culturización como los nuestros, incide todavía más en que, por muy sofisticadas que lleguen a ser, serán inteligencias distintas a las nuestras. El que sean inteligencias ajenas a la humana y, por lo tanto, ajenas a los valores y necesidades humanas nos debería hacer reflexionar sobre posibles limitaciones éticas al desarrollo de la IA. En particular, estamos de acuerdo con la afirmación de Weizenbaum (Weizenbaum, 1976) de que ninguna máquina debería nunca tomar decisiones de forma completamente autónoma o dar consejos que requieran, entre otras cosas, de la sabiduría, producto de experiencias humanas, así como de tener en cuenta valores humanos.

Por muy inteligentes que lleguen a ser las futuras inteligencias artificiales nunca serán como la humana; el desarrollo mental que requiere toda inteligencia compleja depende de las interacciones con el entorno y estas dependen a su vez del cuerpo, en particular de los sistemas perceptivo y motor

El verdadero peligro de la IA no es la muy improbable singularidad tecnológica debida a la existencia de unas futuras hipotéticas superinteligencias artificiales, los verdaderos peligros ya están aquí. Actualmente los algoritmos en que se basan los motores de búsqueda en internet, los sistemas de recomendación y los asistentes personales de nuestros teléfonos móviles, conocen bastante bien lo que hacemos, nuestras preferencias y nuestros gustos e incluso pueden llegar a inferir el qué pensamos y cómo nos sentimos. El acceso a cantidades masivas de información, que voluntariamente generamos, es fundamental para que esto sea posible, ya que mediante el análisis de estos datos provenientes de fuentes diversas es posible encontrar relaciones y patrones que serían imposibles de detectar sin las técnicas de IA. Todo esto resulta en una pérdida alarmante de privacidad. Para evitarlo deberíamos tener derecho a poseer una copia de todos los datos personales que generamos, controlar su uso y decidir a quién le permitimos el acceso y bajo qué condiciones, en lugar de que estén en manos de grandes corporaciones sin poder saber realmente qué uso hacen de nuestros datos.



La IA está basada en programación compleja, y por lo tanto necesariamente cometerá errores. Pero incluso suponiendo que fuera posible desarrollar un *software* completamente fiable, hay dilemas éticos que los desarrolladores de *software* deben tener en cuenta a la hora de diseñarlo. Por ejemplo, un vehículo autónomo podría decidir atropellar a un peatón para evitar una colisión que podría causar daños a sus ocupantes. Equipar las empresas con sistemas avanzados de IA para hacer la gestión y la producción más eficientes requerirá menos empleados humanos y generará más paro. Estos dilemas éticos hacen que muchos expertos en IA señalen la necesidad de regular su desarrollo. En algunos casos se debería incluso de prohibir el uso de la IA. Un ejemplo claro son las armas autónomas. Los tres principios básicos que rigen los conflictos armados: discriminación (la necesidad de discernir entre combatientes y civiles o entre un combatiente en actitud de rendirse y uno dispuesto a atacar), proporcionalidad (evitar el uso desmedido de fuerza) y precaución (minimización del número de víctimas y daños materiales) son extraordinariamente difíciles de evaluar y, por lo tanto, casi imposibles de cumplir por los sistemas de IA que controlan las armas autónomas. Pero incluso en el caso de que a muy largo plazo las máquinas tuvieran esta capacidad, sería indigno delegar en una máquina la decisión de matar. Pero, además de regular, es imprescindible educar a los ciudadanos sobre los riesgos de las tecnologías inteligentes, dotándolos de las competencias necesarias para controlarla en lugar de ser controlados por ella. Necesitamos futuros ciudadanos mucho más informados, con más capacidad para evaluar los riesgos tecnológicos, con más sentido crítico y dispuestos a hacer valer sus derechos. Este proceso de formación debe comenzar en la escuela y tener continuación en la universidad. En particular es necesario que los estudiantes de ciencia e ingeniería reciban una formación ética que les permita comprender mejor las implicaciones sociales de las tecnologías que muy probablemente desarrollarán. Solo si invertimos en educación lograremos una sociedad que pueda aprovechar las ventajas de las tecnologías inteligentes minimizando los riesgos. La IA tiene sin duda un extraordinario potencial para beneficiar a la sociedad siempre y cuando hagamos un uso adecuado y prudente. Es fundamental aumentar la conciencia de las limitaciones de la IA, así como actuar de forma colectiva para garantizar que la IA se utilice en beneficio del bien común con seguridad, fiabilidad y responsabilidad.

El camino hacia la IA realmente inteligente seguirá siendo largo y difícil, al fin y al cabo la IA tiene apenas sesenta años y, como diría Carl Sagan, sesenta años son un brevísimo momento en la escala cósmica del tiempo; o, como muy poéticamente dijo Gabriel García Márquez: «Desde la aparición de vida visible en la Tierra debieron transcurrir 380 millones de años para que una mariposa aprendiera a volar, otros 180 millones de años para fabricar una rosa sin otro compromiso que el de ser hermosa, y cuatro eras geológicas para que los seres humanos fueran capaces de cantar mejor que los pájaros y morir de amor».

Bibliografía

- Bengio, Yoshua (2009): «Learning deep architectures for AI», en *Foundations and Trends in Machine Learning*, vol. 2, n.º 1, pp. 1-127.
- Brooks, Rodney A. (1991): «Intelligence without reason», *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'91)*, vol. 1, pp. 569-595.
- Colton, S.; López de Mántaras, R. y Stock, O. (2009): «Computational creativity: coming of age», en *AI Magazine*, vol. 30, n.º 3, pp. 11-14.
- Colton, S.; Halskov, J.; Ventura, D.; Gouldstone, I.; Cook, M. y Pérez-Ferrer, B. (2015): «The painting fool sees! New projects with the automated painter», *International Conference on Computational Creativity (ICCC 2015)*, pp. 189-196.
- Denet, D. C. (2018): *From Bacteria to Bach and Back: The Evolution of Minds*, Londres, Penguin Random House.
- Dreyfus, Hubert L. (1965): *Alchemy and Artificial Intelligence*, Santa Mónica, California, Rand Corporation.
- (1992): *What Computers Still Can't Do*, Nueva York, MIT Press.
- Ferrucci, D. A.; Levas, A.; Bagchi, S.; Gondek, D. y Mueller, E. T. (2013): «Watson: beyond jeopardy!», en *Artificial Intelligence*, n.º 199, pp. 93-105.
- Forbus, Kenneth D. (2012): «How minds will be built», en *Advances in Cognitive Systems*, n.º 1, pp. 47-58.
- Graves, A.; Wayne, G.; Reynolds, M.; Harley, T.; Danihelka, I.; Grabska-Barwińska, A.; Gómez-Colmenarejo, S.; Grefenstette, E.; Ramalho, T.; Agapiou, J.; Puigdomènech-Badia, A.; Hermann, K. M.; Zwols, Y.; Ostrovski, G.; Cain, A.; King, H.; Summerfield, C.; Blunsom, P.; Kavukcuoglu, K. y Hassabis, D. (2016): «Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory», en *Nature*, n.º 538, pp. 471-476.
- Holland, John. H. (1975): *Adaptation in natural and artificial systems*, Michigan, University of Michigan Press.
- Inhelder, Bärbel y Piaget, Jean (1958): *The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence*, Nueva York, Basic Books.
- Lake, B. M.; Ullman, T. D.; Tenenbaum, J. B. y Gershman, S. J. (2017): «Building machines that learn and think like people», en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 40, e253.
- López de Mántaras, R. (2016): «Artificial intelligence and the arts: toward computational creativity», en AA VV, *The Next Step: Exponential Life*, Madrid, BBVA/ Turner, pp. 100-125.
- McCulloch, Warren. S. y Pitts, Walter (1943): «A logical calculus of ideas immanent in nervous activity», en *Bulletin of Mathematical Biophysics*, n.º 5, pp. 115-133.
- Newell, Allen y Simon, Herbert A. (1976): «Computer science as empirical inquiry: symbols and search», en *Communications of the ACM*, vol. 19, n.º 3, pp. 113-126.
- Pearl, Judea y Mackenzie, Dana (2018): *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*, Nueva York, Basic Books.
- Saxena, V.; Wu, X.; Srivastava, I. y Zhu, K. (2018): «Towards neuromorphic learning machines using emerging memory devices with brain-like energy efficiency, preprints». Disponible en www.preprints.org
- Searle, John R. (1980): «Minds, brains, and programs», en *Behavioral and Brain Science*, vol. 3, n.º 3, pp. 417-457.
- Silver, D.; Huang, A.; Maddison, C. J.; Guez, A.; Sifre, L.; Ven den Driessche, G.; Schrittwieser, J.; Antonoglou, I.; Panneershelvam, V.; Lanctot, M.; Dieleman, S.; Grewe, D.; Nham, J.; Kalchbrenner, N.; Sutskever, I.; Lillicrap, T.; Leach, M.; Kavukcuoglu, K.; Graepel, T. y Hassabis, D. (2016): «Mastering the game of go with deep neural networks and tree search», en *Nature*, vol. 529, n.º 7587, pp. 484-489.
- Turing, Alan M. (1948): *Intelligent Machinery*, *National Physical Laboratory Report*, reimpresso en B. Meltzer y D. Michie (eds.) (1969): *Machine Intelligence 5*, Edimburgo, Edinburgh University Press, 1969.
- (1950): «Computing machinery and intelligence», en *Mind*, vol. 59, n.º 236, pp. 433-460.
- Weizenbaum, Joseph (1976): *Computer Power and Human Reasoning: From Judgment to Calculation*, San Francisco, W. H. Freeman and Company.
- Weng, J.; McClelland, J.; Pentland, A.; Sporns, O.; Stockman, I.; Sur, M. y Thelen, E. (2001): «Autonomous mental development by robots and animals», en *Science*, n.º 291, pp. 599-600.



José M. Mato

CIC bioGUNE. Centro de Investigación Cooperativa en Biociencias & CIC biomaGUNE. Centro de Investigación Cooperativa en Biomateriales

José M. Mato es fundador y director general de los centros de investigación bioGUNE (Bilbao) y biomaGUNE (San Sebastián) y profesor investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Licenciado en Bioquímica por la Universidad Complutense de Madrid, se doctoró en la Universidad de Leiden y su tesis recibió el premio C. K. Kok. Fue investigador posdoctoral en el Biozentrum de la Universidad de Basilea y de los National Institutes of Health y docente en la Fundación Jiménez Díaz de Madrid antes de ser nombrado profesor investigador del SCIC. Ha sido profesor en la facultad de Medicina de la Universidad de Navarra y profesor visitante de las universidades de Pensilvania y Thomas Jefferson. Entre 1992 y 1996 fue presidente del CSIC y en 2004 recibió el Premio Nacional de Investigación en Medicina. Su trabajo se centra en estudiar las alteraciones metabólicas como herramienta y blanco para la detección, prevención y tratamiento de la esteatohepatitis no alcohólica, incluyendo su degeneración en cirrosis y cáncer hepático. Es cofundador de OWL Metabolomics (en 2000) y de ATLAS Molecular Pharma (en 2016).

Libro recomendado: Boorstin, Daniel J. (2008): *Los descubridores*, Barcelona, Crítica.

El incremento en tres décadas de la esperanza de vida al nacer durante el siglo xx en numerosos países y regiones de Occidente es el mejor exponente del valor social de la ciencia y del triunfo de las políticas públicas de salud sobre la enfermedad. Proseguir en esta misión, extenderla a las miles de enfermedades raras que continúan sin tratamiento, llevarla a todos los países y a todos sus ciudadanos es el desafío de las próximas décadas.



La enfermedad tiene cinco miradas: la del paciente, la del clínico, la del científico, la de la industria y la de las agencias reguladoras. En un primer momento, el paciente experimenta su enfermedad y la atención médica que recibe de una manera única e individual; pero más tarde se produce una relación entre esta individualidad y la comunidad de personas con las que comparte los mismos síntomas. Esta conexión del individuo con su enfermedad ha impulsado lo que la Organización Mundial de la Salud (OMS) define como empoderamiento del paciente «un proceso mediante el cual las personas adquieren un mayor control sobre las decisiones y acciones que afectan a su salud»¹ y que debe verse como un proceso tanto individual como colectivo.

El clínico, por su parte, no ve en cada paciente un caso único e individual; ha aprendido que no debe vincularse emocionalmente con sus pacientes. Gradualmente dejan de tener un nombre, se convierten en una enfermedad que requiere un diagnóstico preciso y el tratamiento adecuado. Algunos vaticinan que la tecnología reemplazará a un gran porcentaje de los médicos en el futuro. Yo estimo que una parte muy importante de las tareas que realizan en la actualidad estarán robotizadas en el futuro, que se necesitarán equipos médicos de distintas especialidades para proporcionar la atención más precisa a cada paciente y que los datos masivos y la inteligencia artificial serán determinantes para el diagnóstico, pronóstico, tratamiento y seguimiento de la enfermedad. Una mejor tecnología no reemplazará a los médicos, les permitirá hacer mejor su trabajo.

Existe una gran superposición entre los términos medicina de precisión y medicina personalizada. La medicina personalizada es un término más antiguo con un significado similar al de medicina de precisión. Sin embargo, la palabra «personalizada» podría interpretarse como que los tratamientos y las prevenciones se van a desarrollar de forma única para cada individuo. En la medicina de precisión cada paciente sigue sin ser un caso único y la atención se centra en identificar qué enfoques son efectivos para qué pacientes en función de los genes, el metabolismo, el estilo de vida y el entorno de una persona.

Buena parte de las tareas que se realizan hoy estarán robotizadas en el futuro, habrá equipos médicos de distintas especialidades para proporcionar la atención más precisa a cada paciente y los datos masivos y la inteligencia artificial serán determinantes para el diagnóstico, pronóstico, tratamiento y seguimiento de la enfermedad

El concepto de medicina de precisión no es nuevo; los pacientes que reciben una transfusión se han emparejado con donantes según el tipo de sangre durante más de un siglo, lo mismo ocurre con los trasplantes de médula y de órganos desde hace décadas y, más recientemente, con el tratamiento del cáncer de mama, donde el pronóstico y las decisiones de tratamiento se guían principalmente utilizando información molecular y genética de las células tumorales.

Los avances en genética, en metabolismo y la creciente disponibilidad de datos clínicos proporcionan una oportunidad única para hacer posible que la atención con precisión del paciente se convierta en una realidad clínica. La medicina de precisión se basa en la disponibilidad de datos de pacientes y voluntarios sanos a gran escala. Para que la medicina de precisión cumpla

sus promesas, cientos de miles de personas deben compartir sus datos genómicos, metabólicos, sus registros de salud y sus experiencias.

All of Us es un proyecto de investigación que puso en marcha el presidente Barack Obama el 20 de enero de 2015 con estas expresivas palabras: «Esta noche, estoy lanzando una nueva iniciativa en medicina de precisión para acercarnos a curar enfermedades como el cáncer y la diabetes y para darnos a todos acceso a la información personalizada que necesitamos para mantenernos cada uno de nosotros y nuestras familias más saludables». ² Tres años después, en mayo de 2018, este monumental proyecto se puso en marcha con el objetivo de reclutar a más de un millón de voluntarios para que compartan información sobre su salud (historias clínicas, muestras biológicas, encuestas de salud, etcétera) durante muchos años.

Para los científicos, este es un material único. Cuanto más ricas sean las bases de datos, más precisa será la atención al paciente. Los datos masivos y la inteligencia artificial están íntimamente ligados: los datos son los componentes básicos de los algoritmos de aprendizaje, si se tiene suficiente volumen de datos y se analizan correctamente pueden aportar una información inconcebible cuando se emplean otras técnicas. Bancos, compañías como Google y Amazon o empresas eléctricas utilizan desde hace décadas los datos masivos para mejorar la toma de decisiones y explorar nuevas oportunidades de negocio.

El empleo de datos masivos en ciencia tampoco es nuevo, los físicos de partículas y biólogos estructurales fueron pioneros en el desarrollo y aplicación de los algoritmos que hay detrás de estas tecnologías. En medicina, los datos masivos tienen el potencial de reducir el coste de los diagnósticos y tratamientos, predecir brotes epidémicos, evitar enfermedades prevenibles y mejorar la calidad de vida en general.

Por ejemplo, varios hospitales públicos de París utilizan datos de una amplia diversidad de fuentes para hacer predicciones diarias y horarias del número de pacientes que se espera estén en cada hospital. Cuando un radiólogo solicita una tomografía computarizada, la inteligencia artificial puede revisar la imagen e identificar los posibles hallazgos de inmediato, a partir de la imagen y también al analizar los antecedentes del paciente relacionados con la anatomía escaneada. Cuando el cirujano tiene que tomar una decisión compleja, como decidir sobre el momento de la cirugía, si la intervención será radical o se preservará el órgano, o proporcionar a los pacientes datos precisos sobre los riesgos potenciales y la probabilidad de mayor morbilidad y mortalidad, la inteligencia artificial mediante el análisis de un gran volumen de datos de intervenciones similares puede proporcionar esta información de forma inmediata.

Naturalmente, han surgido diversas cuestiones legales y éticas relativas a las condiciones bajo las cuales los investigadores pueden acceder a las muestras biológicas y a los datos —principalmente cuando se trata de DNA—, a la propiedad de las muestras biológicas y la propiedad intelectual derivada de su uso y a cuestiones relacionadas con los derechos de acceso, confidencialidad, publicación, seguridad y protección de la información almacenada. Los NIH (National Institutes of Health) de Estados Unidos han dado muestras de no poca capacidad para salir de las dificultades que plantean estas cuestiones y alcanzar acuerdos en tiempos que requieren diálogo y esfuerzo entre todas las partes implicadas: pacientes, voluntarios sanos, médicos, científicos, especialistas en aspectos éticos y legales.

Información genética, proteómica y metabólica; estudios histológicos y de imagen; del microbioma (el microbiota humano lo integran los miles de miles millones de células microbianas simbióticas albergadas por cada persona, principalmente las bacterias intestinales; el microbioma humano consiste en los genes que estas células albergan); datos demográficos, clínicos y encuestas de salud son los principales registros que integran las bases de datos masivos.

«La ciencia son hechos; así como las casas están hechas de piedras, la ciencia está hecha de hechos; pero un montón de piedras no es una casa y una colección de hechos no es





necesariamente ciencia».³ Son palabras de Henri Poincaré, advirtiendo de que un conjunto de datos, por muy grande que sea, no es ciencia; la Real Academia Española define la ciencia como «el conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente».⁴ La mente humana está organizada de tal forma que insistirá en hallar una relación entre dos hechos cualquiera que se le presenten; además, cuanto más distintos sean los hechos —una sinfonía de Gustav Mahler y una novela de Thomas Mann; datos masivos y una enfermedad— más estimulante será el esfuerzo de descubrir su relación.

Biología de sistemas

El científico busca mediante la estructuración y el análisis de las bases de datos el material básico para identificar los conceptos que se ocultan debajo de su apariencia confusa, como por ejemplo establecer una distinción precisa entre dos subtipos de una misma enfermedad con histologías similares pero que responden diferente al tratamiento o tienen distinto pronóstico. La biología de sistemas es la rama de la investigación en biología que trata sobre estos temas; es decir, descifrar la complejidad de los sistemas biológicos. Es una aproximación holística que se basa en la premisa de que las redes de interacciones que constituyen un organismo vivo son más que la suma de sus partes.

La biología de sistemas integra múltiples disciplinas —bioquímica, biología estructural, biología molecular y celular, matemáticas, bioinformática, imagen molecular, ingeniería, etcétera— para crear algoritmos que predigan cómo un sistema biológico cambia en el tiempo y frente a diferentes condiciones —salud versus enfermedad; ayuno versus alimentación— y desarrollar soluciones a los problemas de salud y ambientales más acuciantes.

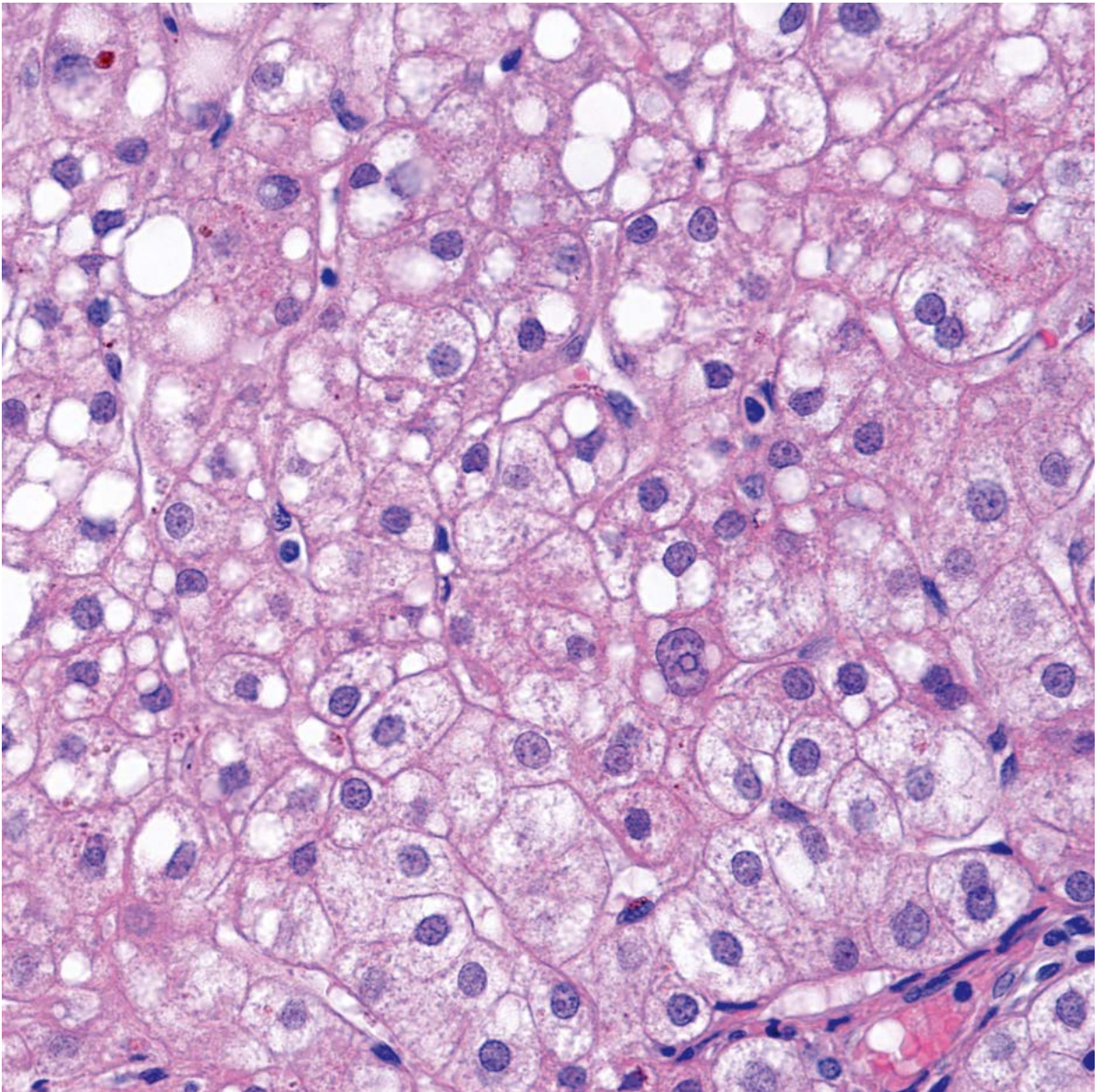
A nivel biológico, el cuerpo humano está formado por múltiples redes que se integran y comunican a múltiples escalas. Desde nuestro genoma hasta las proteínas y metabolitos que constituyen las células que configuran los órganos de nuestros cuerpos, somos fundamentalmente una red de redes de interacciones que se pueden definir mediante algoritmos. La biología de sistemas analiza estas redes a través de escalas para integrar comportamientos en diferentes niveles, formular hipótesis sobre la función biológica y proporcionar conocimientos espaciales y temporales sobre los cambios biológicos dinámicos. Para estudiar la complejidad de la biología no es suficiente comprender solo una parte de un sistema, hay que entender su totalidad.

El reto al que se enfrenta la biología de sistemas supera cualquier desafío que haya afrontado hasta ahora la ciencia. Consideremos el caso del metabolismo; los fenotipos metabólicos —de una célula, un órgano o un organismo— son los resultados de todas las actividades catalíticas de las enzimas (las proteínas que catalizan específicamente una reacción bioquímica del metabolismo) establecidas por las propiedades cinéticas, la concentración de sustratos, productos, cofactores, etcétera y de todas las interacciones reguladoras no lineales a nivel transcripcional (la etapa de la expresión genética en la que la secuencia de ADN es copiada en una secuencia de ARN), traslacional (el proceso que decodifica una secuencia de ARN para generar una cadena específica de aminoácidos y formar una proteína), postraduccionales (las modificaciones covalentes de una proteína después de ser sintetizada que inducen una gran variedad de cambios estructurales y funcionales) y alostérico (un cambio en la estructura y actividad de una enzima que resulta de la unión no covalente con otra molécula en un sitio que es diferente del centro químicamente activo).

En otras palabras, una descripción metabólica detallada requiere conocer no solo todos los factores que influyen en la cantidad y el estado de las enzimas, sino también la concentración



Fotomicrografía de un hígado con esteatosis macrovesicular (hígado graso). Numerosos hepatocitos (células hepáticas) presentan una o dos gotas lipídicas de gran tamaño que causan distensión y desplazan el núcleo (de color morado oscuro)





En medicina, los datos masivos tienen el potencial de reducir el coste de los diagnósticos y tratamientos, predecir brotes epidémicos, evitar enfermedades prevenibles y mejorar la calidad de vida en general

Detalle de células de cáncer de pecho. Este tipo de cáncer afecta a una de cada ocho mujeres



El programa de investigación *All of Us*, iniciado por Obama, se puso en marcha en mayo de 2018 para reclutar a más de un millón de voluntarios que compartirán información sobre su salud durante muchos años

Partidarios de la Ley de Protección al Paciente y Cuidado de Salud Asequible celebran su aprobación en el Tribunal Supremo por seis votos a tres en Washington, el 25 de junio de 2015



de todos los metabolitos que regulan cada reacción. Como consecuencia, los flujos metabólicos (el paso de todos los metabolitos a través del conjunto de todas las reacciones enzimáticas de un sistema a lo largo del tiempo) no pueden determinarse conociendo únicamente la concentración de metabolitos o viceversa, conociendo solo todas las interacciones no lineales de las enzimas.

Para determinar los flujos metabólicos con un cierto grado de confianza es necesario conocer la concentración de todos los metabolitos implicados y las cantidades de proteína de todas las enzimas implicadas, con sus modificaciones postraduccionales, junto a un detallado modelo computacional de las reacciones que catalizan.

Paralelamente, se requiere un enfoque de biología de sistemas para integrar grandes conjuntos de datos heterogéneos, como transcriptómica (el estudio del conjunto completo de transcritos de ARN), proteómica (el estudio del conjunto completo de proteínas), metabolómica (el estudio del conjunto completo de metabolitos) y fluxómica (el estudio en el tiempo del destino de cada uno de los metabolitos y el análisis de las rutas utilizadas), y construir con ellos un modelo metabólico integral.

Se estima que en el genoma humano hay entre 20.000 y 25.000 genes que codifican proteínas, de las cuales cerca de 3.000 son enzimas que pueden dividirse aproximadamente en 1.700 metabólicas y 1.300 no metabólicas, incluidas las responsables de las modificaciones postraduccionales de enzimas metabólicas, como las proteínas cinasas, también llamadas quinasas, que operan como transductores de señales modificando las propiedades cinéticas de las enzimas metabólicas (de ahí el nombre de cinasa o quinasa, que deriva del inglés *kinetic*) mediante fosforilación (introducir ácido fosfórico en una proteína) ocupando un lugar central en la regulación del metabolismo. Las enzimas metabólicas se han asignado a unas 140 rutas metabólicas (conjunto de reacciones químicas vinculadas catalizadas por enzimas) diferentes.

Este mapa metabólico humano, aunque podría decirse que es la red celular mejor caracterizada, aún permanece incompleto. Existe una importante cantidad de metabolitos, enzimas y rutas metabólicas que todavía no han sido bien caracterizados o que simplemente se desconocen; incluso en las rutas metabólicas más antiguas, como la glicólisis (conjunto de reacciones químicas que degradan algunos azúcares, como la glucosa, obteniendo energía en el proceso), el ciclo de la urea (un ciclo de cinco reacciones bioquímicas que convierten el amoníaco tóxico en urea para ser excretado en la orina) y la síntesis de lípidos, existen muchos huecos sin completar. Los fenotipos metabólicos son, además, el producto de las interacciones entre una variedad de factores externos —dietéticos y otros estilos de vida, conservantes, contaminantes, ambientales, microbianos— que igualmente deben estar integrados en el modelo.

La biología de sistemas integra múltiples disciplinas —bioquímica, biología estructural, biología molecular y celular, matemáticas, bioinformática, imagen molecular o ingeniería— para crear algoritmos que predigan cómo un sistema biológico cambia en el tiempo y frente a diferentes condiciones

La colección completa de moléculas pequeñas (metabolitos) que se encuentran en el cuerpo humano —incluidos los lípidos, aminoácidos, carbohidratos, ácidos nucleicos, ácidos orgánicos, aminas biogénicas, vitaminas, minerales, aditivos alimentarios, fármacos, productos cosméticos, contaminantes y cualquier otra sustancia química de pequeño tamaño que los humanos ingieren, metabolizan o entran en contacto— se desconoce; se han identificado alrededor de 22.000, aunque se estima que el metaboloma humano puede superar los 80.000 metabolitos.



La idea de que la enfermedad produce cambios en los fluidos biológicos y de relacionar patrones químicos con la salud es muy antigua. Los «diagramas de la orina», unas tablas en las que se vinculaban los colores, olores y sabores de la orina —todos ellos estímulos de naturaleza metabólica— a diversas condiciones médicas se utilizaron ampliamente en la Edad Media para el diagnóstico de diversas enfermedades. Si la orina tenía un sabor dulce se diagnosticaba diabetes, que significa «sifón» (para indicar que los pacientes orinaban frecuentemente). En 1675 se añadió la palabra *mellitus*, que significa «miel» (para testificar que era dulce), y en el siglo XIX se desarrollaron métodos para detectar la presencia de glucosa en la orina de las personas diabéticas. En 1922, Frederick Banting y su equipo utilizaron un extracto pancreático que denominaron «insulina» para tratar con éxito a un paciente con diabetes, un descubrimiento que les valió el premio Nobel de Medicina un año más tarde; en 1921, Nicolae Paulescu había demostrado el efecto antidiabético de un extracto de páncreas que llamó «pancreina», un descubrimiento que patentó en 1922.

El restablecimiento de la homeostasis metabólica (conjunto de fenómenos de autorregulación que conducen al mantenimiento de la constancia en la composición de metabolitos y propiedades del medio interno de una célula, un tejido o un organismo) mediante terapia de sustitución ha sido empleado con éxito en numerosas ocasiones, como en la enfermedad de Parkinson, donde el restablecimiento de la concentración de dopamina mediante el tratamiento con levodopa tiene un efecto terapéutico incuestionable; un descubrimiento que le valió a Arvid Carlsson el premio Nobel de Medicina en 2000.

La interrupción del flujo metabólico, sin embargo, no solo afecta a los metabolitos que se encuentran por debajo de la reacción que está interrumpida; como si se tratase de una red fluvial, también produce la acumulación de metabolitos aguas arriba. Por ejemplo, la fenilcetonuria, una enfermedad metabólica hereditaria rara (se dice que una enfermedad es rara cuando afecta a menos de una de cada 2.000 personas) causada por la deficiencia en fenilalanina hidroxilasa (una enzima que convierte la fenilalanina en el aminoácido tirosina) produce la acumulación de fenilalanina en la sangre y el cerebro; a concentraciones elevadas, la fenilalanina es tóxica causando anomalías graves e irreversibles en la estructura y función del cerebro. El tratamiento en recién nacidos afectados por este error congénito del metabolismo con una dieta deficiente en fenilalanina previene el desarrollo de la enfermedad.

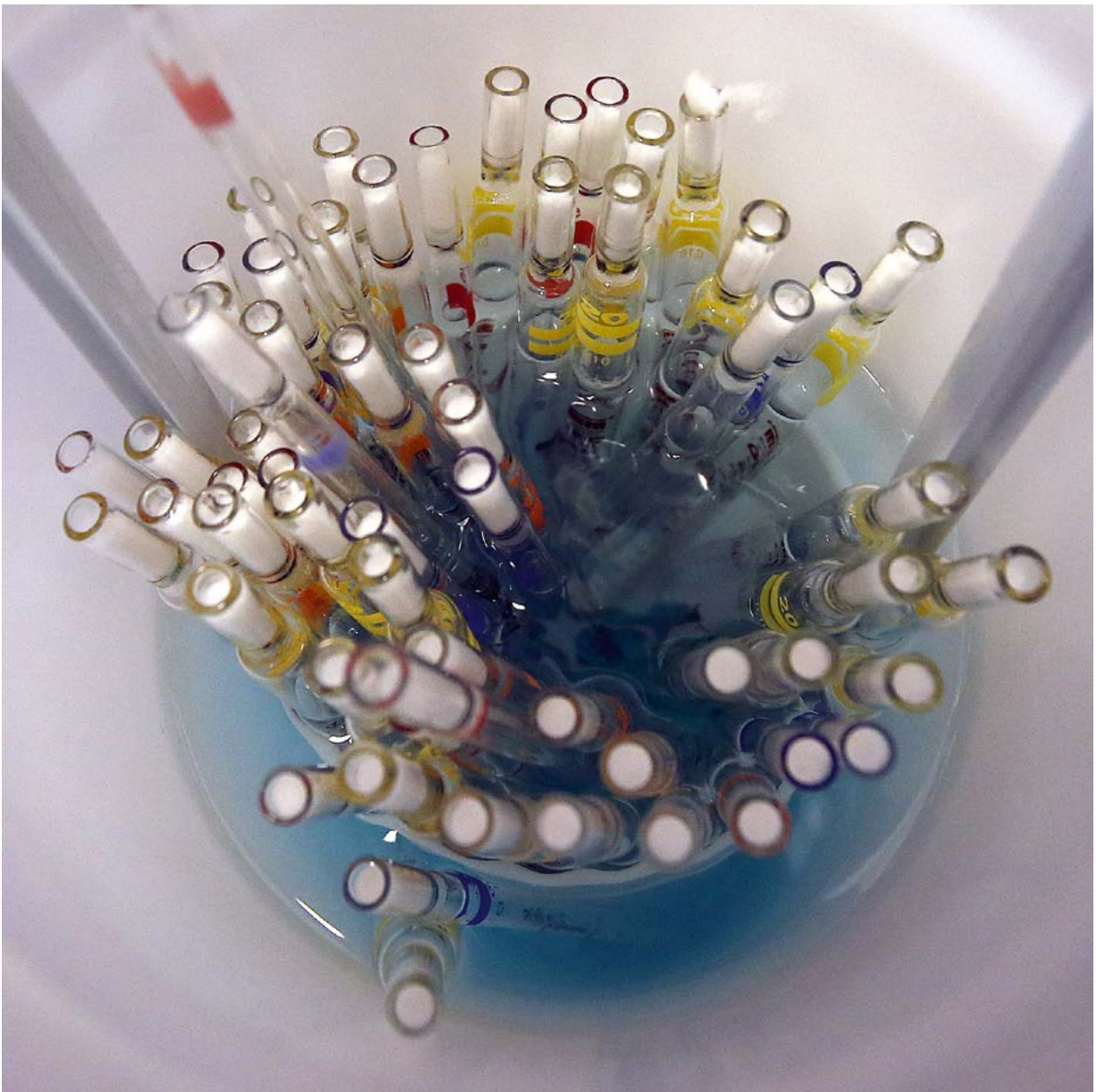
Otro ejemplo es la intolerancia hereditaria a la fructosa (IHF), que aparece como resultado de la deficiencia de aldolasa B, una enzima que desempeña un papel crucial en el metabolismo de la fructosa y la gluconeogénesis (la ruta metabólica que conduce a la síntesis de glucosa a partir de precursores que no son carbohidratos). Las personas afectadas con IHF desarrollan disfunción hepática y renal después del consumo de fructosa, que puede conducir a la muerte particularmente durante la infancia. El único tratamiento de esta enfermedad rara es la eliminación de la dieta de todas las fuentes de fructosa, tales como la sacarosa, zumos de frutas, espárragos o guisantes.

Cuando la eliminación de un nutriente de la dieta no es una opción para el restablecimiento de la homeostasis metabólica, una alternativa es diseñar chaperonas farmacológicas; pequeñas moléculas que se asocian a las proteínas mutantes para estabilizarlas y provocar que se comporten correctamente; de ahí el nombre de «chaperona»: persona que acompaña a una pareja o a un joven para vigilar su comportamiento.

En el caso de ciertas proteínas, como la uroporfirinógeno III sintasa, una enzima clave en la síntesis del grupo hemo (el grupo prostético que forma parte de numerosas proteínas, como la hemoglobina) cuya deficiencia causa la porfiria eritropoyética congénita, este enfoque



Instituto Max Planck de biología infecciosa. Pipetas usadas dentro del contenedor en el que se introducen antes de limpiarse y desinfectarse



terapéutico ha tenido un éxito llamativo en un modelo experimental de la enfermedad, apoyando la idea de que las chaperonas farmacológicas pueden convertirse en poderosas herramientas terapéuticas.



Terapia génica y edición del genoma

En septiembre de 1990 se llevó a cabo en los NIH el primer tratamiento de terapia génica (una técnica experimental que emplea genes para tratar o prevenir enfermedades) para combatir la deficiencia en la enzima adenosina deaminasa (una enfermedad hereditaria rara que causa inmunodeficiencia severa) en una niña de cuatro años. En 2016, la Agencia Europea del Medicamento (EMA) recomendó el uso de esta terapia en niños con ADA cuando no es posible emparejarlos con un donante de médula adecuado. Aunque la terapia génica es un tratamiento prometedor para diversas enfermedades (incluidas enfermedades hereditarias, algunos tipos de cáncer y ciertas infecciones virales), treinta años después de los primeros estudios clínicos no está exenta de riesgos y se sigue investigando para que sea una técnica eficaz y segura. En la actualidad solo se está usando en enfermedades que no tienen otros tratamientos.

La edición del genoma, o edición de genes, es otra técnica de gran interés en la prevención y tratamiento de las enfermedades. Se refiere a un conjunto de tecnologías que permiten agregar, eliminar o alterar el material genético en lugares específicos del genoma. Se han desarrollado varios enfoques para la edición del genoma. La FDA aprobó en agosto de 2018 la primera terapia basada en RNA de interferencia (RNAi), una técnica descubierta hace veinte años que puede ser utilizada para «silenciar» genes causantes de enfermedades específicas. La más reciente se conoce como CRISPR-Cas9. Se está investigando su aplicación a enfermedades hereditarias raras, como la fibrosis quística o la hemofilia, y también para el tratamiento y prevención de enfermedades complejas, como el cáncer, las enfermedades cardíacas y las enfermedades mentales. Como en el caso de la terapia génica y el RNAi, la aplicación médica de la edición génica no está exenta de riesgos y su resolución tomará tiempo.

Transformación metabólica

Friedrich Nietzsche, refiriéndose a la filología, decía que «es un arte respetable, que exige a quienes la admiran que se mantengan al margen, que se tomen tiempo, que se vuelvan silenciosos y pausados; un arte de orfebrería, una pericia propia de un orfebre de la *palabra*, un arte que exige un trabajo sutil y delicado, en el que no se consigue nada si no se actúa con lentitud». ⁵ Sustitúyase «orfebre de la *palabra*» por «orfebre del *método científico*», y esta sugerente frase de Nietzsche es aplicable a la investigación biomédica. Limitarse a perseguir lo útil, en ciencia, suprime la imaginación.

En la década de 1920, Otto Warburg y su equipo hicieron la observación de que los tumores utilizaban enormes cantidades de glucosa en comparación con la que consumía el tejido circundante. Además, observaron que la glucosa se metabolizaba para producir lactato como fuente de energía (ATP), en lugar de CO₂, incluso en presencia de suficiente oxígeno para la respiración, un proceso que se conoce como glicolisis anaerobia (ninguna de las nueve reacciones de esta ruta metabólica que une a la glucosa con el lactato emplea oxígeno). Este cambio de glicolisis aerobia a anaerobia en los tumores se conoce con el nombre de «efecto Warburg». El efecto Warburg es una adaptación metabólica, una ventaja de las células tumorales para crecer; las células tumorales utilizan los tres átomos de carbono del lactato para sintetizar



los «materiales básicos» de los que están hechos las células (aminoácidos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, etcétera) y generar masa.

Ahora sabemos que, aunque colectivamente los tumores exhiben un amplio paisaje de cambios genéticos, las células neoplásicas exhiben un fenotipo común que se caracteriza por un crecimiento desordenado que mantiene su potencial invasivo y letalidad. Sustener esta imparable división celular requiere adaptaciones metabólicas que promuevan la supervivencia del tumor y destruyan las células normales; esta adaptación se ha denominado «transformación metabólica». De hecho, aunque la transformación celular en distintos tipos de tumores surge de múltiples vías diferentes, los requerimientos metabólicos de las células tumorales resultante son similares: las células cancerígenas deben generar energía (ATP), sintetizar los «materiales básicos» para sostener el crecimiento celular y equilibrar el estrés oxidativo resultante de su crecimiento imparable.

Debido a estos requerimientos comunes, en la actualidad hay un gran interés en diseccionar los mecanismos y el impacto de la transformación metabólica tumoral, con el objetivo de diseñar terapias que bloqueen estas adaptaciones y sean efectivos para frenar el crecimiento del cáncer y la metástasis.

En 1948, Sidney Farber y su equipo obtuvieron remisiones en varios niños con leucemia aguda indiferenciada utilizando aminopterin, un inhibidor de la enzima dihidrofolato reductasa que cataliza una reacción necesaria para la síntesis de DNA. Esa molécula fue el predecesor del metotrexato, un medicamento para el tratamiento del cáncer que se usa comúnmente en la actualidad.

En la actualidad hay un gran interés en diseccionar los mecanismos y el impacto de la transformación metabólica tumoral, con el objetivo de diseñar terapias que sean efectivas para frenar el crecimiento del cáncer y la metástasis

La era de la quimioterapia comenzó modificando el metabolismo de los tumores; desde entonces, otros investigadores han descubierto moléculas capaces de frenar el crecimiento de diversos tipos de cáncer y la metástasis habiéndose reducido la tasa anual de mortalidad por cáncer un promedio del 1,4% en mujeres y 1,8% en hombres, desde 1999 hasta 2015 en Estados Unidos (los datos en Europa son similares).

En 1976, después de analizar 6.000 muestras de extractos de hongos, Akira Endo aisló la mevastatina, una molécula capaz de bloquear la actividad de la enzima 3-hidroxy-3-metil-glutaril-coenzima A reductasa. Esta enzima cataliza la reacción limitante en la síntesis de colesterol. La mevastatina fue la predecesora de la lovastatina, un medicamento que desde 1984 se emplea comúnmente para el tratamiento de la hipercolesterolemia. Desde entonces se han descubierto otras estatinas con mejor perfil de eficacia y seguridad.

La reducción de la concentración de colesterol mediante el tratamiento con estatinas tiene un efecto terapéutico incuestionable sobre la aparición de incidentes cardiovasculares; es uno de los principales factores que han contribuido a la disminución de más del 50% de las muertes por enfermedad cardiovascular y derrames cerebrales en las últimas décadas en los países occidentales; los otros dos son los medicamentos antihipertensivos (la hipertensión es una enfermedad metabólica resultante del desequilibrio en la homeostasis del agua y electrolitos, principalmente sodio y potasio) y antidiabéticos.

Conclusión

El incremento en tres décadas de la esperanza de vida al nacer durante el siglo XX en numerosos países y regiones de Occidente es el mejor exponente del valor social de la ciencia y del triunfo de las políticas públicas de salud sobre la enfermedad: el descubrimiento de las vitaminas y la insulina, el desarrollo de vacunas, los antibióticos, los rayos X, la cirugía a corazón abierto, la quimioterapia, los antihipertensivos, las técnicas de imagen, los anti-diabéticos, las estatinas, los antivirales o la inmunoterapia son ejemplos de la productiva colaboración entre la academia y la industria. En 2015, aprovechando los avances de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, las Naciones Unidas adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que incluyen el compromiso de alcanzar la cobertura universal de salud en 2030. Sin embargo, aún existen enormes diferencias entre lo que se puede conseguir en salud y lo que se ha logrado, y el progreso ha sido incompleto y desigual. Alcanzar este objetivo requiere un esfuerzo integral y continuo que permita mejorar la calidad de los servicios de atención médica a nivel mundial.

¿Se podría acelerar el proceso de transformar el conocimiento en salud? En 1996, James Allison observó que los ratones tratados con un anticuerpo anti-CTLA-4 (un receptor que regula negativamente la respuesta de los linfocitos T) rechazaban los tumores; los estudios clínicos comenzaron en 2001 y en 2011 la FDA aprobó este procedimiento para tratar el melanoma metastásico, el primer fármaco oncológico basado en la activación del sistema inmune. Este trabajo le valió a Allison el Premio Nobel de Medicina en 2018.

Cinco años para finalizar los estudios preclínicos y diez más para los ensayos clínicos pueden parecer muchos. La investigación preclínica responde a preguntas básicas sobre el mecanismo de acción y la seguridad de un medicamento, si bien no sustituye a los estudios sobre las formas en que el medicamento interactuará con el cuerpo humano. De hecho, los ensayos clínicos siguen una serie de fases estrictamente regladas por las agencias del medicamento (EMA, FDA) desde los iniciales de fase 1 y 2, a pequeña escala, a los de fase 3 y 4 a gran escala.

La complejidad del diseño, el incremento del número de pacientes, los criterios de inclusión, la seguridad, los criterios para demostrar eficacia y periodos más largos de tratamiento son las principales causas que han alargado la duración de los ensayos clínicos.

No es exagerado decir que mantener el *statu quo* obstaculiza el desarrollo de nuevos fármacos, principalmente en aquellas áreas terapéuticas más necesitadas. Pacientes, médicos, investigadores, industria y agencias reguladoras necesitan alcanzar acuerdos para acelerar el progreso y precisión de los tratamientos. Además, la industria farmacéutica necesita pensar con mucho cuidado sobre si el elevado coste de los nuevos tratamientos estuviese dejando al margen de sus beneficios terapéuticos a una parte importante de la población general, repercutiendo negativamente en la calidad y esperanza de vida. La ciencia es una obra social.



Notas

1. OMS (1998): *Promoción de la Salud: Glosario*, Ginebra, Organización Mundial de la Salud, p. 16. Disponible en <http://www.who.int/healthpromotion/about/HPR%20Glossary%201998.pdf>

2. Frase del discurso a la Nación del presidente Barack Obama, del

20 de enero de 2015. Disponible en The White House, Office of the Press Secretary, <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/01/20/remarks-president-state-union-address-january-20-2015>

3. Poincaré, Henri (1908): *La Science et l'Hypothèse*, París, Ernest Flammarion Éditeur, p. 168.

4. *Diccionario de la Real Academia Española*, consultado online, <http://dle.rae.es/?id=9AwuYaT>

5. Nietzsche, Friedrich (1994): *Aurora. Reflexiones sobre los prejuicios morales*, Madrid, M. E. Editores, p. 32.



Daniela Rus
MIT-Massachusetts Institute
of Technology

Daniela Rus es profesora Andrew (1956) y Erna Viterbi de Ingeniería Eléctrica y Ciencias Informáticas y directora del Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (CSAIL) del MIT. Sus áreas de interés son la robótica, la inteligencia artificial y la ciencia de datos. Su trabajo se centra en desarrollar la ciencia y la ingeniería de la autonomía con el objetivo a largo plazo de hacer posible un futuro en el que las máquinas estén integradas en el día a día y ayuden a las personas en tareas cognitivas y físicas. Con su investigación, busca acortar algunas de las brechas entre la situación actual de los robots y la promesa de robots ubicuos, lo que se traduce en aumentar la capacidad de las máquinas de razonar, aprender y adaptarse a tareas complejas en entornos humanos, desarrollar interfaces intuitivas entre robots y personas y crear herramientas necesarias para desarrollar y fabricar nuevos robots de manera veloz y eficiente. Rus es profesora asociada del Quest for Intelligence Core del MIT y directora del centro de investigación conjunta Toyota-CSAIL, dedicado al desarrollo de IA y sus aplicaciones en vehículos inteligentes. También forma parte del consejo asesor del Instituto de Investigación de Toyota. Asimismo, ha sido becaria MacArthur, ACM, AAAI y IEEE y es miembro de las academias estadounidenses de Ingeniería y de Artes y Ciencias. En 2017 recibió el premio Engelberger Robotics de la Robotics Industries Association. Se doctoró en Ciencias Informáticas en la Universidad de Cornell.

Libro recomendado: Markoff, John (2015): *Machines of Loving Grace* [Máquinas misericordes]. Nueva York, Harper Collins Publishers.

Al personalizar y democratizar el uso de las máquinas, los robots saltan a la palestra. Puede que su integración exhaustiva en la vida cotidiana suponga que todo el mundo pueda depender de ellos como apoyo para sus tareas físicas, del mismo modo que ahora dependemos de aplicaciones para tareas informáticas. A medida que los robots vayan pasando de nuestra imaginación a nuestras casas, oficinas y fábricas, se irán convirtiendo en colaboradores que nos ayuden a hacer mucho más de lo que hacemos solos. Los robots añadirán infinitas posibilidades a cómo nos movemos, qué construimos y dónde, e incluso a los materiales que usamos para crear cosas.



Imaginemos un futuro en el que los robots estén tan integrados en el devenir de la vida humana que sean tan habituales como los teléfonos inteligentes hoy en día. El campo de la robótica podría mejorar enormemente nuestra calidad de vida en los ámbitos laboral y doméstico, y también nuestros juegos, proporcionándonos apoyo tanto en labores cognitivas como físicas. Los robots llevan años ayudando a los seres humanos a realizar tareas peligrosas, desagradables o tediosas, y han permitido explorar entornos de difícil acceso, entre ellos las profundidades marinas o el espacio exterior. Cada vez habrá más robots capaces de adaptarse y de aprender e interactuar cognitivamente con los seres humanos y con otras máquinas.

Los rápidos avances tecnológicos de la pasada década han convertido la informática en algo indispensable que ha transformado nuestra forma de trabajar, vivir y jugar. La digitalización de casi todo, unida a los avances en robótica, nos promete un futuro en el que se democratice y personalice a gran escala el acceso a máquinas muy complejas. La capacidad de los robots va en aumento, ya que pueden llevar a cabo cálculos más difíciles y relacionarse con el mundo mediante sensores cada vez más precisos y activadores de mejor calidad.

Nuestro mundo conectado, con muchos robots personalizados que trabajan junto a las personas, ya está creando nuevos empleos, mejorando la calidad de los existentes y ahorrándole a la gente tiempo para que pueda dedicarse a lo que considera interesante, importante y estimulante. Los robots ya son nuestros colaboradores en entornos industriales y domésticos. Cooperan con los seres humanos en fábricas y quirófanos. Nos cortan el césped, aspiran el suelo e incluso ordeñan nuestras vacas. Dentro de pocos años estarán presentes en todavía más aspectos de nuestra vida.

Al desplazarnos al trabajo en coches sin conductor podremos leer, devolver llamadas, ponernos al día de nuestros *podcasts* favoritos e incluso echar un sueñecillo. El coche-robot también servirá de ayudante, puesto que nos dirá qué necesitamos hacer, planificará los trayectos para que podamos realizar todas nuestras tareas y utilizará la información sobre tráfico más actualizada para evitar las vías más congestionadas. Los coches sin conductor ayudarán a reducir las víctimas de los accidentes en carretera, mientras que las carretillas elevadoras autónomas podrán ayudar a eliminar las dolencias de espalda que produce levantar pesos. Quizá los robots cambien algunos empleos actuales, pero, en general, sus contribuciones a la sociedad pueden ser muy positivas. Los que cortan el césped o limpian piscinas han cambiado la forma de realizar estas tareas. Los robots pueden ayudar a la humanidad a solucionar problemas de todo tipo.

La robótica no aspira a sustituir a los seres humanos mediante la mecanización y la automatización de tareas, sino a encontrar formas de colaboración más eficaz entre robots y personas. A los primeros se les dan mejor labores como procesar números y moverse con precisión. Y pueden levantar objetos mucho más pesados. Nosotros, los seres humanos, somos mejores que los robots en razonar, definir conceptos abstractos, hacer generalizaciones o en especializarnos gracias a nuestra capacidad para aprovechar experiencias anteriores. Si colaboran, los robots y los seres humanos podrán aumentar sus capacidades y complementarse mutuamente.

Una década de progresos hacia la autonomía

Los avances de la robótica durante la última década han demostrado que hay aparatos robotizados que pueden mover y manipular a personas e interactuar con ellas y con su entorno de forma singular. Las capacidades locomotoras de los robots se basan en la enorme disponibilidad de sensores precisos (por ejemplo, escáneres láser) y de motores de alto rendimiento, y en el



desarrollo de complejos algoritmos que permiten cartografiar, localizar, planificar desplazamientos y orientarse mediante coordenadas. Los avances en el desarrollo de cuerpos robóticos (maquinaria) y cerebros robóticos (programas) permiten multitud de nuevas aplicaciones.

Las capacidades de los robots las define el estrecho acoplamiento entre su estructura física y el programa informático que acoge su cerebro. Por ejemplo, un robot volante debe estar dotado de un cuerpo capaz de volar y de algoritmos que controlen el vuelo. Los robots actuales pueden realizar desplazamientos sencillos de carácter terrestre, aéreo y acuático. Reconocen objetos, cartografían nuevos entornos, realizan operaciones de recogida y colocación, aprenden a mejorar el control, imitan movimientos humanos sencillos, adquieren nuevos conocimientos e incluso pueden coordinarse entre sí. Por ejemplo, en el campeonato anual de fútbol para robots llamado RoboCup se observa cómo se comportan los últimos robots y algoritmos diseñados para practicar ese deporte.

Los últimos avances en materia de unidades de memoria, la magnitud y el rendimiento de internet, la comunicación inalámbrica, las herramientas de diseño y fabricación, así como el poder y la eficacia de la electrónica, todo ello unido al incremento en todo el mundo del almacenamiento de datos, han influido de múltiples maneras en el desarrollo de la robótica. Los costes de la maquinaria están bajando, las piezas electromecánicas son más fiables, las herramientas para fabricar robots, más versátiles, los entornos informáticos, más accesibles, y los robots pueden acceder al conocimiento mundial almacenado en la nube. Podemos empezar a imaginar el salto desde el ordenador personal al robot personal, que generará multitud de situaciones en las que robots omnipresentes colaborarán estrechamente con los seres humanos.

La robótica no aspira a sustituir a los seres humanos mediante la mecanización y la automatización de tareas, sino a encontrar formas de colaboración más eficaces entre robots y personas

El transporte es un magnífico ejemplo. Es mucho más fácil mover a un robot por el mundo que construir un robot que interactúe con él. En la última década, los considerables avances en materia de algoritmos y maquinaria nos han permitido imaginar un mundo en el que el movimiento de personas y bienes se realice de forma mucho más segura y práctica a través de una flota optimizada de vehículos sin conductor.

En un solo año, los estadounidenses recorren en coche casi 50 millones de kilómetros.¹ A una media de 96 km/h, eso supone prácticamente 50.000 millones de horas al volante.² Esa cifra aumenta exponencialmente si tenemos en cuenta el resto del planeta. Pero el tiempo que pasamos al volante no está exento de riesgos. En Estados Unidos se produce un accidente de coche cada cinco segundos.³ En todo el mundo, las lesiones producidas por accidentes de tráfico constituyen la octava causa de muerte y cada año producen la pérdida de 1,24 millones de vidas.⁴ Además de este terrible coste en vidas humanas, esos accidentes arrojan una enorme factura económica. Según la Agencia Nacional para la Seguridad en Carretera (NHTSA, por sus siglas en inglés), en Estados Unidos su coste asciende a unos 277.000 millones de dólares al año.⁵ Hacer mella en esas cifras constituye un enorme desafío, al que no podemos dejar de enfrentarnos. Los vehículos sin conductor podrían acabar con los accidentes de tráfico.

Imaginémonos que los coches pudieran aprender... a conducir como nosotros... a no ser nunca responsables de una colisión... a saber qué necesitamos al volante. ¿Y si pudieran convertirse en colaboradores fiables, en colaboradores capaces de ayudarnos a transitar



por carreteras difíciles, sustituirnos cuando estuviéramos cansados e incluso convertir el tiempo que pasamos en el coche en algo... divertido? ¿Y si nuestro coche pudiera saber que tenemos un mal día, pusiera nuestra música favorita y nos ayudara a relajarnos mientras vigila atentamente nuestra conducción? ¿Y si también supiera que se nos olvidó llamar a nuestros padres ayer y de camino a casa nos lo recordara cortésmente? E imaginemos que fuera fácil hacer esa llamada porque en un tramo aburrido de la carretera podríamos pasarle el volante al propio vehículo.

En los últimos dos años, reconociendo este extraordinario potencial, la mayoría de los fabricantes de automóviles han anunciado proyectos de desarrollo de vehículos sin conductor. Es bien sabido que Elon Musk pronosticó que en cinco años podríamos quedarnos dormidos al volante; el coche de Google/Waymo ha acaparado titulares por recorrer sin problemas varios millones de kilómetros, sin accidentes; Nissan ha prometido que tendrá vehículos sin conductor en 2020; en 2014 Mercedes creó el prototipo autónomo Model S y Toyota anunció (en septiembre de 2015) un ambicioso programa de desarrollo de un vehículo que nunca sea responsable de una colisión e invirtió mil millones de dólares en un proyecto de inteligencia artificial.

Muchas son las actividades que se desarrollan en este campo y en relación con un amplio abanico de aspectos de la automoción. Para comprender en cuáles se centran los diversos avances, resulta útil observar los cinco niveles de autonomía que establece la NHTSA: el nivel 0 no incluye ningún tipo de automatización; el nivel 1 incluye herramientas que ofrecen información adicional al conductor humano, por ejemplo mediante cámaras posteriores; el nivel 2 incluye ciertos controles activos, como los frenos antibloqueo; el nivel 3 incluye mecanismos que facilitan cierta autonomía, pero el ser humano debe estar dispuesto a asumir la conducción (como en el Autopilot de Tesla); el nivel 4 permite la autonomía en algunos lugares y momentos, y el nivel 5 ofrece autonomía en cualquier entorno y momento.

Hay una forma alternativa de caracterizar el nivel de autonomía de un vehículo sin conductor basado en tres ejes que definen (1) la velocidad del vehículo, (2) la complejidad del entorno en el que se mueve y (3) la complejidad de las interacciones con otros agentes móviles (coches, peatones, ciclistas, etcétera) en ese entorno. Los investigadores están forzando los límites de cada uno de estos ejes con el objetivo de acercarse al nivel de autonomía 5.

En la última década, los avances en algoritmos y maquinaria nos han permitido imaginar un mundo en el que el movimiento de personas y bienes se realice de forma más segura y práctica a través de una flota optimizada de vehículos sin conductor

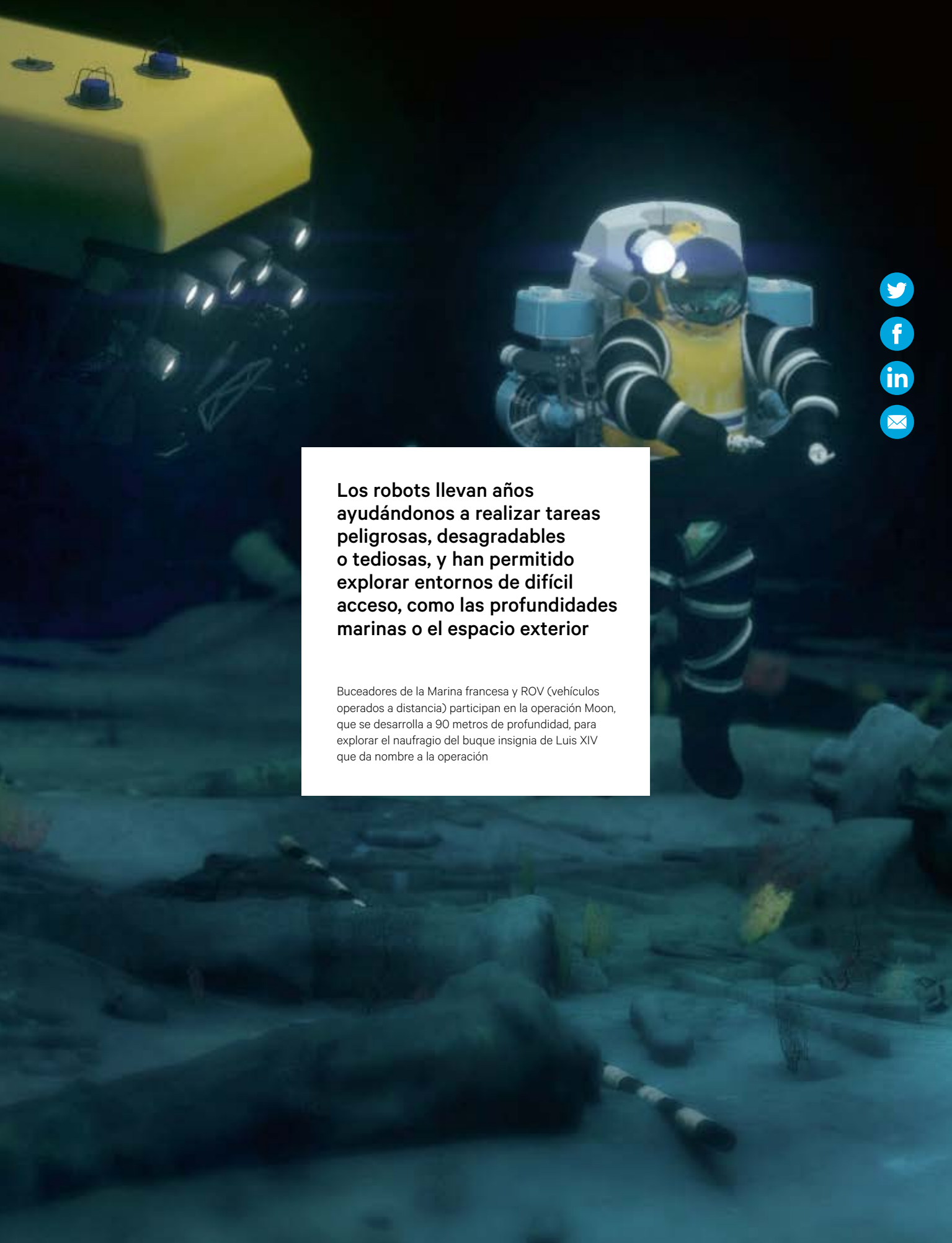
Los avances en algoritmia y maquinaria de la pasada década permiten que la tecnología actual esté lista para entrar en procesos de nivel 4 a poca velocidad, en entornos fáciles y ante niveles de interacción escasos con peatones y vehículos circundantes. Esto incluiría autonomía en vías privadas como las de comunidades de jubilados y campus universitarios, o en vías públicas no muy congestionadas.

El nivel de autonomía 4 lo han permitido los avances registrados durante una década en la maquinaria y los algoritmos de que disponen los robots. Lo primordial es la convergencia de varios avances importantes en algoritmia: la capacidad de cartografiar, que supone que un vehículo puede utilizar sensores para crear un mapa; la localización, que significa que el



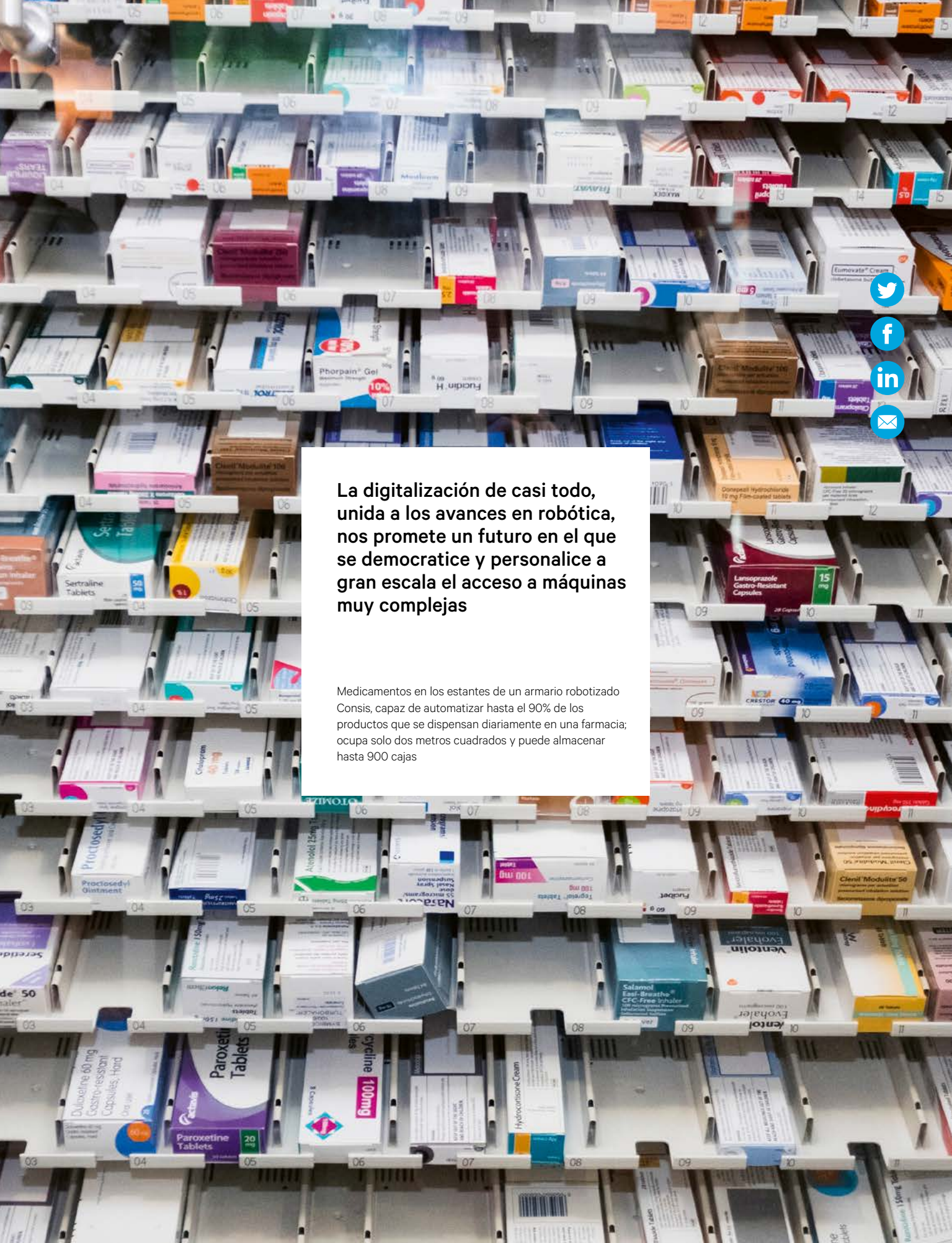
El robot quirúrgico *Da Vinci* durante una operación de histerectomía





Los robots llevan años ayudándonos a realizar tareas peligrosas, desagradables o tediosas, y han permitido explorar entornos de difícil acceso, como las profundidades marinas o el espacio exterior

Buceadores de la Marina francesa y ROV (vehículos operados a distancia) participan en la operación Moon, que se desarrolla a 90 metros de profundidad, para explorar el naufragio del buque insignia de Luis XIV que da nombre a la operación



La digitalización de casi todo, unida a los avances en robótica, nos promete un futuro en el que se democratice y personalice a gran escala el acceso a máquinas muy complejas

Medicamentos en los estantes de un armario robotizado Consis, capaz de automatizar hasta el 90% de los productos que se dispensan diariamente en una farmacia; ocupa solo dos metros cuadrados y puede almacenar hasta 900 cajas



Afgan eXplorer, el robot móvil semiautónomo desarrollado por el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT, Cambridge, Massachusetts, puede realizar acciones propias de reporteros en lugares peligrosos o de difícil acceso





vehículo pueda utilizar sensores para saber dónde está en ese mapa; la percepción, que le permite detectar los objetos que se mueven en la carretera; la planificación y la toma de decisiones, con las que el vehículo puede decidir qué tiene que hacer a continuación, teniendo en cuenta lo que ve en un momento dado, y una maquinaria fiable, así como conjuntos de datos sobre conducción que permiten a los vehículos aprender a conducir como los seres humanos. En la actualidad podemos hacer muchos cálculos simultáneos, procesar muchos más datos y aplicar algoritmos en tiempo real. Esas tecnologías nos han llevado hasta un punto en el que resulta verosímil contemplar la posibilidad de que haya vehículos autónomos en las carreteras.

Sin embargo, aún no hemos llegado al nivel de autonomía 5. Entre los obstáculos tecnológicos que se presentan para alcanzarlo figuran los siguientes: conducir con tráfico denso, a gran velocidad, con mal tiempo (lluvia, nieve), entre vehículos con conductor humano, en zonas carentes de mapas detallados y responder ante situaciones límite. El sistema de percepción de un vehículo no tiene ni la misma calidad ni la misma eficacia que el ojo humano. Seamos claros: hay cosas que las máquinas pueden hacer mejor que las personas, como calcular con precisión con qué velocidad se está moviendo otro vehículo. Pero los robots no tienen nuestras capacidades cognitivas. ¿Cómo las van a tener? Nosotros nos pasamos la vida aprendiendo a observar el mundo y a explicarlo. Para eso las máquinas necesitan algoritmos y datos, muchos, muchísimos datos, con anotaciones que les digan lo que significan. Para posibilitar los vehículos autónomos tenemos que desarrollar nuevos algoritmos que les ayuden a aprender a partir de muchísimos menos ejemplos y sin supervisión, sin la constante intervención del ser humano.

Dos filosofías impulsan en la actualidad la investigación y el desarrollo de la conducción autónoma: la autonomía de serie y la autonomía paralela. La segunda pretende desarrollar tecnologías de conducción asistida que mantengan al conductor al volante, pero con un sistema que supervise lo que hace e intervenga si es necesario —de forma no dañina—, por ejemplo, para impedir una colisión o para corregir la dirección que mantiene el vehículo en la carretera. Los elementos que definen la autonomía del vehículo aumentan paulatinamente, pero funcionan en paralelo a los humanos. La autonomía paralela pretende permitir al vehículo operar en cualquier momento y lugar. La de serie se basa en la idea de que la responsabilidad la tenga el humano o el vehículo, no los dos. Cuando el vehículo está en la función autónoma, el humano no participa en modo alguno en la conducción. Los elementos autónomos del vehículo también aumentan de forma gradual, pero este solo puede funcionar según las capacidades que permite su programa de autonomía. El vehículo ira poco a poco operando en entornos cada vez más complejos.

Dos filosofías impulsan en la actualidad la investigación y el desarrollo de la conducción autónoma: la autonomía de serie y la autonomía paralela. La segunda pretende desarrollar tecnologías de conducción asistida que mantengan al conductor al volante, pero con un sistema que supervise lo que hace e intervenga si es necesario

En la actualidad, las soluciones autónomas de serie funcionan en entornos cerrados (que definen las carreteras por las que puede transitar el vehículo). La receta para ofrecer autonomía comienza por aumentar el número de vehículos que funcionen con control electrónico de aceleración y sensores como cámaras y escáneres láser. Los sensores se utilizan para crear



mapas, detectar obstáculos móviles como peatones y otros vehículos, y para ubicar el vehículo. Las soluciones de conducción autónoma se basan en la existencia de mapas y se benefician de una década de avances en el campo de la localización y el mapeado simultáneos (SLAM, por sus siglas en inglés). Los mapas se elaboran conduciendo el vehículo autónomo en todos los tramos de carretera posibles y recogiendo características con los sensores. Después se utilizan en todos los posteriores trayectos de conducción autónoma con el fin de trazar un camino que vaya del inicio al objetivo, transitar por él evitando los obstáculos y localizar los vehículos que se encuentran al discurrir por ese itinerario.

La mayoría de los fabricantes de vehículos sin conductor solo ponen a prueba sus flotas en grandes ciudades que cuentan con detallados mapas tridimensionales, marcados meticulosamente con la posición exacta de cosas como vías, aceras y señales de stop. En esos mapas figuran rasgos del entorno detectados por los sensores del vehículo. Los mapas se crean gracias a sistemas tridimensionales lidar que, utilizando la luz para escudriñar el entorno, reúnen millones de puntos de referencia y determinan qué rasgos definen cada espacio.

Si queremos que los coches sin conductor sean una tecnología viable en todo el mundo, es problemático que dependan de la existencia previa de mapas detallados. Los vehículos autónomos actuales no pueden transitar por entornos rurales de los que no tenemos mapas: es decir, por los millones de kilómetros de carreteras no pavimentadas, no iluminadas o con señales poco fiables. En el CSAIL comenzamos a desarrollar MapLite para dar un primer paso hacia la posibilidad de que haya vehículos autónomos que, utilizando solo el GPS y sensores, puedan orientarse en carreteras que nunca hayan transitado. Nuestro sistema combina datos de GPS —como los que se encuentran en Google Maps— con otros tomados de sensores lidar. La conjunción de esos dos elementos permite que un vehículo autónomo recorra múltiples carreteras rurales no asfaltadas y que nos indique, de manera fiable, cómo está el firme con más de treinta metros de antelación. Con diversos grados de éxito, otros investigadores han venido trabajando en sistemas de conducción sin mapas. Los métodos que utilizan sensores perceptivos como los lidar suelen basarse principalmente en la señalización vial o hacer grandes generalizaciones sobre la geometría de las cunetas. Entretanto, los enfoques basados en la visión pueden funcionar bien en condiciones ideales, pero plantean problemas cuando hay mal tiempo o mala iluminación. Para llegar al «nivel de autonomía 5» —es decir, la autonomía en cualquier momento y lugar—, todavía nos quedan algunos años, y ello se debe tanto a problemas técnicos como regulatorios.

Si queremos que los coches sin conductor sean una tecnología viable en todo el mundo, es problemático que dependan de la existencia previa de mapas detallados. Los vehículos autónomos actuales no pueden transitar por entornos rurales de los que no tenemos mapas

Aunque los avances técnicos han sido considerables, es comprensible que lograr que las políticas se sitúen al mismo nivel sea un proceso difícil y gradual. Los políticos siguen debatiendo de qué manera hay que regular la existencia de los vehículos autónomos. A qué clase de vehículos hay que permitir circular por las carreteras y a quién hay que permitir conducirlos. A qué pruebas de seguridad hay que someterlos y quién debe realizarlas. Cómo pueden los diferentes niveles de responsabilidad determinar la oportuna y segura utilización de vehículos autónomos y qué habrá que sacrificar. Qué consecuencias tiene que exista un mosaico de leyes y normativas, diferentes en cada estado de Estados Unidos, y a qué habrá



que renunciar para armonizarlas. En qué medida deben los políticos fomentar el uso de esos vehículos, por ejemplo, mediante infraestructuras viales inteligentes, carriles especiales en las autopistas, incentivos a los fabricantes o a los conductores. Todos estos son problemas complejos, relacionados con la utilización de vehículos autónomos en las vías públicas. Al mismo tiempo, ya hay un tipo de autonomía viable, el «nivel de autonomía 4», que permite circular sin conductor en algunos entornos y momentos. Ya disponemos de la tecnología que permite operar vehículos autónomos con buen tiempo, en vías privadas y a poca velocidad.

Entornos como las comunidades de jubilados, los campus universitarios, los recintos hoteleros y los parques de atracciones se pueden beneficiar de tecnologías que permiten el nivel de autonomía 4. Hay diferentes tipos de vehículos autónomos, entre ellos los carritos de golf, las sillas de ruedas, las escúter, las maletas con ruedas, los carritos de supermercado, los contenedores de basura e incluso los barcos. Esas tecnologías abren la puerta a una amplia gama de nuevos productos y aplicaciones, que van desde la movilidad bajo demanda a unas compras y un transporte de mercancías autónomos, pasando por una movilidad más eficiente en los hospitales. A todo el mundo le beneficiaría que el transporte fuera un servicio de muy fácil acceso, pero esos beneficios influirán sobre todo en los nuevos conductores, la población de más edad y las personas enfermas o con discapacidad.

La tecnología que dota a los vehículos de autonomía puede tener enormes repercusiones sociales. Imaginémos a los residentes de una comunidad de jubilados a los que transporten con total seguridad carritos de golf automatizados. En el futuro podremos automatizar cualquier cosa con ruedas, no solo las aspiradoras actuales, también los cortacéspedes e incluso los contenedores de basura.

La misma tecnología que nos permitirá este tipo de automatización podría incluso utilizarse para ayudar a personas con discapacidades —por ejemplo, a los ciegos— a vivir de formas imposibles hasta ese momento. En todo el mundo hay unos 285 millones de personas con discapacidad visual, que podrían beneficiarse enormemente de una mayor movilidad y de ayuda robótica. Es un grupo demográfico al que la tecnología ha solido dejar de lado o hacer como que no existía, pero, en este caso, la tecnología podría marcar una enorme diferencia. Hay dispositivos portátiles, entre ellos sensores utilizados para activar vehículos sin conductor y programas de conducción autónoma, que podrían permitir a personas con discapacidad visual vivir sin percances y con mayor movilidad de la que permite un bastón.

En el futuro inmediato la robótica cambiará la forma de transportar a personas y cosas, pero poco después no solo contribuirá a la puntualidad de las entregas de productos, sino que nos permitirá fabricarlos con rapidez y cerca de casa.

Desafíos para la robótica

A pesar de los grandes pasos que ha dado este campo recientemente y de sus perspectivas de futuro, los robots actuales siguen teniendo una capacidad bastante limitada para resolver problemas, sus dotes para la comunicación suelen ser precarias y cuesta demasiado tiempo hacer nuevos robots. Para que su utilización se generalice hará falta que se integren de manera natural en el mundo humano, no que las personas se integren en el mundo de las máquinas.

Razonamiento Los robots solo pueden realizar razonamientos limitados, ya que se rigen por cálculos informáticos absolutamente específicos. A los robots de hoy en día todo se les explica con instrucciones sencillas y su abanico de posibilidades se circunscribe a la programación que contienen. Tareas que los humanos no se paran a pensar, como preguntarse si uno ha



estado antes en un lugar, son muy difíciles para los robots. Estos registran las características de los lugares que han visitado. Las captan con sensores como cámaras o escáneres láser. Para una máquina resulta difícil distinguir entre las características de una escena que ya ha visto y otra nueva que contiene algunos objetos de la anterior. En general, los sensores y los activadores recogen demasiados datos, que además son de un nivel muy inferior: para que los robots puedan hacer un buen uso de ellos hay que ponerlos en relación con abstracciones coherentes. En la actualidad, la investigación en el aprendizaje de las máquinas a partir de macrodatos se centra en cómo comprimir grandes conjuntos de datos para obtener un menor número de puntos de referencia semánticamente coherentes. Los robots también pueden utilizar resúmenes. Por ejemplo, podrían resumir su historia visual y así reducir de forma considerable el número de imágenes que precisan para determinar si han estado antes en un lugar.

Por otra parte, los robots no pueden resolver situaciones inesperadas. Si un robot se topa con una situación para la que no estaba programado o que escapa a su abanico de capacidades, su mecanismo producirá un error y se detendrá. Por regla general, el robot no puede comunicar la causa del error. Por ejemplo, los robots aspiradores están concebidos y programados para desplazarse por el suelo, pero no para subir escaleras.

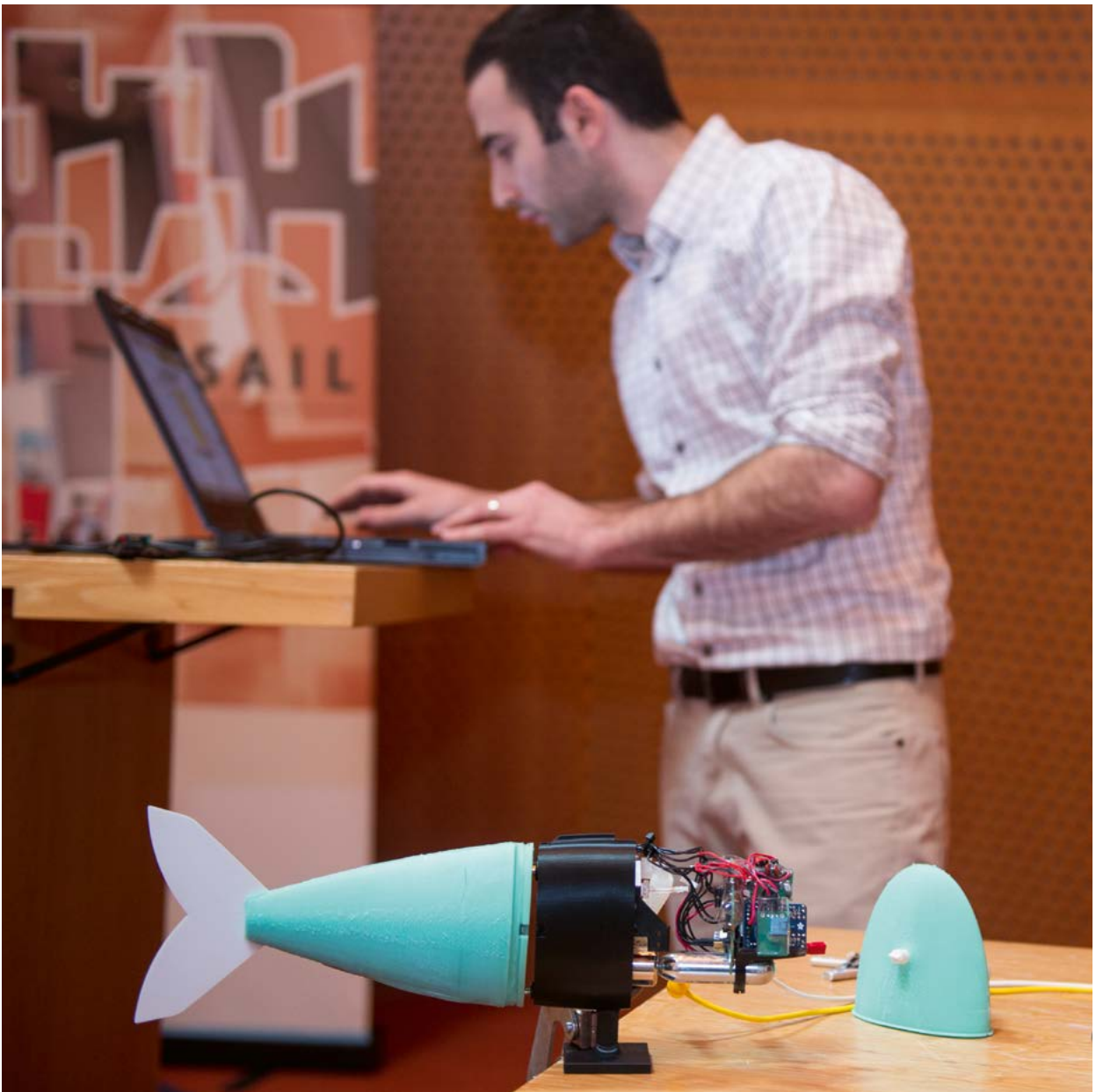
Los robots tienen que aprender a ajustar sus programas, a adaptarse a sus ambientes y a las interacciones que tienen con las personas, con sus entornos y con otras máquinas. Hoy en día, cualquiera que tenga acceso a internet, máquinas incluidas, puede acceder a la información del mundo a golpe de teclado. Los robots podrían aprovecharse de esta circunstancia para tomar decisiones mejores. También podrían registrar y utilizar toda su historia (como lo que generan sus sensores y activadores) y las experiencias de otras máquinas. Por ejemplo, un robot preparado para pasear a perros podría acceder a la información meteorológica en internet y después, basándose en paseos anteriores, decidir cuál es la mejor ruta. Quizá un paseo corto si hace calor o llueve, o uno largo al parque cercano donde están en ese momento otros robots paseadores de perros. Todo esto podría decidirse sin interacción con los humanos o sin su intervención.

Comunicación Para llegar a un mundo en el que muchos robots puedan colaborar entre sí es precisa información fiable que facilite su coordinación. A pesar de los avances en comunicación inalámbrica, sigue habiendo impedimentos para la comunicación entre robots. El problema es que los modelos y los pronósticos relacionados con la comunicación son tremendamente difíciles y que todos los métodos de control de robots basados en los modelos de comunicación actuales están plagados de interferencias. Los robots necesitan formas de comunicación más fiables, que les garanticen el ancho de banda que precisan y en el momento justo. Para alcanzar una comunicación flexible entre robots, se precisaría un nuevo paradigma, basado en la medición local de la calidad de la comunicación, no en su predicción mediante modelos. Partiendo de la medición de la comunicación, podemos empezar a imaginarnos la utilización de robots volantes que funcionen como estaciones-base móviles que se coordinen entre sí para ofrecer comunicaciones a escala planetaria. Enjambres de robots volantes podrían proporcionar acceso a internet en cualquier parte del mundo.

En la actualidad, la comunicación entre robots y personas también es limitada. Aunque se han utilizado tecnologías del habla para dar órdenes a los robots con lenguaje humano (por ejemplo: «Acércate a la puerta»), estas interacciones tienen un alcance y un vocabulario superficiales. A los robots les vendría bien la ayuda de los humanos cuando se atascan. Resulta que hasta una mínima intervención humana en la labor de un robot cambia por completo el problema y permite a la máquina avanzar.



El estudiante universitario Andrew Marchese muestra el movimiento de un pez robótico durante una exposición en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT en abril de 2013. El pez robótico simula el movimiento de los peces vivos y usa el campo emergente de la robótica blanda





Hoy en día, cuando los robots se topan con algo inesperado (una situación para la que no están programados), se atascan. Supongamos que, en lugar de quedarse atascado, sin más, el robot pudiera pensar por qué se ha quedado así y recabar ayuda humana. Por ejemplo, los últimos trabajos sobre la utilización de robots para montar muebles de IKEA demuestran que pueden saber cuándo la pata de una mesa no está a su alcance y pedir a los humanos que se la acerquen. Una vez recibido ese elemento, el robot reanuda la tarea de montaje. Estos son algunos de los primeros pasos que se están dando para crear equipos simbióticos de humanos y robots, en los que unos y otros se puedan pedir ayuda mutuamente.

Diseño y fabricación Otro gran desafío para los robots de hoy en día radica en la cantidad de tiempo que se precisa para diseñarlos y fabricarlos. Hay que acelerar su proceso de creación. En la actualidad disponemos de muchas clases de robots, pero todas ellas han tardado muchos años en producirse. Las capacidades que tienen para hacer cálculos, moverse y manipular objetos van inextricablemente unidas a su cuerpo: son maquinarias. Como los cuerpos de los robots actuales son rígidos y difíciles de ampliar, sus capacidades se limitan a las que permite su cuerpo. En realidad no es factible fabricar nuevos robots, módulos robóticos suplementarios, accesorios o herramientas especializadas para extender sus capacidades, ya que el proceso de diseño, fabricación, ensamblaje y programación es largo y engorroso. Necesitamos herramientas que aceleren el diseño y la fabricación de los robots. Imaginémosnos que creamos un robot compilador que pueda procesar una definición funcional como «Quiero un robot que juegue conmigo al ajedrez» y que, gracias a su capacidad de computación, conciba un diseño que responda a esa definición, un plan de fabricación y un entorno de programación adaptado para utilizar esa máquina. Gracias a ese robot compilador se podrían automatizar multitud de tareas grandes y pequeñas si se diseñaran y fabricaran rápidamente muchos tipos de robots.

Hacia la omnipresencia de la robótica Varios obstáculos importantes separan la situación actual de los robots y sus perspectivas de integración exhaustiva en la vida cotidiana. Algunos tienen que ver con la propia creación de esas máquinas: ¿cómo se pueden diseñar y fabricar nuevos robots de manera rápida y eficiente? Otros son de índole informática y afectan a la capacidad de los robots para razonar, cambiar y adaptarse a tareas cada vez más complejas en entornos cada vez más difíciles. Otros obstáculos afectan a las interacciones entre robots y entre estos y las personas. Las investigaciones sobre robótica actuales fuerzan los límites en esas direcciones, en busca de mejores formas de fabricar robots, que controlen sus movimientos y sus aptitudes para manipular objetos, e incrementen su capacidad para razonar, dotándolos de percepción semántica a través de la visión y facilitando que se coordinen y cooperen de manera más flexible entre sí y con los seres humanos. Si respondemos a esos desafíos, los robots se acercarán más a la concepción de la robótica omnipresente: la de un mundo conectado en el que muchos humanos y robots realicen multitud de labores distintas.

La omnipresencia de la robótica personalizada constituye un gran reto, pero su alcance no difiere del de la omnipresencia de la informática, formulado hace unos veinticinco años. Hoy en día sí podemos decir que la informática es omnipresente, que se ha convertido en un servicio del que se dispone en todo momento y lugar. Entonces, ¿qué haría falta para que los robots se volvieran omnipresentes en la vida cotidiana? Mark Weiser, exdirector científico de Xerox PARC y al que muchos consideran el padre de la ubicuidad de la informática, dijo: «Las tecnologías más profundas son aquellas que desaparecen. Se disuelven en la vida cotidiana hasta volverse algo indistinguible».

Por ejemplo, la electricidad fue en su día una tecnología novedosa que ahora forma parte de la vida. Al igual que el ordenador personal y la electricidad, las tecnologías de la robótica

podrían convertirse en aspectos omnipresentes de la vida diaria. En un futuro próximo, la robótica cambiará nuestra forma de plantearnos muchos aspectos cotidianos.

Las flotas de vehículos sin conductor pueden convertir el transporte en un servicio público, ofreciendo trayectos personalizados en cualquier momento y lugar. El transporte público podría tener dos vertientes: una red de vehículos de gran tamaño (como trenes o autobuses), que fuera la estructura troncal del transporte colectivo de largo recorrido, y unas flotas de módulos que respondieran a las necesidades de transporte personalizado individual en cortas distancias. Esa red de transporte estaría conectada tanto con las infraestructuras de información como con la gente para proporcionar movilidad a demanda. La estructura troncal podría incorporar rutas que cambiaran de manera dinámica para adaptarse a las necesidades de los usuarios. Ya se están utilizando datos de transporte en tiempo real e históricos para trazar los itinerarios de autobús óptimos y situar las paradas de manera que se obtenga una estructura de *granularidad* fina. La movilidad a demanda pueden facilitarla tecnologías de vanguardia para vehículos autónomos. Tomar un coche sin conductor para realizar un trayecto podría ser tan fácil como utilizar un teléfono inteligente. Los módulos robots sabrían cuándo llega gente a una estación, dónde están quienes necesitan un servicio y dónde están los demás módulos. Después de llevar a alguien a su destino, los módulos se dirigirían solos hasta el siguiente cliente, gracias a algoritmos que respondieran a la demanda existente y coordinaran, con el fin de optimizar las operaciones de la flota y reducir el tiempo de espera de los clientes. El transporte público sería práctico y personalizado.



Notas

1. http://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/travel_monitoring/14augvt/page2.cfm
2. La cifra exacta es 49.600 millones. <http://www.forbes.com/sites/modeledbehavior/2014/11/08/the-massive-economic-benefits-of-self-driving-cars/>
3. https://www.osha.gov/Publications/motor_vehicle_guide.pdf
4. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/83789/1/WHO_NMH_VIP_13.01_eng.pdf?ua=1
5. De un PowerPoint sobre conducción autónoma.



Samuel H. Sternberg
Columbia University

El doctor Samuel H. Sternberg dirige un laboratorio de investigación en la Universidad de Columbia, donde es profesor asociado del Departamento de Bioquímica y Biofísica Molecular. Se graduó *summa cum laude* en Bioquímica por la Universidad de Columbia en 2007 y se doctoró en Química en la Universidad de California Berkeley en 2014. Ha sido becario de la National Science Foundation y del Departamento de Defensa, y receptor de los premios Scaringe Award y Harold Weintraub Graduate Student Award. Su investigación se centra en el mecanismo de identificación de ADN diana por parte de sistemas inmunes bacterianos guiados por RNA (CRISPR-Cas) y el desarrollo de estos sistemas para la ingeniería genética. Además de publicar en las principales revistas científicas, recientemente ha coeditado, con Jennifer Doudna, un libro de divulgación científica titulado *A Crack in Creation: The Unthinkable Power to Control Evolution* sobre el descubrimiento, desarrollo y aplicaciones de la tecnología de edición de genes CRISPR.

Libro recomendado: Doudna, J. A. y Sternberg, S. H. (2017): *A Crack in Creation: Gene Editing and the Unthinkable Power to Control Evolution* [Una grieta en la Creación. Edición de genes y el poder de controlar la evolución], Nueva York, Houghton Mifflin Harcourt.

Pocos descubrimientos transforman una disciplina de un día para otro, pero hoy los científicos tienen la capacidad de manipular las células de maneras antes inimaginables gracias a una peculiar tecnología llamada CRISPR (repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas). A partir de elegantes estudios que descifraron cómo funciona CRISPR en las bacterias, los investigadores enseguida descubrieron el potencial biológico de Cas9, una enzima de ARN guía que se adhiere al ADN empleado para editar genes. Hoy esta capacidad se está usando en una amplia gama de ambiciosas aplicaciones, incluida la mejora de cultivos, la eliminación de enfermedades infecciosas y la medicina en seres humanos. La tecnología CRISPR puede, de hecho, lograr curar determinadas enfermedades genéticas y el cáncer, pero también emplearse para introducir cambios genéticos en embriones humanos. ¿Qué elegiremos hacer con algo tan poderoso?



Desde el descubrimiento del ADN como portador de la información genética de la célula, los científicos se han dedicado incansablemente a descodificar letra a letra la secuencia del genoma humano y a desarrollar herramientas que permitan manipular y modificar el código genético. El primer genoma viral se secuenció entero en 1976 y, en los años transcurridos desde entonces, se ha descodificado un número creciente de genomas cada vez más complejos, un proceso que culminó con el primer borrador del genoma humano, publicado en 2001. Hoy, las personas pueden encargar test genéticos y averiguar cosas sobre sus antepasados y su vulnerabilidad a enfermedades mediante el envío de muestras de saliva por correo, y cada vez son más las empresas que hacen uso de enormes bases de datos procedentes de millones de individuos para dar pasos de gigante en el campo de la genómica humana.

Al mismo tiempo, las herramientas para construir moléculas sintéticas de ADN en el laboratorio se han expandido de manera considerable, empezando con la revolución del ADN recombinante en la década de 1970. En 2010, los investigadores del Verner Institute lograron crear la primera célula sintética fabricando un genoma bacteriano completo partiendo de cero, y desde entonces otros han construido cromosomas enteros —las estructuras celulares que contienen el ADN— en levadura.

Y, sin embargo, hasta muy recientemente, las herramientas para modificar el ADN, y para hacerlo directamente en células vivas estaban muy atrasadas, sobre todo para organismos más complejos, como plantas, animales y humanos. A la luz de nuestro creciente conocimiento de gran número de enfermedades asociadas con, o causadas por, mutaciones genéticas —la anemia drepanocítica, la enfermedad de Huntington o el alzhéimer, por nombrar solo unas cuantas— la herramienta de manipulación de ADN ideal permitiría reparar las mutaciones directamente en su origen. Pero el volumen y la complejidad de nuestro genoma, compuesto de 3.200 millones de letras de ADN aportadas por cada uno de los 23 pares de cromosomas que heredamos de nuestra madre y nuestro padre, condenaban el sueño de la edición genómica de precisión a un futuro distante. Hasta que llegó la tecnología CRISPR (siglas en inglés de «repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas»).

Hoy, los científicos pueden usar CRISPR para manipular el genoma de maneras apenas imaginables antes: corregir mutaciones genéticas, eliminar secuencias patógenas de ADN, insertar genes terapéuticos, activar o desactivar genes y más. A diferencia de las tecnologías que la precedieron, CRISPR ha democratizado la ingeniería genómica porque es fácil de utilizar y barato. Y CRISPR funciona en un número impresionante de tipos de células y organismos distintos —que van desde el maíz hasta el mono, pasando por el ratón—, por lo que constituye un conjunto de herramientas científicas de amplia aplicación con las que abordar un gran espectro de desafíos biológicos.

Los científicos pueden usar la tecnología CRISPR para manipular el genoma de maneras apenas imaginables antes: corregir mutaciones genéticas, eliminar secuencias patógenas de ADN, insertar genes terapéuticos, activar o desactivar genes y más

¿Qué es CRISPR y cómo funciona? ¿En qué consiste la edición de genes? ¿Están los tratamientos para enfermedades genéticas basados en CRISPR a la vuelta de la esquina? ¿Cómo puede usarse la tecnología CRISPR para mejorar la agricultura mediante la edición genética

de plantas y animales? ¿Podría CRISPR ayudar a erradicar enfermedades patógenas como la malaria? Y, quizá lo más importante, ¿podrá usarse algún día la tecnología CRISPR para reescribir el ADN de embriones humanos, editando así el código genético de maneras que afectarían a muchas generaciones futuras?



Los orígenes de CRISPR

Por muy revolucionaria que haya sido la tecnología CRISPR para la ciencia biomédica, su descubrimiento partió de la curiosidad científica básica sobre una cuestión biológica muy alejada de la medicina. Para comprender de dónde procede CRISPR, necesitamos profundizar en uno de los conflictos genéticos más antiguos de la Tierra: la implacable carrera armamentística entre las bacterias y los virus que infectan bacterias (o virus bacterianos) (Rohwer *et al.*, 2014).

Todo el mundo sabe qué son las bacterias, esos molestos microorganismos que pueden hacernos enfermar —pensemos en el estreptococo, que causa la infección de garganta y la neumonía, o en la salmonelosis causada por la intoxicación alimentaria—, pero que también son indispensables para el funcionamiento humano normal (dependemos de un vasto ejército de bacterias que, juntas, conforman nuestro microbioma y ayudan a descomponer la comida, producir vitaminas y realizar otras muchas funciones esenciales). Pocos fuera de la comunidad científica, sin embargo, seguramente son conscientes de la ubicuidad de los virus bacterianos, también conocidos como «bacteriófagos» (comedores de bacterias). De hecho, los bacteriófagos son, con mucho, la forma de vida más abundante de nuestro planeta: se estima que, con una población de diez millones de billones de billones, superan a las bacterias por 10 a 1. ¡Hay aproximadamente un billón de virus bacterianos por cada grano de arena en el mundo y diez millones de virus en cada gota de agua de mar (Keen, 2015)!

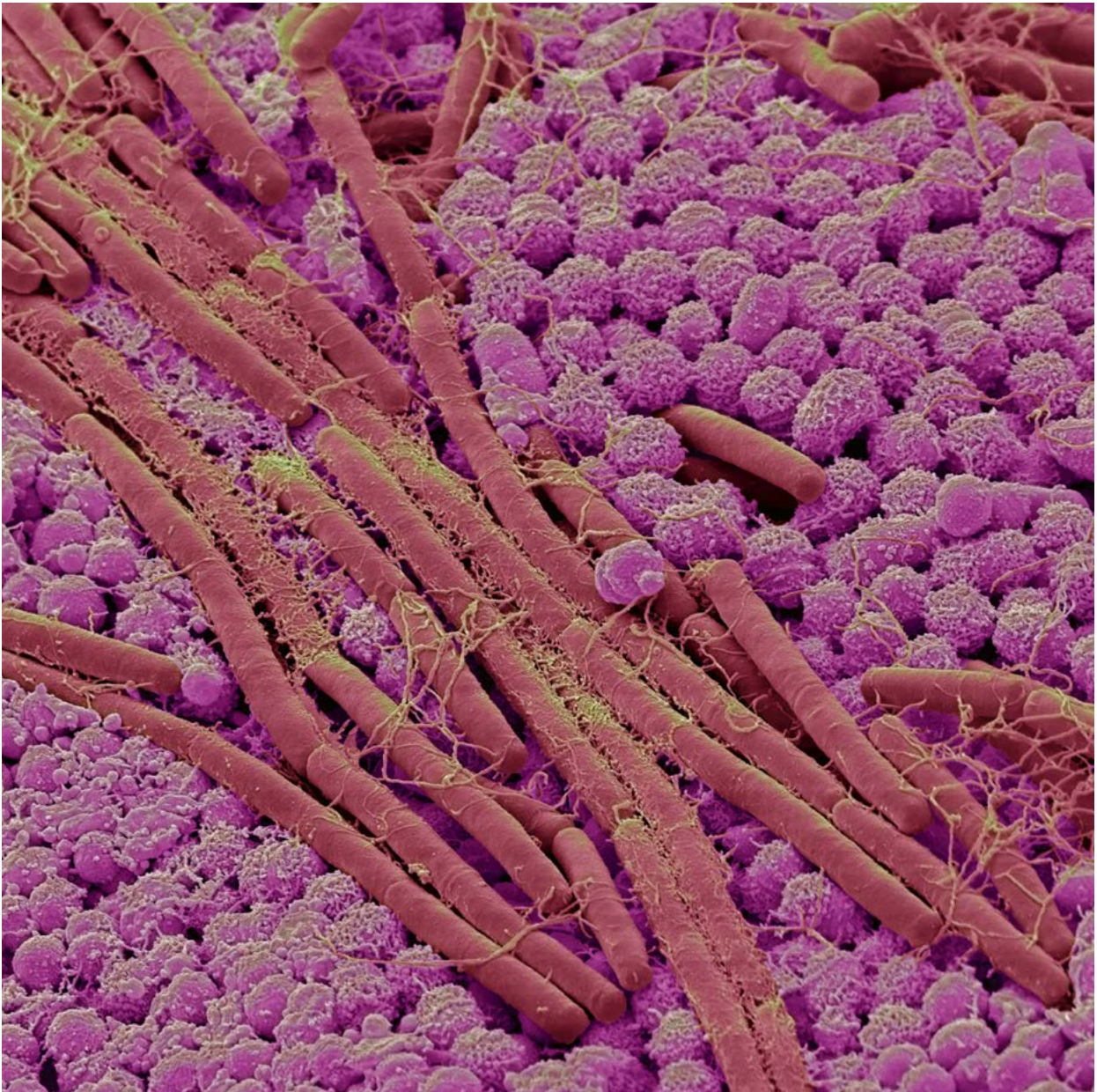
Los virus bacterianos evolucionaron para infectar a las bacterias y se les da muy bien. Poseen estructuras tridimensionales exquisitamente preparadas para acoplarse a la superficie externa de células bacterianas y, una vez adheridas a ellas, inyectan su material genético dentro de la bacteria huésped usando una presión similar a la de una botella de champán descorchada. Una vez el genoma viral se abre camino dentro de la bacteria, secuestra la maquinaria de su huésped para replicar su código genético y construir más virus, destruyendo la célula en el proceso. Entre el 20% y el 40% de las bacterias del océano son eliminadas cada día por estas infecciones víricas, alterando notablemente el sistema marino al provocar que se liberen carbono y otros nutrientes en el medioambiente.

Sin embargo, las bacterias no se quedan pasivas ante semejante ataque, más bien al contrario. Una bacteria posee numerosos sistemas inmunes para combatir los virus en múltiples etapas del ciclo vital viral, que los microbiólogos llevan muchas décadas estudiando. Cuando comenzó el siglo XXI, el paradigma vigente sostenía que, aunque diversos, estos sistemas inmunes no eran más que una respuesta innata a la infección. A diferencia de organismos vertebrados multicelulares, que poseen sistemas inmunes innatos junto con otros colaborativos más complejos, capaces de crear y almacenar memoria inmunológica, las bacterias no tenían la capacidad de adaptarse a nuevas amenazas.

Hasta que llega CRISPR. Detectado por primera vez en 1987 en la bacteria *Escherichia coli* (Ishino *et al.*, 1986), CRISPR es, por explicarlo de manera sencilla, un conjunto de secciones repetidas de ADN bacteriano que pueden tener miles de letras de longitud. Aunque al principio CRISPR se recibió como una extrañeza, una casualidad de la naturaleza, a principios de la década de 2000 los investigadores habían detectado CRISPR en docenas de otras especies bacterianas (Mojica *et al.*, 2000).



Microscopía electrónica de barrido (MEB) coloreada de bacterias en la superficie de una lengua humana. Ampliación: 10.000/10 cm de ancho





Estas estructuras que se repiten se describieron inicialmente usando una serie de acrónimos distintos y confusos, así que, en 2002, investigadores holandeses simplificaron su clasificación con el acrónimo sencillo (y pegadizo) que seguimos usando hoy (Jansen *et al.*, 2002).

A pesar de la constatación creciente de que CRISPR abundaba en la naturaleza, al haberse encontrado en los genomas de un tercio de todas las bacterias y casi todas las arqueas (otro grupo de microorganismos unicelulares), su función biológica siguió siendo un misterio hasta 2005, cuando aparecieron las primeras pistas que vinculaban CRISPR a la inmunidad a los virus (Mojica *et al.*, 2005). Usando análisis bioinformáticos, los investigadores comprobaron con asombro que había secuencias de ADN viral enterradas en esas secciones repetidas de ADN, como si las bacterias hubieran robado el código genético vírico a la manera de memoria molecular. ¿Permitiría esta información reconocer y destruir ADN viral en el curso de una infección?

La evidencia en la que apoyar esta hipótesis provino de elegantes experimentos conducidos en una compañía de yogures (Barrangou *et al.*, 2007). Los científicos de allí buscaban regenerar cepas resistentes a los virus de la bacteria *Streptococcus thermophilus*, el principal ingrediente industrial usado para fermentar la leche de manera que se convierta en yogur y otros productos lácteos, y repararon que, al igual que el *E. coli*, sus cepas de *S. thermophilus* también contenían CRISPR. Al infectar de manera intencionada sus cepas con un conjunto de virus distintos y analizando luego el ADN de esas bacterias que se volvían inmunes, los investigadores demostraron que CRISPR confería inmunidad adaptativa. Casi de un día para otro, la idea tradicional de que las bacterias y las arqueas poseían unas defensas comparativamente simples contra patógenos virales quedó desmontada. En lugar de ello, estos microorganismos simples empleaban sistemas inmunes tanto innatos como adaptativos no menos notables ni versátiles que los sistemas innatos y adaptativos encontrados en los organismos multicelulares.

A pesar de la constatación creciente de que CRISPR abundaba en la naturaleza, al haberse encontrado en los genomas de un tercio de todas las bacterias y casi todas las arqueas, su función biológica siguió siendo un misterio hasta 2005, cuando aparecieron las primeras pistas que vinculaban CRISPR a la inmunidad a los virus

Después de este hallazgo, correspondía a genetistas y bioquímicos determinar cómo funcionan los sistemas inmunes CRISPR, en concreto, qué enzimas participaban y cómo eran capaces de reconocer con precisión rasgos únicos de ADN viral durante una infección. A partir del trabajo de innumerables investigadores de todo el mundo, empezó a surgir una comprensión nueva y unificada: las bacterias y las arqueas usan moléculas de ácido ribonucleico o RNA —el primo molecular del ADN— para identificar secuencias coincidentes de ADN en el genoma viral, junto con una o más proteínas codificadas por genes asociados a CRISPR para fragmentar el ADN (Klompe y Sternberg, 2018).

CRISPR eran en realidad unas tijeras moleculares de precisión, con la asombrosa capacidad de actuar sobre secuencias específicas de ADN y neutralizarlas, cortando ambos filamentos de la doble hélice. Y el actor estrella de este proceso era una proteína llamada Cas9 (CRISPR proteína asociada 9) (Gasiunas *et al.*, 2012; Jinek *et al.*, 2012).



Deducir la función molecular de los sistemas CRISPR-Cas9 no solo ayudó a resolver una cuestión clave sobre los sistemas inmunes antivirales. También reveló de inmediato un potencial inmenso para un campo distinto y en apariencia no relacionado de la biotecnología: la edición de genes (Urnov, 2018).

La edición genética hace referencia a una técnica en la que secuencias de ADN se modifican o «editan» directamente en el genoma de las células vivas. Aunque disponemos de herramientas eficaces para editar genes en las bacterias desde hace décadas, la capacidad de editar ADN en células eucariotas, que albergan el genoma en una estructura separada llamada núcleo, iba muy retrasada. Pero en la década de 1990 apareció una nueva técnica de edición de genes de elevada eficacia: si se podía inducir un corte de ADN en el gen que se buscaba modificar, entonces la capacidad de editarlo crecía enormemente (Rouet *et al.*, 1994). Por paradójico que pareciera, el daño localizado al ADN podría servir de estímulo a la reparación del ADN.

¿Cómo era posible? Nuestras células sufren constantemente daños en su ADN, ya sea por la acción de carcinógenos o por exposición a radiaciones ionizantes, y por tanto han desarrollado mecanismos para reparar lesiones. La detección de daños en el ADN lleva a reclutar enzimas endógenas que las reparen y, con los años, los investigadores llegaron a la conclusión de que este proceso natural podía aprovecharse para instalar procesos de edición personalizados durante el proceso de reparación. El cuello de botella para desarrollar todo el potencial de este enfoque, por tanto, era diseñar herramientas para introducir roturas de ADN en lugares específicos del genoma.

La herramienta ideal sería probablemente una «nucleasa programable», una enzima que corta ácidos nucleicos como ADN (de ahí lo de «nucleasa», que los científicos podrían programar de manera rápida y sencilla para reconocer e introducir roturas en secuencias específicas de ADN dentro de la célula; Chandrasegaran y Carroll, 2016). Las primeras herramientas de este tipo se desarrollaron en la década de 1990 y principios de la de 2000, pero eran poco manejables, poco fiables y caras. Un investigador tenía que elegir entre dedicar meses a construir una nucleasa programable y gastarse decenas de miles de dólares encargando el trabajo a una empresa para luego encontrarse con que la herramienta apenas era útil. En resumen, la edición de genes, aunque validada como tecnología, no podía desarrollar todo su potencial porque las nucleasas programables eran demasiado difíciles de desarrollar.

El descubrimiento de los CRISPR-Cas9 brindaba la solución perfecta. En lugar de tratar de reinventar la rueda, ¿por qué no adaptar las nucleasas programables ya esculpidas por la naturaleza a lo largo de miles de millones de años de evolución? Si las bacterias empleaban CRISPR-Cas6 para introducir cortes de ADN en genomas virales para prevenir infecciones, quizá los científicos podrían emplear CRISPR-Cas9 para introducir roturas de ADN en genomas eucariotas, y así editar genes. La misma propiedad que hacía tan efectivos los CRISPR-Cas9 para la inmunidad adaptativa, su capacidad de actuar sobre el ADN diana usando un RNA «guía», podría transformar la capacidad de los investigadores de programar nucleasas para romper dianas específicas de ADN y marcarlas para su reparación.

Empieza la fiebre CRISPR

En junio de 2012, Doudna, Charpentier y sus colegas publicaron el primer artículo que describía los componentes esenciales de los CRISPR-Cas9 y detallaban su utilidad para la edición de genes (Jinek *et al.*, 2012). Seis meses después aparecieron los primeros informes que



demostraban la notable eficacia de los CRISPR-Cas9 para editar genes tanto en ratones como en células humanas (Cong *et al.*, 2013; Mali *et al.*, 2013). A los pocos meses de aquello se crearon los primeros ratones editados genéticamente con CRISPR, a lo que siguió una rápida sucesión de experimentos de tipo prueba de concepto en arroz, ratas, maíz, monos y una vertiginosa variedad de otros organismos tanto vegetales como animales. Se había desatado la fiebre CRISPR (Pennisi, 2013).

Junto con la ampliación del número de especies cuyos genomas podían ahora modificarse con CRISPR, en 2013 también se vivió una eclosión de los tipos de cambios de ADN que podían conseguirse mediante la tecnología CRISPR. Además de corregir pequeñas erratas del genoma, como las mutaciones responsables de enfermedades genéticas, CRISPR podía usarse para desactivar o borrar genes enteros, invertir o insertar genes y hacer cambios en múltiples genes de manera simultánea. El uso de una versión no cortante de CRISPR-Cas6 dio lugar, por su parte, a toda una categoría distinta de aplicaciones cuyo objetivo era transferir otras cargas a genes específicos con el fin de activarlos o desactivarlos, aumentar o reducir su actividad. Alterando la expresión genética sin cambiar la secuencia de ADN, los investigadores podían empezar a controlar las señales moleculares que dan instrucciones a las células para que se conviertan en los distintos tejidos del cuerpo, todas usando el mismo código genético como base.

En 2013 se vivió una eclosión de los cambios de ADN que podían conseguirse con la tecnología CRISPR. Además de corregir pequeñas erratas del genoma, CRISPR podía usarse para desactivar o borrar genes enteros, invertir o insertar genes y hacer cambios en múltiples genes de manera simultánea

El desarrollo tecnológico no tardó en ampliar el kit de herramientas CRISPR, lo que atrajo a más investigadores al campo de la edición genética. Más importante incluso para la adopción generalizada de CRISPR que su utilidad misma era, sin embargo, su fácil acceso para neófitos. En primer lugar, la facilidad de desarrollar CRISPR para modificar nuevas áreas del genoma implicaba que científicos con una comprensión básica de biología molecular podían ahora acceder a lo que en otro tiempo había sido una tecnología avanzada que requería años de experiencia. De hecho, algunos estudiantes de enseñanza media hoy hacen experimentos con CRISPR en clase (Yu, 2017). En segundo lugar, los reactivos necesarios para editar genes podían adquirirse a un cómodo precio por organizaciones sin ánimo de lucro como Addgene, que distribuye herramientas CRISPR a investigadores académicos por solo sesenta dólares (Kamens, 2015). El resultado ha sido una diseminación rápida y mundial de la tecnología.

Hoy, CRISPR abarca un conjunto fundamental de técnicas en las que los científicos biomédicos deben estar versados con independencia de su área específica de investigación, de su organismo modelo o de sus destrezas. La tecnología CRISPR se ha vuelto imprescindible para la investigación punta y podemos afirmar, sin temor a equivocarnos, que la biología ya nunca volverá a ser la misma.

Tampoco la sociedad. De hecho, armados con el poder de reescribir de manera sencilla y precisa el código genético, científicos y no científicos amenazan con subvertir el orden natural, remodelando el proceso evolutivo mismo al sustituir la mutación aleatoria —el proceso azaroso, sinuoso de la selección natural a lo largo de eones— por una mutación definida y personalizada por el usuario, introducida a voluntad usando la tecnología CRISPR. El resultado: una nueva manera de controlar la dirección en la que va la vida misma.



Los productos editados genéticamente han sido manipulados en el laboratorio, pero, a diferencia de los OGM, no contienen ni pizca de ADN ajeno en el genoma ni cicatrices de la intervención científica

Bandeja con granos de maíz genéticamente modificado en el stand de Monsanto Co. durante la feria agrícola al aire libre más importante de Estados Unidos, la Farm Progress de Illinois, agosto de 2017



La tecnología CRISPR se ha vuelto imprescindible para la investigación punta y podemos afirmar, sin temor a equivocarnos, que la biología nunca volverá a ser la misma

El primer cerdo clonado en China, disecado y expuesto en el Beijing Genomics Institute, en Shenzhen, julio de 2010. Según el Banco Mundial, la población china pasará de 1.330 millones en 2009 a 1.440 millones en 2030, y Pekín está a la caza de tecnología punta que ayude a alimentar a sus habitantes y mejorar la calidad de la comida



Imaginemos un mundo futuro en que podamos clonar al perro que se nos ha muerto, a la vez que instalar mutaciones de ADN que confieran hipermusculatura; o cultivar supercepas de tomates que siguen maduros mucho después de haberse recolectado, champiñones que no se vuelven marrones después de un almacenamiento prolongado y vides inmunes a las plagas de hongos. En el campo, en los pastos de los agricultores hay nuevas razas de ganado lechero que conservan la misma valiosa genética resultado de cientos de años de cría selectiva, pero que, gracias a CRISPR, ya no tienen cuernos. Los cerdos que pastan cerca tienen mutaciones especiales que los hacen resistentes a los virus y les permiten desarrollar músculos con menor contenido en grasa. En el hospital de la ciudad más cercana, otros cerdos contienen genomas «humanizados» manipulados selectivamente de manera que los animales puedan ser un día donantes para seres humanos. Por increíble que parezca, todos estos inventos en apariencia ficticios ya se han logrado con la ayuda de tecnología CRISPR, y la lista es mucho más larga (Doudna y Sternberg, 2017).

Los botánicos ya están entusiasmados con la posibilidad de convertir nuevos rasgos genéticos en cultivos comerciales con un procedimiento que es más seguro y más efectivo que los métodos de mutagénesis aleatoria de la segunda mitad del siglo XX, y menos invasivos que las técnicas que suelen usarse para crear organismos genéticamente modificados u OGM. Los OGM son el producto de un empalme génico mediante el cual secuencias de ADN exógeno se integran en el material genético del organismo a modificar. Aunque no hay pruebas creíbles de que los OGM sean menos seguros que las plantas sin modificar, siguen siendo objeto de intenso escrutinio público y críticas apasionadas.

Así pues, ¿cómo reaccionará el público a organismos editados genéticamente que podrían llegar a los supermercados en cuestión de años (Bunge y Marcus, 2018)? Al igual que los OGM, estos productos han sido manipulados en el laboratorio con el objetivo de mejorar su rendimiento, su resistencia a las plagas, su sabor o su perfil nutricional. A diferencia de los OGM, sin embargo, no contienen ni pizca de ADN ajeno en el genoma ni cicatrices de la intervención científica. De hecho, las correcciones genéticas introducidas quirúrgicamente no son distintas de las mutaciones de ADN que podrían haberse dado por azar. ¿Deberíamos ver de forma distintas los alimentos vegetales cuando los humanos les han provocado una mutación determinada que cuando esta se produce por «causas naturales»? A pesar de las a menudo estridentes protestas contra productos de biotecnología que terminan en la mesa, existen razones legítimas para practicar de forma agresiva la edición genética en productos agrícolas si estos esfuerzos sirven para paliar hambrunas, deficiencias nutricionales o problemas en los cultivos debidos a los futuros efectos del cambio climático.

El tiempo dirá si grupos activistas o regulaciones en exceso restrictivas obstaculizarán la innovación en este sector. Una cosa parece clara: las diferentes culturas y actitudes de partes del mundo serán fundamentales a la hora de conformar la dirección futura de las aplicaciones CRISPR. En Estados Unidos, por ejemplo, el Departamento de Agricultura decidió en 2018 que las plantas desarrolladas mediante edición genética no serían objeto de regulaciones especiales, siempre que hubieran podido ser desarrolladas mediante métodos de cultivo tradicionales. En cambio, el Tribunal de Justicia de la Unión Europea decidió, más o menos por la misma fecha, que los cultivos con genes editados estarían sujetos a la misma regulación que los OGM. Mientras tanto, la aplicación de CRISPR en agricultura ha aumentado en China, que es el primer productor agrícola mundial.

En la industria alimentaria también hay entusiasmo por las posibilidades que brinda la tecnología de edición de genes en animales. El diseño de mutaciones de ADN puede aumentar



el contenido muscular, reducir enfermedades y crear animales y también ofrece soluciones tecnológicas a problemas a menudo resueltos mediante técnicas más despiadadas. Haría posible, por ejemplo, en lugar de matar polluelos macho al día siguiente de salir del cascarón porque se prefieren las hembras, que solo nacieran hembras. De modo similar, la notable hazaña de una empresa llamada Recombinetics para «descornar» genéticamente el ganado supone una alternativa mucho más humana a la práctica cruel y generalizada de descorne por cauterización. La edición de genes incluso podría llegar a producir gallinas que pusieran huevos hipoalergénicos, cerdos que no necesiten tantos tratamientos antibióticos y ovejas con lana de color alterado naturalmente.

Luego están las aplicaciones CRISPR que rozan la ciencia ficción. En lugar de utilizar la tecnología de edición de genes para crear organismos nunca vistos sobre la tierra, algunos científicos pretenden hacer lo contrario: resucitar animales extintos que vivieron hace mucho tiempo. Por desgracia, los dinosaurios que imaginó Michael Crichton en *Parque jurásico* no son una opción —el ADN se deteriora demasiado rápido para reconstruir el genoma de ninguna especie de dinosaurio—, pero sí lo es el mamut. Usando muestras de tejido congelado extremadamente bien preservadas, los genetistas han conseguido descifrar la secuencia de letras completa del genoma del mamut y compararlo con el del elefante actual, su pariente más próximo. Ahora, George Church y sus colegas están usando CRISPR para convertir genes específicos de células de elefante en sus primos, los peludos mamuts, priorizando aquellos genes implicados en funciones como la sensación térmica, la producción de tejido graso y el desarrollo de pelo y de piel. Organizaciones como Long Now Foundation confían en usar la corrección genética para recuperar especies extintas, con especial atención en la paloma migratoria, el alca gigante y la rana incubadora gástrica (*Rheobatrachus silus*), todas ellas erradicadas directa o indirectamente del planeta por efecto de las acciones humanas. ¿Sere- mos capaces de revertir algunos de los impactos negativos que han tenido los humanos en la biodiversidad usando la biotecnología? ¿O en lugar de ello deberíamos concentrar nuestros esfuerzos en preservar la biodiversidad que aún queda, trabajando más por frenar el cambio climático, contener la caza furtiva y limitar el desarrollo urbanístico excesivo?

Hay aplicaciones CRISPR que rozan la ciencia ficción. En lugar de utilizar la tecnología de edición de genes para crear organismos nunca vistos sobre la tierra, algunos científicos pretenden hacer lo contrario: resucitar animales extintos que vivieron hace mucho tiempo

Hay una aplicación adicional de CRISPR en animales que merece ser mencionada: una tecnología de potencial revolucionario conocida como genética dirigida (Regalado, 2016). Los detalles científicos son complejos y tienen que ver con esquivar las leyes fundamentales de la herencia descubiertas por Gregor Mendel en el curso de sus experimentos con guisantes. La genética dirigida basada en CRISPR permite a los bioingenieros romper esas leyes «dirigien- do» nuevos genes, junto con sus rasgos asociados, a poblaciones de especies animales a una velocidad sin precedentes. Quizá el ejemplo más prometedor del mundo real tenga que ver con el mosquito, que causa más sufrimiento humano que cualquier otra criatura de la tierra por su extraordinaria habilidad de servir de vector para innumerables virus (dengue, Nilo Occidental, zika, etcétera) y para el parásito de la malaria. Imaginemos que mosquitos gené- ticamente modificados, manipulados de manera que no puedan transmitir la malaria, fueran



liberados en la naturaleza para que esparcieran sus genes. Mejor aún, ¿qué tal un linaje de mosquitos genéticamente modificados que diseminaran la esterilidad femenina, evitando así la reproducción y eliminando poblaciones enteras de especies? Ambas cosas ya se han logrado en experimentos de prueba de concepto conducidos en laboratorios altamente aislados y en la actualidad se busca determinar cuándo será esta tecnología lo bastante segura para hacer ensayos de campo. La erradicación de especies enteras puede parecer un arma demasiado peligrosa y las preocupaciones que pueda suscitar son legítimas, pero, si las enfermedades causadas por los mosquitos se convirtieran en algo del pasado y se salvaran así un millón de vidas humanas al año, ¿no estaría el riesgo justificado?

Hacer realidad la promesa de la edición genética para tratar enfermedades

A pesar de los numerosos y emocionantes avances en su aplicación a plantas y animales, es probable que la gran promesa de la tecnología CRISPR sea la cura de enfermedades genéticas en pacientes humanos (Stockton, 2017). Las enfermedades genéticas monogénicas son resultado de una o más mutaciones de un único gen, y los científicos calculan que hay más de 10.000, que afectan aproximadamente a 1 de cada 200 nacimientos. Muchas enfermedades genéticas como la de Tay-Sachs son mortales a edad temprana, otras, como la fibrosis quística, pueden tratarse, pero también conducen a una reducción significativa de la esperanza de vida. Luego hay otras que tienen consecuencias devastadoras a edades más avanzadas, como el deterioro físico, mental y comportamental inevitable en los pacientes de Huntington.

A pesar de los numerosos y emocionantes avances en su aplicación a plantas y animales, es probable que la gran promesa de la tecnología CRISPR sea la cura de enfermedades genéticas en pacientes humanos

Los científicos llevan soñando con la panacea para las enfermedades genéticas desde que se vincularon por primera vez las mutaciones de ADN con enfermedades hereditarias y con los años se han dado pasos de gigante. Por ejemplo, después de más de veinticinco años de ensayos clínicos, la Food and Drug Administration de Estados Unidos aprobó en 2017 el primer tratamiento farmacológico con terapia génica, en el cual pacientes que sufren una enfermedad ocular llamada distrofia retiniana reciben genes sanos que se implantan en el ojo mediante un virus genéticamente modificado. Otras enfermedades pueden tratarse con efectividad usando medicamentos de pequeñas moléculas o, en los casos más graves, trasplantes de médula ósea. Sin embargo, todos estos enfoques tratan la enfermedad de manera indirecta en lugar de atacar directamente la mutación de ADN que la causa. El tratamiento ideal curaría la enfermedad de modo permanente reparando la mutación misma, editando las secuencias de ADN patógenas y devolviéndoles la salud.

CRISPR hace posible este tratamiento. En docenas de estudios de prueba de concepto ya publicados, los científicos han logrado aplicar el editor CRISPR a células humanas cultivadas para erradicar las mutaciones que causan la anemia drepanocítica, beta-talasemia, hemofilia, distrofia muscular de Duchenne, ceguera y muchos otros desórdenes genéticos. Se ha inyectado CRISPR a ejemplares de ratones y caninos de la enfermedad humana y conseguido revertir de manera duradera y efectiva los síntomas de la enfermedad. Y los médicos



Un investigador pone en práctica un proceso CRISPR-Cas9 en el Centro de Medicina Molecular Max-Delbrueck de Berlín, Alemania, 22 de mayo de 2018





ya han testado los primeros tratamientos basados en edición génica en pacientes, aunque es demasiado pronto para saber si han sido o no eficaces.

En una senda paralela e igualmente apasionante de investigación, la tecnología CRISPR se está combinando con una nueva modalidad (premiada con el Nobel) de tratamiento de cáncer, conocida como inmunoterapia. En ella, se mejoran células humanas inmunes mediante manipulación genética, dotándolas de unas moléculas especializadas que pueden detectar los marcadores específicos de cáncer y, a continuación, eliminar células cancerosas del cuerpo. En una notable primicia, Layla Richards, una paciente de un año de edad de Londres que sufría leucemia linfoblástica aguda, el tipo de cáncer infantil más común, se curó en 2015 mediante una combinación de células inmunes editadas y trasplante de médula ósea. Desde entonces, científicos chinos han puesto en marcha ensayos clínicos en docenas de otros pacientes usando células inmunes corregidas genéticamente para tratar el cáncer y también hay ensayos inminentes en Estados Unidos y Europa.

Sin duda son muchos los obstáculos para que el potencial de los tratamientos de enfermedades basados en CRISPR se desarrolle por completo. En primer lugar, está el problema de la administración: cómo introducir CRISPR en el cuerpo y editar suficientes células de los cuarenta billones que tiene un paciente adulto de modo que los efectos sean duraderos y no haya efectos adversos. Además, las correcciones han de introducirse con un grado de precisión extremo, para evitar perturbar otros genes mientras se está reparando la mutación asociada a la enfermedad. Informes tempranos incidieron en el riesgo de los llamados efectos fuera del objetivo, en los que CRISPR indujo mutaciones no intencionadas y, dada la naturaleza permanente de los cambios de ADN, las exigencias para una terapia génica segura deben ser muy altas.

La tecnología CRISPR se está combinando con la inmunoterapia, un nuevo tratamiento del cáncer que permite mejorar células humanas inmunes mediante manipulación genética, dotándolas de unas moléculas especializadas que pueden detectar los marcadores específicos de cáncer y eliminar células cancerosas del cuerpo

A pesar de los riesgos y de los obstáculos aún en el camino, las posibilidades parecen ilimitadas. Se están publicando, de media, más de cinco estudios al día y los inversores han dado miles de millones de dólares a las compañías que trabajan en terapias basadas en CRISPR. Puede que la época en que las enfermedades genéticas y el cáncer pasen de ser enfermedades incurables a problemas médicos con solución no esté muy lejana.

La controversia ética sobre la edición de embriones

Pero ¿cuándo debe empezar a aplicarse esa solución? Aunque la mayoría de investigadores están centrados en usar CRISPR para tratar a pacientes que conviven con enfermedades, un número pequeño pero creciente de científicos se dedica a explorar el uso de CRISPR para *prevenir* la enfermedad no en pacientes vivos, sino en individuos futuros. Reparando las mutaciones de ADN directamente en embriones humanos concebidos en un laboratorio a partir de la fusión de un óvulo y un espermatozoide mediante fertilización in vitro (FIV), estos científicos aspiran a crear ediciones génicas heredables que puedan copiarse en todas las células del humano en desarrollo y transmitirse a toda su descendencia futura.



Corregir genes en embriones constituye una forma de edición de genes sobre la línea germinal, es decir, sobre las células germinales cuyo genoma puede ser heredado por generaciones futuras. La edición de línea germinal se practica de forma rutinaria en la cría animal porque es la manera más efectiva de crear animales modificados genéticamente y, de hecho, los métodos para inyectar CRISPR en embriones de ratones se han perfeccionado en los últimos cinco años. Sin embargo, la idea de realizar experimentos similares en embriones humanos suscita alarma, no solo por el miedo a que se introduzcan mutaciones heredables, sino también por las ramificaciones éticas y societales de una tecnología que podría alterar el genoma humano durante generaciones.

En 2015, cuando quedó claro que CRISPR convertiría la edición de la línea germinal en una posibilidad clara, científicos y no científicos publicaron innumerables informes llamando la atención sobre este preocupante avance tecnológico. Sin embargo, en una sincronía casi perfecta, un grupo de investigadores chinos publicó un artículo según el cual, por primera vez en la historia, se había sometido a embriones humanos a edición genética de precisión. Los embriones resultantes no se implantaron para dar lugar a embarazos, y aquellos experimentos iniciales no tuvieron especial éxito a la hora de conseguir las correcciones deseadas, pero, en cualquier caso, se había cruzado la línea roja. Desde entonces se han publicado estudios adicionales y en uno de los artículos más recientes, de Estados Unidos, se demostró que la técnica era mucho más segura y mucho más efectiva también. Muchos temen que los primeros humanos nacidos con mutaciones controladas en el ADN estén a la vuelta de la esquina.

En los medios de comunicación abundan las predicciones apocalípticas de un futuro con bebés de diseño con inteligencia, fuerza o belleza superhumanas, y es importante subrayar lo equivocado de estas reacciones alarmistas. La gran mayoría de rasgos humanos solo son parcialmente atribuibles a la genética y suelen ser el resultado de miles y miles de variantes de genes, cada uno de los cuales tiene solo un impacto pequeño y fugaz a la hora de determinar ese rasgo. Los panoramas futuristas de ciencia ficción que pintan películas como *Gattaca* o libros como *Un mundo feliz* van a seguir siendo eso: ciencia ficción.

En 2015, por primera vez en la historia, se sometió a embriones humanos a edición génica de precisión. Los embriones resultantes no se implantaron para dar lugar a embarazos, y aquellos experimentos iniciales no tuvieron especial éxito, pero se había cruzado la línea roja

No obstante, la aparición de una tecnología práctica y potente de edición de genes puede cambiar nuestra manera de pensar en la reproducción, en especial cuando hay en juego mutaciones altamente penetrantes y asociadas a enfermedades. Si es posible erradicar una mutación antes de nacer, eliminando las posibilidades de que un niño desarrolle una enfermedad concreta o de que transmita esa mutación asociada a una enfermedad a sus hijos, ¿no deberíamos hacer esa intervención? Pero ¿cómo cambiará esa intervención la percepción que tiene la sociedad de los individuos que ya viven con enfermedad? ¿Quién tendría acceso a esas intervenciones? Y ¿se ofrecerían de manera igualitaria? ¿Y podría el uso de CRISPR para eliminar mutaciones asociadas a enfermedades ser solo el primer paso por la procelosa senda de utilizar la edición de genes para mejorar la genética?



Son preguntas de difícil respuesta, preguntas que han de discutirse y debatirse y no solo entre científicos, sino con las partes interesadas, aquellas a las que afectará la tecnología de edición genética: pacientes y grupos de defensa del paciente, bioéticos, filósofos, líderes religiosos, defensores de personas con discapacidades, legisladores y miembros de la sociedad en general. Además debemos esforzarnos por superar diferencias culturales y buscar el consenso internacional, para evitar una carrera armamentística genética potencial en que los países compitan entre sí por innovar más deprisa que los demás.

Hay riesgos reales asociados a la práctica incontrolada de edición de la línea germinal humana, pero ello no debe impedir el desarrollo de la tecnología CRISPR para mejorar nuestra sociedad de otras maneras. Pocas tecnologías son inherentemente malas o buenas: lo crucial es el uso que hagamos de ellas. El poder de controlar el futuro genético de nuestra especie es, a la vez, aterrador y maravilloso, y debemos ser capaces de decidir cuál es el mejor uso que podemos darle.

A modo de conclusión

Hace diez años solo un puñado de científicos conocía el término CRISPR. Hoy raro es el día en que no leemos una noticia sobre las asombrosas posibilidades de esta tecnología, y «edición genética» se está convirtiendo en una expresión de uso habitual. La tecnología CRISPR ha sido la estrella en un taquillazo hollywoodense, protagonista en numerosas series de televisión, objeto de debate de agencias gubernamentales de todo el mundo y llegará un momento en que pueda comprarse en línea como si fuera un kit de bricolaje. De aquí a diez años, CRISPR influirá lo que comemos, los medicamentos que tomamos y sin duda seguirá siendo instrumental en nuestra comprensión del mundo natural que nos rodea.

También seguirá evolucionando nuestra comprensión de la tecnología CRISPR. Porque el campo de la inmunidad bacteriana adaptiva está en ebullición, y los nuevos descubrimientos se suceden a medida que los investigadores siguen profundizando en el conflicto de miles de millones de años de antigüedad entre bacterias y virus. Ahora sabemos que los sistemas CRISPR-Cas9 son una de las muchas notables máquinas moleculares que han desarrollado los microbios para contrarrestar el ataque continuo de patógenos extraños, y los científicos continúan inventando aplicaciones innovadoras para este tesoro biológico. ¿Quién habría imaginado que la curiosidad científica y las investigaciones básicas podían revelar un campo tan prometedor de exploración biotecnológica?

El físico estadounidense Leonard Susskind escribió: «Las sorpresas inesperadas en la ciencia son la regla, no la excepción». Veamos de dónde viene el próximo descubrimiento.

Agradecimientos

Agradezco a Abigail Fischer su ayuda con las primeras versiones de este capítulo. Siento que las limitaciones de espacio me hayan impedido comentar más en profundidad las investigaciones de mis muchos colegas y animo a los lectores interesados a consultar la bibliografía incluida a continuación para un análisis más detallado.

Bibliografía

—Barrangou, R.; Fremaux, C.; Deveau, H.; Richards, M.; Boyaval, P.; Moineau S. *et al.* (2007): «CRISPR provides acquired resistance against viruses in prokaryotes», en *Science*, vol. 315, n.º 5.819, pp. 1.709-1.712.

—Bunge, J. y Marcus. A. D. (2018): «Is this tomato engineered? Inside the coming battle over gene-edited food», en *The Wall Street Journal*, 15 de abril.

—Chandrasegaran, S. y Carroll, D. (2016): «Origins of programmable nucleases for genome engineering», en *Journal of Molecular Biology*, vol. 428, n.º 5, pp. 963-989.

—Cong, L.; Ran, F. A.; Cox, D.; Lin, S.; Barretto, R.; Habib N. *et al.* (2013): «Multiplex genome engineering using CRISPR/Cas systems», en *Science*, vol. 339, n.º 6.121, pp. 819-823.

—Doudna, J. A. y Sternberg, S. H. (2017): *A Crack in Creation: Gene Editing and the Unthinkable Power to Control Evolution*, Nueva York, Houghton Mifflin Harcourt.

—Gasiunas, G.; Barrangou, R.; Horvath, P. y Siksnys, V. (2012): «Cas9-crRNA ribonucleoprotein complex mediates specific DNA cleavage for adaptive immunity in bacteria», en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, n.º 39, pp. E2.579-2.586.

—Ishino, Y.; Shinagawa, H.; Makino, K.; Amemura, M. y Nakata, A. (1987): «Nucleotide sequence of the *iap* gene, responsible for alkaline phosphatase isozyme conversion in *Escherichia coli*, and identification of the gene product», en *Journal of Bacteriology*, vol. 169, n.º 12, pp. 5.429-5.433.

—Jansen, R., Embden, J. D.; Gastra W. y Schouls, L. M. (2002): «Identification of genes that are associated with DNA repeats in prokaryotes», en *Molecular Microbiology*, vol. 43, n.º 6, pp. 1.565-1.575.

—Jinek, M.; Chylinski, K.; Fonfara, I.; Hauer, M.; Doudna, J. A. y Charpentier, E. (2012): «A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity», en *Science*, vol. 337, n.º 6.096, pp. 816-821.

—Kamens, J. (2015): «The Addgene repository: an international nonprofit plasmid and data resource», en *Nucleic Acids Research*, n.º 43, pp. D1152-1157.

—Keen, E. C. (2015): «A century of phage research: bacteriophages and the shaping of modern biology», en *BioEssays*, vol. 37, n.º 1, pp. 6-9.

—Klomp, S. E. y Sternberg, S. H. (2018): «Harnessing “A billion years of experimentation”: the ongoing exploration and exploitation of CRISPR–Cas immune systems», en *The CRISPR Journal*, vol. 1, n.º 2, pp. 141-158.

—Mali, P.; Yang, L.; Esvelt, K. M.; Aach, J.; Guell, M.; DiCarlo J. E. *et al.* (2013): «RNA-guided human genome engineering via Cas9», en *Science*, vol. 339, n.º 6.121, pp. 823-826.

—Mojica, F. J. M.; Díez-Villaseñor, C.; García-Martínez, J. y Soria, E. (2005): «Intervening sequences of regularly spaced prokaryotic repeats derive from foreign genetic elements», en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 60, n.º 2, pp. 174-182.

—Mojica, F. J. M.; Díez-Villaseñor, C.; Soria, E. y Juez, G. (2000): «Biological significance of a family of regularly spaced repeats in the genomes of Archaea, Bacteria and mitochondria», en *Molecular Microbiology*, vol. 36, n.º 1, pp. 244-246.

—Pennisi, E. (2013): «The CRISPR craze», en *Science*, pp. 833-836.

—Regalado, A. (2016): «The Extinction Invention», en *MIT Technology Review*, 13 de abril.

—Rohwer, F.; Youle, M.; Maughan, H. y Hisakawa, N. (2014): *Life in Our Phage World*, San Diego, California, Wholon.

—Rouet, P.; Smih, F. y Jasin, M. (1994): «Expression of a sitespecific endonuclease stimulates homologous recombination in mammalian cells», en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 91, n.º 13, pp. 6.064-6.068.

—Stockton, N. (2017): «How CRISPR could snip away some of humanity's worst diseases», en *Wired*, 5 de mayo.

—Urnov, F. D. (2018): «Genome editing B.C. (before CRISPR): Lasting lessons from the “Old

Testament”», en *The CRISPR Journal*, vol. 1, n.º 1, pp. 34-46. Disponible en <http://doi.org/10.1089/crispr.2018.29007.fy>

—Yu, A. (2017): «How a gene editing tool went from labs to a middle-school classroom», en *All Tech Considered*, 27 de mayo.



Peter Kalmus
Científico climático

Peter Kalmus es científico especializado en el clima del Jet Propulsion Laboratory de la NASA, en Pasadena, California. Sus áreas de interés como investigador incluyen nubes bajas, tornados, predicción ecológica y las mejoras de los informes meteorológicos de los satélites. Ha recibido la medalla de la NASA al logro profesional, es autor del premiado libro *Being the Change: Live Well and Spark a Climate Revolution* y es fundador de noflyclimatesci.org. Conocedor de los daños perdurables que causan, Peter Kalmus rechaza los combustibles fósiles. Lleva una vida normal con su mujer y sus dos hijos, pero gasta cerca de la décima parte de combustible fósil que el estadounidense medio.

Libro recomendado: Kalmus, Peter (2017): *Being the Change: Live Well and Spark a Climate Revolution* [Ser el cambio: Vivir bien y encender la chispa de una revolución climática], Gabriola Island, New Society Publishers.

El cambio climático —o quizá deberíamos hablar de colapso climático— es el gran problema al que se enfrenta hoy la humanidad. Los combustibles fósiles están presentes en todos los aspectos de la vida moderna, pero quemarlos libera dióxido de carbono, un gas invisible que calienta la Tierra mediante la absorción de infrarrojos y permanece en la atmósfera durante miles de años. En 2018, el calentamiento de cerca de 1,2 °C por encima de la cifra de referencia ya ha tenido efectos inaceptables que empeorarán vertiginosamente si el calentamiento prosigue. En la última década se hicieron progresos en la ciencia climática, pero también hubo una serie de desastres naturales relacionados con el cambio climático que afectaron tanto a humanos como a no humanos. Aunque la sensación de urgencia aumenta, sigue muy por debajo del nivel requerido para evitar un calentamiento catastrófico que amenazaría la civilización tal y como la conocemos.

«Es probable que los próximos años sean los más importantes de la historia [humana]».
Dra. Debra Roberts, copresidenta del Grupo de trabajo II del IPCC



Es difícil saber por dónde empezar a escribir sobre cambio climático, ya que afecta prácticamente a todos los aspectos de la vida humana en el planeta y a todos los niveles. Afecta a la seguridad, a los sistemas alimentarios e hídricos, a la energía y los sistemas económicos, y también a las infraestructuras. Afecta a la intensidad y el coste de los desastres naturales. Afecta a casi todos los ecosistemas que nos pongamos a estudiar, ya sean terrestres o marinos. Afecta a la salud mental, a las prioridades de las comunidades y las ciudades, al futuro de nuestros hijos. Afecta a la política, a la apertura de las sociedades, a nuestra forma de relacionarnos en tanto naciones e individuos, sobre todo con aquellos que no consideramos parte de nuestra tribu.

Cuando la temperatura media global solo en superficie se ha incrementado en 1,2 °C, muchos de esos aspectos del cambio climático ya son no solo apreciables sino catastróficos. Y es esencial comprender que todas las transformaciones se agudizarán a medida que avance el calentamiento. Dicho de otro modo, lo que experimentamos ahora no es en absoluto la «nueva normalidad»: las transformaciones serán cada vez peores, mucho peores a medida que avance el calentamiento. En realidad, puede que la expresión «cambio climático» ya no exprese adecuadamente la urgencia de esta realidad, que quizá sería mejor calificar de «colapso climático», y muchos climatólogos, incluido yo mismo, ya estamos adoptando la etiqueta de «alarmista». Porque hay que activar la alarma.

El colapso climático es un problema endiablado para la humanidad. Durante el siglo XIX un puñado de científicos precisó cómo estaban calentando el planeta las emisiones de combustibles fósiles. A esos primeros climatólogos no les preocupó un fenómeno que creían afortunadamente futuro, y algunos pensaban incluso que sería positivo vivir en una Tierra más cálida. Cada década que pasaba, los combustibles fósiles se iban afianzando más y más en la vida cotidiana, desde el transporte a la construcción, pasando por la industria y el sector alimentario. La inyección de combustibles fósiles impulsó de manera espectacular la riqueza, la movilidad, el consumo, la tecnología y la medicina. Propulsó una revolución agrícola y el aumento exponencial de la producción de alimentos promovió inevitablemente un crecimiento demográfico también exponencial. Puede decirse que la civilización humana actual funciona a base de combustibles fósiles. Somos adictos a esos productos: intentemos imaginar un mundo sin ellos. Intentemos imaginar un ejército que renunciara a ellos de forma voluntaria. En tanto individuos, comunidades, empresas y naciones estamos profundamente vinculados a esos combustibles tan prácticos, rentables y *potentes*.

Puede que la expresión «cambio climático» ya no exprese adecuadamente la urgencia de esta realidad, que quizá sería mejor calificar de «colapso climático», y muchos climatólogos, incluido yo mismo, ya estamos adoptando la etiqueta de «alarmista». Porque hay que activar la alarma

Pero el diablo se cobrará lo que se le debe. En la década de 1960 los científicos empezaron a comprender las peligrosas repercusiones del calentamiento global y a dar la voz de alarma. Por ejemplo, un informe de la Casa Blanca de 1965 advertía de que la utilización continuada de combustibles fósiles generaría un «cambio climático irreversible» y «apocalíptico», que incluiría una subida del nivel del mar de tres metros. A pesar de estas claras advertencias,



la respuesta del gobierno de Estados Unidos fue nula. Al principio, las grandes empresas del ramo sí intentaron comprender el problema. Pero en la década de 1980, percibiendo que las inminentes acciones respecto al clima podrían poner en peligro sus enormes beneficios, optaron por traicionar al mundo entero y se embarcaron en una campaña de desinformación sistemática para sembrar la confusión en la opinión pública y posponer lo más posible la aprobación de medidas. Entretanto, la opinión pública carecía incluso de usuales y visibles indicios de contaminación como la basura tirada por el suelo o los tóxicos hongos urbanos. La quema de combustibles fósiles emite dióxido de carbono (CO_2), un gas que aparece de forma natural en la atmósfera y que, al evitar la salida de los rayos infrarrojos, calienta la Tierra. Las emisiones de CO_2 , al ser inodoras e incoloras, escapan al radar de nuestra conciencia. Y el hecho de que su aumento sea paulatino y global facilita que veamos en el cambio climático un fenómeno que, afortunadamente, ocurrirá en un futuro lejano. En gran medida, ni siquiera los propios ecologistas fueron conscientes de la amenaza climática hasta por lo menos la década de 1980.

Quizá esta falta de inmediatez sea el principal obstáculo para la acción climática, ya que, a la hora de votar, la opinión pública continúa ajena al cambio climático, que sitúa en el último puesto de sus preocupaciones. Sin embargo, mientras la vida sigue su curso y la experiencia cotidiana parece normal —aunque el observador tiene indicios, incluso en su propio patio trasero, de los enormes cambios que se están produciendo—, cada vez hay más geocientíficos que piensan que el cambio climático pone en peligro la existencia de la civilización humana.

Dicho de otro modo, la civilización está en una encrucijada. A escala global, los seres humanos son ahora la principal perturbación para el mundo natural, sobre todo a través de dos mecanismos: la irrupción en los hábitats de otras especies y su transformación, y la emisión de gases de efecto invernadero y el calentamiento del planeta. En la actualidad, la humanidad debe elegir entre abandonar toda la infraestructura energética de los combustibles fósiles en un periodo increíblemente corto —los próximos treinta años— o sufrir consecuencias cada vez más catastróficas.

No cabe duda de que este breve repaso a las posibilidades que tiene el colapso climático de trastocar el avance de la humanidad constituye un aleccionador contrapeso frente a la euforia que muestran otros textos de este libro. Aunque según ciertos indicadores, a la humanidad le va mejor que nunca, el cuadro general es un tanto más sombrío, ya que el colapso climático podría hacer descarrilar todo su progreso. Para minimizar el riesgo, la humanidad debe afrontarlo con la mayor urgencia y movilizarse con un brío y un nivel de cooperación nunca vistos en la historia de nuestra especie. Por desgracia, hasta ahora el conjunto de la humanidad apenas está mostrando este urgente compromiso; en realidad, en los últimos años se han producido ciertos retrocesos, ya que en Estados Unidos, Europa y otras zonas están llegando al poder gobiernos populistas y anticientíficos. El desafío al que nos enfrentamos como especie da verdaderamente que pensar. Aunque quienes proclaman que a la humanidad le va mejor que nunca siempre serán los mensajeros con mejor prensa, quizá no sea este momento para fiestas, sino para ponerse manos a la obra.

El resto del presente capítulo se organizará de la siguiente manera. En primer lugar, daré un repaso a lo ocurrido en la década anterior a 2018, mencionando algunos hitos sobre el clima. Después analizaré algunas de las repercusiones climáticas previstas aunque la temperatura solo aumente $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ o $2\text{ }^\circ\text{C}$. A continuación, plantearé algunas posibles soluciones. En mi opinión necesitamos múltiples soluciones, a todos los niveles, un enfoque «que no descarte opciones», aunque también debemos evitar sucedáneos de soluciones, atractivas pero peligrosas, que puede que al final no resuelvan nada. Por último, alejaré el foco para observar este laberinto climático desde una perspectiva astronómica y terminaré señalando ideas sobre lo que podría significar una «nueva ilustración» en el contexto del colapso climático.

Como para escribir este amplio repaso debo apartarme de mis áreas de especialización científica y también ofrecer mis opiniones, este capítulo lo he escrito principalmente desde el punto de vista de un ciudadano.



El cambio climático en los últimos diez años

Durante los diez años anteriores a 2018 aumentaron tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como el calentamiento, y también se produjeron avances en climatología, se incrementó el número de desastres relacionados con el cambio climático y también sus costes, y se acentuó la sensación de que era urgente actuar.

Quizá una buena manera de iniciar una breve revisión (inevitablemente incompleta) sobre los últimos diez años de cambio climático sea mencionar ciertos datos sencillos pero increíbles: la Antártida se está derritiendo a un ritmo tres veces superior al de hace solo una década.¹ Así está el hielo en un mundo que se calienta.

El proceso de calentamiento durante el periodo 2008-2017 queda demostrado en diversos indicadores de calor independientes. El hecho de que el variable sistema terrestre pueda emitir esas señales durante un periodo tan corto evidencia a las claras la inusitada rapidez del calentamiento

Los principales causantes del calentamiento son las emisiones de CO₂ que produce el ser humano al utilizar combustibles fósiles y la deforestación. En junio de 2018, la cifra de CO₂ atmosférico que se midió en el observatorio hawaiano de Mauna Loa fue de 411 ppm, frente a las 388 ppm de junio de 2008.² Esa cifra se viene incrementando de forma exponencial y constante a un ritmo del 2,2% anual desde aproximadamente 1790, partiendo de un nivel preindustrial de 280 ppm.³ La media de los crecimientos interanuales recientes se ha situado en 2 ppm al año. Este persistente incremento exponencial del CO₂ atmosférico indica lo esenciales que han sido los combustibles fósiles para la civilización humana desde la Revolución Industrial; para detener ese crecimiento de manera controlada (sin colapso) hará falta una revolución energética. Durante toda la existencia de la humanidad, la principal forma de obtener energía ha sido la combustión. Ahora nuestro cometido es enchufarnos directamente al sol.

Un mundo que se calienta

El proceso de calentamiento durante el periodo 2008-2017 queda demostrado en diversos indicadores de calor independientes. El hecho de que el variable sistema terrestre pueda emitir esas señales durante un periodo tan corto evidencia claramente la inusitada rapidez del calentamiento. En ninguna otra época de la historia se ha calentado el planeta con tanta rapidez.

El gráfico 1 muestra la temperatura media mundial en superficie desde 1850, tomando como marco de referencia los valores medios del periodo 1850-1900 y basándose en los datos reunidos en Berkeley Earth, que conjugan las temperaturas en la superficie oceánica y las



Bañistas en la playa de Wannsee cercana a Berlín, en julio de 2014, cuando en Alemania se llegaron a superar los 30 °C, cuando la temperatura habitual en esa época ronda los 20 °C. El año 2014 fue el más caluroso de la historia desde que se tienen registros



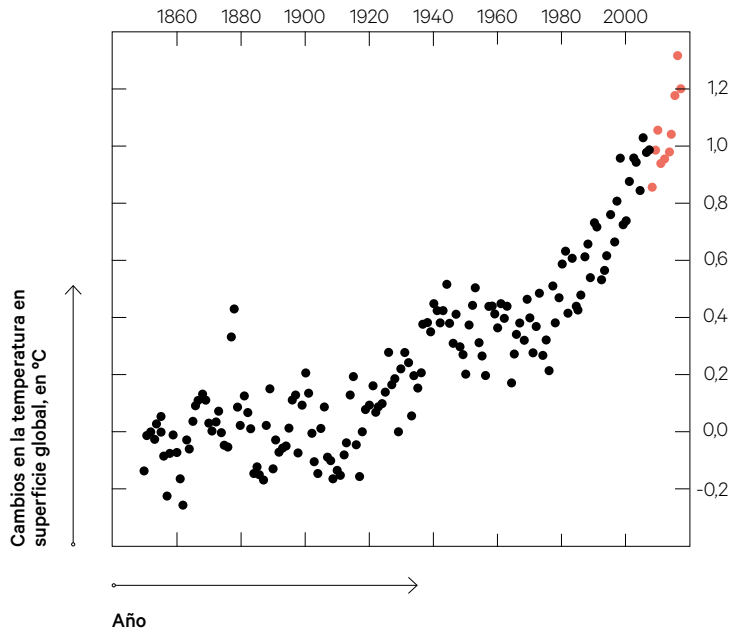


Gráfico 1. Temperatura media mundial en superficie durante 2017 en relación con la media durante el periodo 1850-1900, datos de Berkeley Earth. La década 2008-2017 aparece en rojo

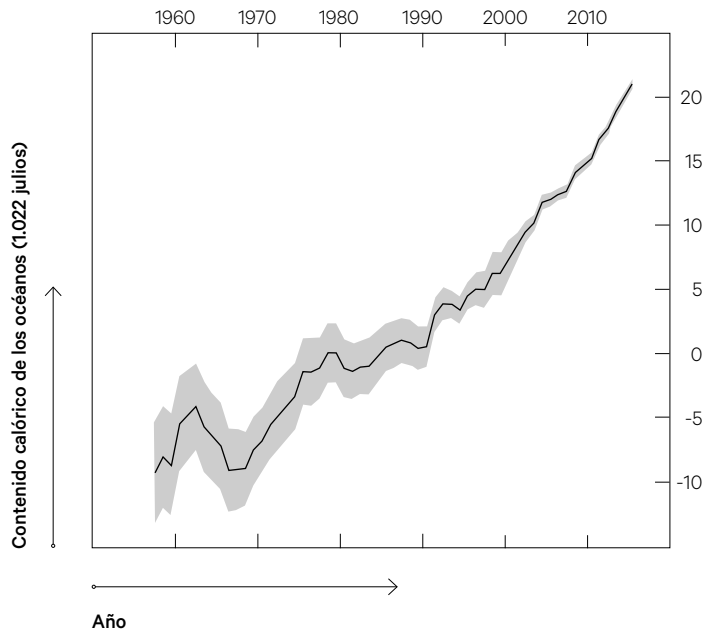


Gráfico 2. Contenido calórico medio en los océanos respecto a la media durante el periodo 1955-2006. Los sombreados representan el intervalo de confianza del 90%



recogidas en tierra, cerca de la superficie.⁴ El valor medio entre 2015-2017 fue de 1,2 °C por encima de la cifra de referencia; el de 2017, calculado en función de una media de treinta y un años extrapolada, es de 1,15 °C por encima de la cifra de referencia.⁵ El valor medio del calentamiento global en superficie se ha incrementado recientemente hasta alcanzar 0,20 °C por década (tal como indicó un ajuste lineal de las cifras de 1988 a 2017). La última década incluyó siete de los diez años más cálidos de los que se tiene constancia. Si la temperatura global continúa subiendo a este ritmo, en torno a 2035 se alcanzará una subida media del 1,5 °C por encima del dato de referencia y de 2 °C en torno a 2060.

El contenido calórico de los océanos es un indicador del calentamiento global todavía más fiable, ya que los océanos reciben más del 90% del desequilibrio calórico actual de la Tierra. El gráfico 2 presenta el contenido calórico de los océanos desde 1955, en la capa que va desde la superficie hasta los 2 kilómetros de profundidad.⁶ La temperatura mundial media en superficie y el contenido calórico de los océanos están aumentando con tanta rapidez que ya no tiene sentido señalar, por ejemplo, que en 2017 el calor oceánico batió récords.

Por diversos factores, el volumen estival del hielo ártico varía considerablemente de un año al siguiente y tiene que ver con el resto del sistema terrestre. Sin embargo, partiendo de una media de 18.900 km³ durante la década de 1998-2007, se ha reducido en más del 20% hasta alcanzar una media de 14.700 km³ durante el periodo 2008-2017.⁷ En 2017, el volumen de hielo ártico cayó hasta la cifra récord de 12.900 km³. Ese mismo año, un buque cisterna que transportaba gas natural se convirtió en el primer mercante en atravesar el Ártico sin necesidad de rompehielos, y durante el verano de 2018, por primera vez en la historia, un portacontenedores logró transitar la ruta ártica.⁸ En febrero de 2018 se registró un prolongado e intenso periodo de calentamiento en el Ártico, con temperaturas medias diarias de hasta 20 °C por encima de las medias entre 1958 y 2002. Sus consecuencias, aunque anómalas y alarmantes, aún no están claras.⁹

Entretanto, el nivel del mar, cuya situación se sigue desde el espacio desde 1993, subió entre 3 y 4 cm en la década pasada. En torno a 2/3 de la subida se debe al derretimiento de los hielos continentales y los glaciares, y alrededor de 1/3 a la dilatación térmica que produce el calentamiento de los océanos. En 2017 el nivel medio del mar en el mundo superaba en 77 cm el de 1993. Ahora se acelera a un ritmo de 0,084 mm anual. La subida del nivel del mar varía según la zona geográfica, con anomalías de hasta 15 cm por encima o por debajo del incremento medio.¹⁰ Durante la última década ha influido enormemente en la aparición de marejadas ciclónicas tropicales en los países de escasa altitud y en las inundaciones que ocasionan las mareas en las ciudades costeras, y su coste económico se ha disparado.

En 2017 un buque cisterna que transportaba gas natural se convirtió en el primer mercante en atravesar el Ártico sin necesidad de rompehielos, y durante el verano de 2018, por primera vez en la historia, un portacontenedores logró transitar la ruta ártica

Entre 2014 y 2017 las olas de calor oceánico devastaron los arrecifes de coral. En ese periodo más del 75% de los arrecifes de coral del mundo sufrieron decoloración por estrés térmico y el 30% murieron a causa de ese estrés.¹¹ En la actualidad, la decoloración masiva se repite cada seis años, con lo que los corales no tienen tiempo de recuperarse. Se cree que esta situación se agravará a medida que avance el calentamiento.



Durante la última década el calentamiento global ha producido otros múltiples y profundos cambios en los sistemas terrestres mundiales y regionales: el deshielo de los glaciares de montaña, el incremento de los días de calor extremo, el adelanto de la primavera y la mayor frecuencia de fenómenos como la sequía, los incendios forestales y otras transformaciones ecológicas afines en el oeste de Estados Unidos y en otros países.

Desastres naturales relacionados con el clima

Durante los últimos diez años hemos asistido a un incremento de los desastres naturales de origen climático y de las pérdidas que ocasionan. Entre los desastres naturales de creciente intensidad relacionados con el calentamiento global figuran los ciclones tropicales, los incendios forestales, la sequía y las inundaciones.

Los huracanes y los tifones se están volviendo más frecuentes e intensos a consecuencia del rápido calentamiento de los océanos; de la mayor temperatura de la atmósfera, que retiene más humedad; de la subida del nivel del mar, que promueve la formación de marejadas ciclónicas, y de movimientos de mayor lentitud ocasionados por cambios de origen climático en la corriente en chorro. Ahora los ciclones también suelen cobrar fuerza con más rapidez. Cinco de los seis huracanes atlánticos más devastadores ocurrieron entre 2008 y 2017, y el sexto fue el Katrina, de 2005.

Al aumentar el número de regiones cálidas y secas a consecuencia del cambio climático, los incendios forestales se tornan más devastadores. En mi estado, el de California, por ejemplo, 15 de los 20 incendios principales de la historia se han producido desde 2000.¹² A este respecto, 2017 fue para California el año más destructivo desde que se tienen registros y parece que 2018 batirá ese récord.

Los incendios forestales, la sequía, las inundaciones y los ciclones tropicales están relacionados con el calentamiento global. Cinco de los seis huracanes más devastadores ocurrieron entre 2008 y 2017, y el sexto fue el Katrina, en 2005

Aunque la sequía sea un fenómeno difícil de definir y de calibrar, al que contribuyen múltiples factores, desde hace poco (2013) ha quedado claro que el calentamiento global está agravando las sequías en algunas regiones del mundo. Las sequías agravadas por el clima las pueden ocasionar dos fenómenos: la reducción de las precipitaciones y el incremento de las temperaturas, que evapora la humedad del terreno y reduce la acumulación de nieve al derretirla con más rapidez y producir más lluvia que nieve. Ahora se cree que el cambio climático ha agravado la sequía reciente que sufren California y el suroeste de Estados Unidos y que fue uno de los factores que contribuyó a precipitar la guerra civil siria en 2011.¹³

La otra cara de la sequía es el exceso de precipitaciones, que puede causar inundaciones y corrimientos de tierra. De hecho, las grandes teleconexiones atmosféricas (ondas estacionarias) pueden conectar la desecación del oeste de Estados Unidos con las inundaciones en el sudeste asiático,¹⁴ como ocurrió con el monzón de 2017, que afectó a más de 45 millones de personas y ocasionó la muerte de más de 1.000. Además de transformar la dinámica atmosférica, una atmósfera más caldeada retiene más agua, con lo que las precipitaciones son más intensas.

Las aseguradoras ya sufren pérdidas a consecuencia del incremento de los riesgos y no han tenido tiempo de adaptarse. En 2017 el sector registró cifras de pérdidas nunca vistas.¹⁵



Al llegar 2007 ya hacía mucho tiempo que los climatólogos habían ofrecido al mundo pruebas fehacientes de una importante realidad: quemar combustibles fósiles produce calentamiento, lo cual está teniendo consecuencias catastróficas, de manera que hay que dejar de quemarlos. En este sentido, durante la última década no se han producido grandes avances climatológicos. En cualquier caso, durante ese periodo la comunidad científica ha ofrecido información muy relevante; a continuación figuran algunos de mis datos favoritos:

La utilización de modelos climáticos para atribuir determinados acontecimientos climatológicos al cambio climático mediante el cálculo de probabilidades avanza con rapidez, algo que se consideraba imposible a comienzos de la década de 2000. En 2004, Stott, Stone y Allen publicaron el primer estudio de este tipo para explicar la letal ola de calor que sufrió Europa en 2003.¹⁶ En la actualidad se realizan estudios de atribución de responsabilidades relacionados con una amplia gama de cuestiones. En 2013 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) declaró que no era posible achacar las sequías al cambio climático y hasta hace pocos años los periodistas no dejaban de señalar que ningún acontecimiento concreto podía atribuirse al cambio climático. Sin embargo, en la actualidad, se publican rigurosas atribuciones de responsabilidad basadas en modelos, incluso pocos días después de los desastres naturales, y no tardarán en realizarse en tiempo real.¹⁷ Las atribuciones de responsabilidades en tiempo real podrían contribuir a que la opinión pública fuera más consciente de la urgencia de las medidas. En general, ese tipo de explicación podría tener repercusiones legales para las empresas que contaminan con sus emisiones de carbono.

En la última década se han producido avances en los sensores remotos de los satélites. GOSAT (lanzado en 2009) y OCO-2 (lanzado en 2014) proporcionan medidas precisas de las concentraciones de CO₂ en todo el planeta, algo crucial para la cooperación internacional en políticas de mitigación. Los datos procedentes de estos satélites que vigilan las emisiones de carbono también son esenciales para comprender mejor su ciclo. También se ha registrado una revolución silenciosa en los sensores remotos de los sistemas ecológicos; por ejemplo, GOSAT y OCO-2 también proporcionan, casualmente, medidas de la fluorescencia de origen solar, lo cual permite a los investigadores hacer inferencias sobre la salud de las plantas, el estrés que soportan y su productividad. En líneas generales, los registros de datos de muchas medidas espaciales iniciadas en la década de 1990 ahora superan las dos décadas, lo cual los convierte en algo cada vez más útil para la climatología.

Aunque las medidas in situ de la atmósfera hace tiempo que se basan sobre todo en tecnologías consolidadas como los globos meteorológicos, el radar y el lidar, durante la última década se ha asistido a una revolución en las medidas oceánicas in situ, gracias a la disponibilidad del sistema Argo, compuesto por unos 4.000 flotadores distribuidos por todos los océanos. Esos flotadores, que se pasan gran parte del tiempo deambulando a una profundidad de 1 km, miden la temperatura, la salinidad y las corrientes. Cada diez días bajan hasta los 2 km y después emergen a la superficie, donde unos satélites recogen sus mediciones. El proyecto de colaboración internacional Argo comenzó a funcionar con 3.000 flotadores en 2007 y desde entonces ha revolucionado nuestra forma de medir el desequilibrio energético de la Tierra.

Los modelos climáticos también han ido mejorando sistemáticamente. En 2007 se presentó el AR4 (Cuarto informe de evaluación) del IPCC, cuando los modelos climáticos globales (del tercer Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, CMIP3) solían tener resoluciones horizontales de unos 110 km. La resolución ha mejorado desde entonces y el refinamiento de malla adaptativo sitúa la alta resolución donde más se necesita. En 2008 se utilizaron por primera vez modelos para estudiar puntos de inflexión climáticos como el hielo marino ártico y



la capa de hielo de Groenlandia. Se mejoró la modelización de aerosoles y se está prestando más atención al carbono negro.¹⁸ El CMIP5 sirvió de base para el informe AR5 del IPCC, que se presentó en 2013 y que incluía una evaluación en profundidad del conjunto de modelos del CMIP5. En la actualidad, ya de camino hacia el CMIP6 y el informe AR6 del IPCC, la mayoría de las proyecciones de cambio global emanarán de Modelos del Sistema Tierra (MST), que incluyen modelos acoplados sobre los ecosistemas y la biosfera, además de otros sobre la atmósfera, el océano, el hielo y la Tierra. Ahora se tiende a incrementar la resolución espacial, ya que los equipos informáticos cada vez son más potentes. Los avances en materia de modelización y reducción de las escalas regionales también han permitido la obtención de proyecciones regionales cada vez más útiles.

En 2008 se utilizaron por primera vez modelos para estudiar puntos de inflexión climáticos como el hielo marino ártico y la capa de hielo de Groenlandia. Se ha mejorado la modelización de aerosoles y se está prestando más atención al carbono negro

En resumen, ahora podemos supervisar, medir y modelizar el sistema terrestre con más precisión y exactitud que nunca. Sin embargo, todavía queda mucho por mejorar. Por ejemplo, se calcula que el rango de equilibrio respecto a la sensibilidad climática en el caso de que se duplicaran las emisiones de CO₂ no ha dejado prácticamente de situarse entre 1,5 °C y 4,5 °C desde el Informe Charney de 1979. Sigue siendo difícil modelizar ciertos fenómenos y representar mejor, por ejemplo, las nubes y los aerosoles, los efectos de retroalimentación que desata el ciclo del carbono, o los vegetales; y representar puntos de inflexión no lineales. Todos los modelos se equivocan, pero algunos son útiles.¹⁹ Las comunidades de modelizadores y observadores han colaborado para que los modelos —que nos permiten avanzar en el conocimiento del futuro— sean útiles.

Por último, merece la pena mencionar que durante la última década se ha descubierto que casi todos los climatólogos en activo (por lo menos el 97%) coinciden en que los seres humanos están calentando el planeta.²⁰ ¿Y el 3% restante que no participa de ese consenso? En esa última década quienes lo componen escribieron 38 artículos revisados por colegas. Resulta que todos ellos tenían errores y que, cuando se corrigieron, las revisiones resultantes sí que participaban del consenso.²¹

La respuesta de la humanidad

El indicador más importante a la hora de evaluar la respuesta de la humanidad en la última década son las emisiones de CO₂, que siguen creciendo en todo el mundo. La conclusión inevitable es que, si la humanidad está haciendo algo, no funciona, al menos por ahora.

En 2017 los cuatro emisores principales eran China (28%), Estados Unidos (15%), la Unión Europea (10%) y la India (7%).²² Las emisiones de China comenzaron a aumentar drásticamente en torno a 2000 y superaron las de Estados Unidos en 2005. Sin embargo, disminuyeron el 0,3% entre 2015 y 2017, en tanto que las de la India aumentaron el 4,5% en ese mismo periodo. La India y China tienen una población parecida (1.300 y 1.400 millones de habitantes, respectivamente). Aunque la participación de la India en el calentamiento ha sido relativamente menor durante la última década, su peso será cada vez más importante en el futuro.

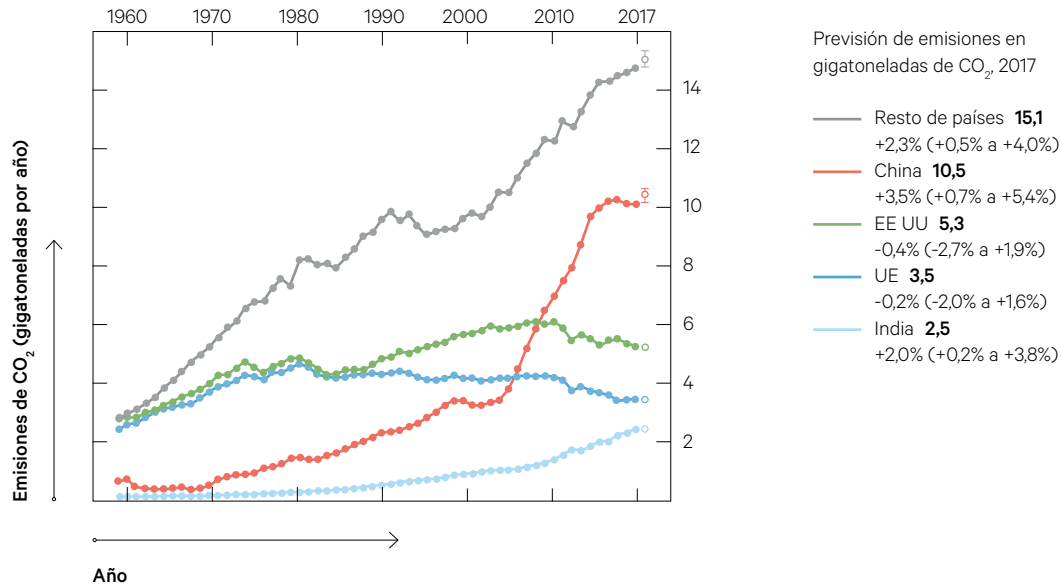


Gráfico 3. Emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles e industrias. Se calculaba que en 2007 las emisiones globales por ambos conceptos aumentarían el 2%, coincidiendo obstinadamente con el crecimiento exponencial de las emisiones a lo largo de la historia. Fuente: Global Carbon Project

En 2013 los países del mundo se reunieron en París para debatir sobre acciones climáticas al amparo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Teniendo en cuenta lo poco que se había logrado con anterioridad en el ámbito internacional, la propia organización de esta reunión constituyó un gran éxito. El cumplimiento del Acuerdo de París supondría que en 2030 las emisiones globales de gases de efecto invernadero (no solo de CO₂) equivaldrían a unas 55 Gt de CO₂ anuales, una reducción que ni por asomo serviría para mantener el calentamiento por debajo de 1,5 °C y que produciría un calentamiento bastante superior a 3 °C.²³ Fundamentalmente, se puede decir que todas las formas de alcanzar el objetivo de 1,5 °C implicarían emisiones inferiores a una cifra equivalente a 35 Gt de CO₂ al año en 2030, y la mayoría exigirían todavía menos emisiones. La idea era fortalecer la aplicación del Acuerdo de París para alcanzar los objetivos. Sin embargo, Estados Unidos y el presidente Trump proclamaron a los cuatro vientos que no solo harían caso omiso del acuerdo, sino que aplicarían políticas encaminadas a aumentar las emisiones, como las que miman al sector carbonífero. Otros podrían seguir el ejemplo del país que, una vez fuera del acuerdo, más contribuye al cambio climático a través de sus emisiones.

Ante el vacío creado en el gobierno federal de Estados Unidos y en otros países, las ciudades y los estados intentan asumir las labores de mitigación del cambio climático. La red C40, constituida en 2005, la forman megalópolis del mundo comprometidas con la lucha contra este fenómeno. Lo que pretenden sus integrantes es contribuir a que el ascenso térmico no supere el nivel de 1,5 °C. California, estado en el que resido y quinta economía del mundo, lidera las iniciativas climáticas en Estados Unidos. En 2018 California aprobó leyes innovadoras para que en 2030 el 60% de la energía eléctrica sea renovable y en 2045 esté absolutamente libre de carbono.



Las energías renovables han crecido en todo el mundo, sobre todo gracias a la reducción de costes y al aumento de volumen que genera China. En 2016 la capacidad de la energía solar fotovoltaica aumentó el 50%, y en 2017 la producción solar incorporó 98 gigavatios en todo el mundo, más que la producción conjunta procedente de combustibles fósiles y nucleares. En la actualidad, China tiene más de 3 millones de empleos ligados al sector solar, más de 1.000 veces más que Estados Unidos (230.000).²⁴ Aunque Estados Unidos tuvo la oportunidad de liderar el sector de las energías limpias hace cinco o diez años, hoy en día China es la que lleva la voz cantante. En 2017, poco menos del 5% de la electricidad mundial era de origen solar o eólico.²⁵

China también está tomando la delantera respecto a los vehículos eléctricos (VE). En 2017 había un total de 3,1 millones de VE en China, el 56% más que en 2016.²⁶ En Noruega, en 2017, el 39% de los coches que se vendieron eran VE. Irlanda ha manifestado que no permitirá ventas de vehículos con motores de combustión interna después de 2030. En California los VE representaban casi el 8% de las ventas de vehículos ligeros en abril de 2018.

Aunque resulta difícil calibrar el cambio cultural, tengo la sensación de que durante la última década se ha producido una considerable transformación respecto al clima. Los movimientos de base y la acción directa están cobrando impulso. Los enfrentamientos que ha suscitado el oleoducto de Keystone XL y el campamento de protesta instalado en la reserva india de Standing Rock han marcado un antes y un después respecto a la extracción de combustibles fósiles; esas y otras acciones aumentan la conciencia de lo dañinos que son. En Europa existe un importante movimiento de oposición a la expansión de los aeropuertos. Los académicos intentan cambiar una cultura basada en frecuentes desplazamientos en avión. Los medios de comunicación siguen sin mencionar el cambio climático cuando se producen desastres naturales, aunque puede que esta actitud esté empezando a cambiar. Las demandas por causas climáticas comienzan a cobrar fuerza y ahora hay jóvenes que denuncian al gobierno de Estados Unidos en un caso judicial que podría ser trascendental. El Sierra Club ha detenido la construcción de más de 200 centrales eléctricas de carbón y ha obtenido garantías del cierre de otras 275. Por lo que escucho a mi alrededor, tengo la sensación de que en la vida cotidiana los estadounidenses hablan más del cambio climático que en 2008, aunque no lo suficiente.

En 2016 la capacidad de la energía solar fotovoltaica aumentó el 50%, y en 2017 la producción solar incorporó 98 gigavatios más que la producción conjunta procedente de combustibles fósiles y nucleares

El movimiento ecologista popular se está transformando en un movimiento por la justicia climática, una respuesta a la profunda injusticia que supone el colapso climático: quienes más han contribuido a producirlo (los ricos de los países ricos del Norte global) serán los que menos lo sufran, y quienes menos han tenido que ver en su aparición (los pobres de los países pobres del Sur global) serán los que más lo sufran. La mitad de las emisiones mundiales las produce el 10% de la población del planeta. La justicia climática podría ayudarnos a adoptar con más rapidez una mentalidad inclusiva «que no descarte opciones» y cree el «movimiento de movimientos» que se necesita. El movimiento por la justicia climática nunca debe perder de vista el factor más importante: las emisiones. A las moléculas de efecto invernadero no les importa la política y, para ser potente, el movimiento no debe excluir a nadie. Centrarse en la reducción de emisiones podría minimizar el riesgo de politizar aún más la acción climática.



En resumen, la respuesta humana, en toda su inevitable complejidad, ha comenzado a coger carrerilla a todos los niveles. Ahora es insuficiente, pero se está produciendo un cambio cultural. Las personas se inspiran las unas a las otras.

Hace unas pocas noches un amigo me llamó para decirme que, en un par de horas, el ayuntamiento de una localidad cercana iba a votar si declaraba que sus ciudadanos utilizaran, por defecto, el 50% o el 100% de la energía eléctrica renovable. Aquí en California, muchas comunidades están adoptando la llamada «opción energética comunitaria», gracias a una ley estatal que permite a ciudades y condados coaligarse y elegir cómo se genera su *mix* energético. Los residentes entran, por defecto, en un determinado plan, aunque también pueden elegir otro. Como la gran mayoría se queda en el primero, nuestra misión era presionar al ayuntamiento para que adoptara la opción 100% renovable. Así que me fui al centro de la localidad. Hablé durante dos minutos y el Ayuntamiento comenzó sus deliberaciones. Mi amigo, retrasado por una acción similar en otra ciudad, llegó justo a tiempo para la votación y también tuvo oportunidad de hablar. Los concejales votaron 5-0 a favor de la opción 100% renovable. Después de la votación, tres de los concejales se bajaron del estrado y nos abrazamos. La acción tenía poco peso, pero la sensación fue estupenda.

Todos somos mamíferos. Nuestras acciones son limitadas. Por lo tanto, es natural que nos abrume el colapso climático. Pero si nos desconectamos nos sentiremos todavía peor. Puede que no sea suficiente hacer cada uno lo que pueda, pero no podemos hacer más. Al hacer todo lo posible nos relacionamos con los demás seres humanos del mundo que están adoptando la misma actitud. Es el mejor antídoto contra la tristeza que genera la situación climática.²⁷

El presupuesto de carbono para no superar 1,5 °C de calentamiento

En 2017 la humanidad emitía 42 ± 3 Gt de CO₂ al año, o alrededor de 1 Gt de CO₂ cada 8,6 días,²⁸ mientras que en 2007 emitía 34 Gt de CO₂ al año (la media entre 2002 y 2012).²⁹ Esto supone que las emisiones de CO₂ de la humanidad se han incrementado al mismo ritmo del 2,2% anual que la parte de CO₂ que hay en la atmósfera. Durante esos once años la población humana se ha incrementado en el 13%, es decir, en casi 1.000 millones de personas (ha pasado de 6.700 millones en 2007 a 7.600 en 2017). En el mundo, las emisiones de CO₂ per cápita se incrementaron el 9%. Dicho de otro modo, las emisiones globales las disparan tanto el crecimiento demográfico como el consumo individual.

Al llegar 2017 la humanidad había emitido una cifra acumulada que se situaba en torno a los dos billones de toneladas de CO₂ (2200 ± 320 Gt de CO₂).³⁰ Según el IPCC, todavía es físicamente posible no superar el máximo de 1,5 °C. A finales de 2018, si nos situamos en una posibilidad de $\frac{2}{3}$ de quedarnos por debajo de 1,5 °C, el IPCC calcula que la humanidad todavía podría emitir 530 Gt de CO₂ o 380 Gt de CO₂ más, dependiendo, respectivamente, de si la temperatura se mide en función de la existente en la superficie marina o del aire oceánico cercano a esa superficie.³¹

Si se mantiene el nivel de emisiones actual, es probable que el planeta supere la barrera de 1,5 °C algún año de finales de la década de 2020 o comienzos de la siguiente.³² Si continúan las emisiones, el planeta superará la barrera de los 2 °C de calentamiento a mediados de siglo.

Si la humanidad comenzara a atenuar esa tendencia de inmediato, alcanzara la neutralidad en materia de emisiones de carbono en 2055 y comenzara también a reducir los agentes emisores no relacionados con el CO₂ en 2030, las emisiones de este gas se mantendrían dentro del presupuesto de 530 Gt de CO₂.³³ Para eso harían falta una cooperación y una movilización mundiales mayores que en la Segunda Guerra Mundial y no podríamos permitirnos enfrentamientos entre países.





Durante la última década se ha asistido a una revolución en las medidas oceánicas in situ, gracias a la disponibilidad del sistema Argo, compuesto por unos 4.000 flotadores distribuidos por todos los océanos

Las olas del mar de Escocia golpean contra un iceberg tabular, o isla de hielo, con cueva. Antártida, cerca de Georgia del Sur



Si la humanidad alcanzara la neutralidad en materia de emisiones de carbono y redujera (a cero) los agentes emisores no relacionados con el CO₂ más o menos en esos periodos, es probable que el calentamiento antropogénico se detuviera pasadas unas décadas.³⁴ Fenómenos producidos por el sistema terrestre, como el metano que libera el permafrost, la pérdida de bosques y la relación directa entre el tamaño de las zonas heladas y la alteración del albedo, pueden mantener el calentamiento mucho después de superado ese momento; se desconoce cómo discurrirá ese calentamiento (su fuerza en función del tiempo y su duración última).³⁵ Una parte del CO₂ atmosférico acumulado, paulatinamente decreciente, se mantendría en la atmósfera durante miles de años, lo cual también iría reduciendo poco a poco la temperatura; el mantenimiento del calentamiento antropogénico durante siglos acentuaría aún más las pérdidas de hielo y las subidas del nivel del mar.³⁶ La eliminación del dióxido de carbono podría atenuar estas consecuencias a largo plazo, pero no se sabe si ese proceso es viable a gran escala.

La relativa sencillez de la formulación de presupuestos de CO₂ oculta un enorme grado de complejidad e incertidumbre, y la comunidad científica tiene la sensación de que lo más probable es que el cálculo del IPCC sea más abiertamente optimista que pesimista, por dos razones principales. En primer lugar, el IPCC utilizó una referencia preindustrial, la de 1850-1900. Como las emisiones de CO₂ de origen fósil habían comenzado unos cien años antes, puede que esta referencia de finales del siglo XIX minusvalorara las temperaturas medias mundiales hasta en 0,2 °C.³⁷ Por lo tanto, en el peor de los casos esto supondría que la humanidad ya habría generado el equivalente a una década de emisiones, más o menos 400 Gt de CO₂, con lo que solo quedaría un presupuesto de 100 Gt de CO₂. En segundo lugar, el IPCC no se ha propuesto incluir repercusiones del ciclo del carbono como la desaparición del permafrost y las emisiones de los humedales; según el informe SR1.5 del IPCC, las emisiones que generan esos procesos podrían restar 100 Gt de CO₂ al presupuesto necesario para no superar 1,5 °C. En consecuencia, bastan estas dos consideraciones para pensar que la humanidad ya ha consumido todo ese presupuesto. Es evidente que cuantas más emisiones se van produciendo cada día, más probable es que, por inercia, se supere la barrera de 1,5 °C.

Entre las demás causas de incertidumbre que pesan sobre el presupuesto está el conocimiento incompleto de la respuesta climática (± 400 Gt de CO₂) y las dudas sobre cómo podrá la humanidad mitigar las emisiones no relacionadas con el CO₂ (metano, carbono negro, óxido nitroso e hidrocarburos fluorados, ± 250 Gt de CO₂).

Es importante recordar que la cifra de 1,5 °C es un umbral arbitrario, destinado a comunicar riesgos y fijar objetivos. Si pensamos en lo que realmente le importa al planeta, cuanto más aumenta la temperatura, peores serán las repercusiones. Sea cual sea la verdadera cantidad de CO₂ (imposible de conocer) que podemos emitir sin alcanzar cierto nivel de calentamiento arbitrario, ya sea 1,5 °C o 2 °C, lo que debe hacer la humanidad es lo mismo: reducir las emisiones con la mayor celeridad posible (mitigación) y agarrarse porque vienen curvas (adaptación).

Qué podemos perder con aumentos de 1,5 °C, 2 °C o más

Con todo, parece claro que un incremento de 1,5 °C es lo mejor que puede esperar la humanidad en este momento, y por desgracia este nivel de calentamiento hará que las repercusiones sean mayores que las actuales. A continuación hago un breve repaso a esas repercusiones. Por razones de espacio me limitaré a comparar las que producirían aumentos de temperatura de 1,5° y 2 °C, y aunque se cree que esas consecuencias variarán enormemente según las regiones, aquí ofreceré una panorámica global.



Según las proyecciones, en tierra las temperaturas extremas subirán en torno a 3 °C, aunque este cambio variará según las regiones; en términos generales, se espera que las olas de calor que ahora alcanzan 47 °C lleguen a unos 50 °C en las zonas más cálidas.³⁸ Si se llegara al nivel de 2°C, las olas de calor serían 4 °C más cálidas que en la actualidad; cabe esperar que las que ahora alcanzan 47 °C lleguen a 51 °C. Se prevé que la frecuencia de los periodos de calor extremo (que en el clima actual tienen lugar cada veinte años) se incremente el 129%, con un calentamiento de 1,5 °C y el 343% con un calentamiento de 2 °C.³⁹ La duración de los periodos cálidos se incrementaría una media de 17 días si aumentara la temperatura 1,5 °C y 35 días si aumentara 2 °C.⁴⁰ Se prevé que la frecuencia de las precipitaciones extremas en tierra aumente el 17% con un calentamiento de 1,5 °C y el 36% con un calentamiento de 2 °C.⁴¹

Según las proyecciones, en tierra las temperaturas extremas subirán en torno a 3 °C; en términos generales, se espera que las olas de calor que ahora alcanzan los 47 °C lleguen a unos 50 °C en las zonas más cálidas

Las proyecciones indican que el nivel del mar habrá subido entre 26 y 77 cm en 2100 si el calentamiento es de 1,5 °C y 10 cm más si es de 2 °C; aunque este aumento adicional parezca escaso, es probable que suponga el desplazamiento de 10 millones de personas más en todo el mundo.⁴² Desde el punto de vista alimentario, se calcula que las pérdidas económicas se situarán en 10 billones de dólares con un calentamiento de 1,5 °C y de 12 billones si es de 2 °C.⁴³ El nivel del mar seguirá subiendo después de 2100, y durante cientos de años podrá seguir subiendo varios metros ya que las grandes superficies heladas se habrán perdido para siempre.⁴⁴ Sin embargo, todavía no está nada claro cómo irán desapareciendo esas superficies heladas y cómo se producirá la subida del nivel del mar. Los expertos en capas heladas están insistiendo cada vez más en que la subida del nivel del mar podría ser mucho más generalizada y más rápida si la desaparición de las capas heladas no fuera lineal, sobre todo en la Antártida occidental, y que ese proceso podría desatarlo hasta un calentamiento global de solo 1,5 °C.⁴⁵ Ese rápido incremento tendría graves consecuencias para las ciudades costeras, la economía y la estabilidad política del mundo.

La pérdida de extensión media del hábitat de los vertebrados se duplicaría con un calentamiento de 1,5 °C y se triplicaría si es de 2 °C.⁴⁶ En este segundo caso se perderían entre 1,5 y 2,5 millones de km² más de permafrost que si el calentamiento se limitara a 1,5 °C.⁴⁷

En el primer supuesto se perderían entre el 70% y el 90% de los arrecifes de coral de las aguas cálidas del mundo; en el segundo se perderían el 99%.⁴⁸ Con un calentamiento de 1,5 °C se calcula que el volumen de pesca anual se reduciría en 1,5 millones de toneladas, frente a los 3 millones que se perderían con un calentamiento de 2 °C.⁴⁹

Se calcula que en 2100 la circulación meridional de retorno del Atlántico se habrá reducido el 11% con un calentamiento de 1,5 °C y el 34% con un calentamiento de 2 °C.⁵⁰

Las pérdidas de biodiversidad son rápidas y duraderas; por ejemplo, se cree que la pérdida de biodiversidad de los mamíferos que tendrá lugar en los próximos cincuenta años se mantendrá durante millones de años, ya que la evolución reproduce la diversidad paulatinamente.⁵¹ A mí me parece asombroso que las consecuencias de las decisiones que tomemos durante las próximas décadas se mantengan durante millones de años.

Los riesgos sanitarios aumentan con la temperatura. Se cree que la proclividad de las zonas secas a la trasmisión de la malaria aumentará en el 19% con un calentamiento de 1,5 °C



y el 27% con un calentamiento de 2 °C.⁵² Cuanto más aumenten las temperaturas, más proliferarán los mosquitos Aedes y en mayores extensiones geográficas, con lo que se acrecentará la incidencia del dengue, la chikungunya, la fiebre amarilla y el virus del Zika. Según las proyecciones, la extensión y la estacionalidad de la enfermedad de Lyme y otras dolencias transmitidas por la garrapata aumentarán en Norteamérica y Europa, y a mayor temperatura, peores pronósticos.⁵³ Con un calentamiento de 1,5 °C, es probable que sufran estrés térmico el doble de megalópolis que ahora, con lo que en 2050 otros 350 millones de personas podrían sufrir olas de calor mortales.⁵⁴

El sistema alimentario global integrado es, como mínimo, complejo. La seguridad alimentaria futura dependerá de la interacción entre las tensiones que sufran las cosechas en cada región (respecto a temperatura, agua, plagas o empobrecimiento del suelo), la adaptación, la población, las pautas de consumo, los costes energéticos y los mercados internacionales. Hasta el momento, las mejoras de rendimiento de origen tecnológico han logrado seguir el ritmo al calentamiento global, pero si las tensiones crecen, puede que ya no sea así. Según un estudio, al llegar 2100 las cosechas de maíz del mundo se habrán reducido el 6% con un calentamiento de 1,5 °C y el 9% con un calentamiento de 2 °C.⁵⁵ Otro estudio pronostica que las cosechas medias en cuatro países que acumulan dos tercios de la producción de maíz (Estados Unidos, Brasil, Argentina y China) se reducirán entre el 8 y el 18% con un calentamiento de 2 °C y entre el 19 y el 46% si el calentamiento es de 4 °C.⁵⁶ (Estos cálculos no incorporan la tensión adicional que generaría el agotamiento de los acuíferos.)

Según un estudio, al llegar 2100 las cosechas de maíz del mundo se habrán reducido el 6% con un calentamiento de 1,5 °C y el 9% con un calentamiento de 2 °C

Es posible que las cosechas de todos los productos puedan reducirse más drásticamente con mayores temperaturas, ya que no se cree que la reacción de las plantas y las plagas al calentamiento vaya a ser lineal; esta acusada reducción con el alza de la temperatura garantizará una mayor variabilidad en el tiempo de la cosecha. Al aumentar la probabilidad de pérdida simultánea de cosechas en múltiples regiones y productos, podrían ser más frecuentes sacudidas de precios graves como la registrada entre 1972 y 1974 (por las temperaturas extremas en la URSS), que los multiplicó por tres.⁵⁷ Resulta preocupante que tales pérdidas de cosechas e incrementos de variabilidad puedan coincidir con el previsto crecimiento demográfico.

Se prevé que la pobreza global aumente con el calentamiento. Si este se limitara a 1,5 °C, y no alcanzara 2 °C, al llegar 2050 hasta varios cientos de millones de personas habrían evitado caer en la pobreza producida por la situación climática.⁵⁸

Si se superan los 2 °C de calentamiento, las repercusiones serán mucho peores y la adaptación más cara y menos eficaz.

Soluciones a corto plazo: sin descartar opciones, pero sin engañarnos

Para evitar superar la barrera de 1,5 °C de calentamiento respecto al punto de referencia de 1850-1900 en esta fecha tan tardía (si es que aún es posible) haría falta una enorme movilización global que superara con mucho los niveles actuales y que incluso fuera más allá de los compromisos del Acuerdo de París. En mi opinión, para obtener éxito, la humanidad



necesitaría convertir la acción climática en su principal prioridad y ponerla incluso por delante del crecimiento económico.

El reciente informe especial del IPCC (SR1.5) apunta que sigue siendo físicamente posible el objetivo de un calentamiento global que no supere 1,5 °C.⁵⁹ Sin embargo, para las medidas que debe tomar la humanidad, esto resulta irrelevante. Como ya hemos visto en el apartado anterior, la senda que conduce a un calentamiento de 2 °C pasa por el umbral de 1,5 °C, y las repercusiones empeoran enormemente cuanto más acusado es el calentamiento.

Aunque los pormenores de estas repercusiones previstas siguen siendo objeto de debate científico, nadie duda de lo esencial: el peligro del calentamiento antropogénico. Sin embargo, la respuesta humana siempre será objeto de discusión. En consecuencia, las recomendaciones que se hacen a continuación solo pueden expresar mis opiniones como ciudadano del mundo.

En líneas generales, debemos poner mucho empeño en adoptar soluciones que reduzcan de verdad, aquí y ahora, las emisiones. Dirán que estoy loco, pero creo que una buena manera de responder a una crisis ocasionada por la quema de combustibles fósiles es dejar de quemarlos, a todos los niveles. No cabe esperar que la vida vaya a ser igual que en la época de los combustibles fósiles. Tampoco importa: un planeta habitable es mucho más importante que la conservación de un *statu quo* que ni siquiera nos ha hecho felices.

Un pensamiento peligroso

Al evaluar la utilidad de una determinada acción climática también debemos tener en cuenta su viabilidad. Por desgracia, la naturaleza humana gravita hacia posibles soluciones que no exigen cambios inmediatos, pero que por alguna razón resultan tecnológicamente atractivas. Quizá muchos de nosotros tendamos a venerar esos apaños tecnológicos porque participan de la idea de progreso, uno de los mitos más potentes de nuestra sociedad. Esas «soluciones» son peligrosas porque atenúan la urgencia y nos apartan de acciones climáticas de peso.

Quizá el ejemplo más peligroso de este tipo de pensamiento mágico sean las tecnologías de emisiones negativas (TEN). Entre las más importantes TEN figuran la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés) y la meteorización mejorada. Aunque creo que hay que multiplicar la investigación en TEN, resulta peligrosamente irresponsable pensar que pueden servir para evitar el colapso climático. Esas tecnologías todavía no existen en la magnitud requerida y quizá no lleguen a existir a tiempo para ser útiles. Dar por hecho que algún día las TEN puedan reducir el CO₂ de la atmósfera, sirviéndonos por tanto para expiar por arte de magia la culpa de nuestras emisiones de carbono actuales, es cargar sobre los hombros de nuestros hijos tanto el precio de esos planes (que la segunda ley de la termodinámica garantiza que será elevado) como el sufrimiento que traerá consigo un nivel de calentamiento mayor del que tendrían si hubiéramos aplicado con urgencia medidas mitigadoras.

Otro ejemplo es el biocombustible de origen agrícola. En vista de los pronósticos en materia de inseguridad alimentaria descritos en el apartado anterior, podemos decir que no resulta viable que ese tipo de biocombustible se convierta en un elemento importante de la acción climática. Es más, la tasa de retorno energético (TRE) de la producción de etanol de maíz es más o menos 1:1, lo que supone que para producirlo se consume tanta energía como la que se libera en su combustión.⁶⁰ Hasta las ineficaces arenas bituminosas tienen una TRE de 4:1, y la de la energía eólica es de 20:1. Aunque se debe seguir investigando en fuentes de energía no convencionales como la fotosíntesis artificial, estos programas no deben considerarse «soluciones», por la sencilla razón de que todavía no existen y puede que no lleguen a tiempo para mitigar la crisis climática actual. Para poder mitigarla con eficacia tendrían que poder



Activistas medioambientales se agarran a una verja frente a la Casa Blanca durante una protesta contra el oleoducto de Keystone XL en marzo de 2014





desplegarse a escala mundial más o menos en los próximos diez años (es decir, antes de 2030), lo cual parece enormemente improbable. Cuanto más tarden en llegar, menos eficaces serán.

La geoingeniería solar promueve iniciativas a gran escala destinadas a reflejar una parte de la radiación solar que recibe la humanidad.⁶¹ De las iniciativas posibles, la más difundida es la que propone reproducir el efecto de las erupciones volcánicas mediante la distribución de aerosoles brillantes por la estratosfera. Al contrario que las TEN, la geoingeniería de los aerosoles es tecnológica y económicamente factible. Por desgracia, podría ocasionar nuevos y perturbadores cambios climáticos y precipitaciones, no afectaría a la acidificación del océano y, lo que es peor, podría producir un «frente de choque de terminación» que impondría a nuestros hijos una súbita y disparada subida de temperatura si, por alguna razón, la civilización se viera incapaz de continuar sufragando una amplia flota de aviones propagadores de contaminación. Nuestro conocimiento de las ramificaciones que podría tener la geoingeniería sigue siendo superficial y es preciso acelerar las investigaciones. Sería lamentable que la humanidad pensara que esta es la mejor opción, pero quizá lleguemos pronto a ese punto si la tendencia a posponer decisiones continúa y se permite que las repercusiones climáticas vayan empeorando. En ese caso sería muy aconsejable disponer de investigaciones sólidas que orientaran el proyecto.

Medidas de calado

Para tomar medidas de calado, y no las supuestas soluciones antes mencionadas, hará falta una transformación cultural y un amplio apoyo de la opinión pública. Quemar combustibles fósiles es dañino y ya no debe considerarse aceptable. La población no entiende lo desesperada que es la situación. Para mí, esto en realidad permite albergar esperanzas: cuando la población despierte, la rapidez de las acciones podría ser verdaderamente sorprendente. Su apoyo induciría a instituciones y gobiernos poderosos a luchar contra el cambio climático, no a favorecerlo. Para mí, ese apoyo marcaría la diferencia entre el día y la noche.

De todos nosotros depende que se adelante ese cambio cultural. No hay atajos. Creo que este mensaje nos da poder: lo que haga cada individuo tiene su importancia, porque las acciones individuales, comunitarias y colectivas están inextricablemente unidas. La acción colectiva permite la acción individual (al cambiar los sistemas) y esta permite aquella (al cambiar las normas sociales). La diferencia entre la acción individual y la colectiva se difumina y se convierte en una falsa dicotomía. Necesitamos acciones a todos los niveles. A quienes les preocupe el colapso climático, les recomiendo que reduzcan drásticamente y sistemáticamente sus propias emisiones y que se esfuercen por el cambio en su comunidad y fuera de ella, a través de sus conocidos, de las instituciones locales y de una apasionada comunicación que coordine los talentos de unos y otros.⁶²

A muy corto plazo, la primera y mejor medida que los países podrían aplicar es la aprobación de un impuesto y un dividendo para el carbono.⁶³ Siempre que se extraiga un combustible fósil o se importe de otro país se le aplicará un arancel en función de las emisiones de CO₂ que lleve incorporadas (y puede que también en función de otros gases de efecto invernadero). Al principio el arancel sería modesto (probablemente menos de 100 dólares por tonelada de CO₂) y se iría incrementando cada año a un ritmo regular, de manera que terminara por resultar prohibitivo (miles de dólares). Así se solventaría un enorme problema que plantea el mercado: a la civilización le sale carísima la contaminación, pero contaminar sigue saliendo gratis. De este modo, las alternativas a los combustibles fósiles se irían haciendo cada vez más viables en todos los sectores económicos, desde la electricidad libre de carbono hasta los alimentos orgánicos de kilómetro cero, pasando por fábricas sostenibles y formas de viajar



más lentas que la aviación. El carácter predecible de los precios aceleraría tanto una desinversión escalonada y ordenada en combustibles fósiles como una inversión sistemática en fuentes alternativas. Naturalmente, los individuos, las instituciones y las empresas buscarían nuevas formas de utilizar la energía de manera más eficiente (incluso en los alimentos). Las dietas abandonarían con naturalidad la carne y, para sustituirla, seguirían desarrollándose productos que los consumidores irían aceptando.

El 100% de los ingresos por esos conceptos redundaría en beneficio de todos los ciudadanos. Así se lograría que los hogares pobres no se vieran penalizados por la política; de hecho, alrededor de $\frac{3}{4}$ de los hogares más pobres mejorarían su situación, ya que los más acomodados, al utilizar más energía, harían una mayor aportación a los ingresos. El dividendo favorecería la aceptación de la política, que debería ser bien acogida tanto por los conservadores (ya que arregla el mercado, no aumenta el tamaño del Estado y no perjudica a la economía) como por los progresistas (puesto que protege el medio ambiente y ayuda a los hogares pobres y a las comunidades marginales). Imaginémosnos que es posible una acción climática unificadora.

Otra medida excelente que todos los países podrían tomar es, simplemente, utilizar menos energía. Esto facilitaría mucho la transición energética. Por ejemplo, calculo que para reducir a la mitad el consumo energético de Estados Unidos solo haría falta desarrollar el 25% más la capacidad de producción de energía libre de carbono; así se proporcionaría también electricidad a otros sectores como el transporte, la industria, la calefacción y la refrigeración. Para consumir menos energía haría falta una regulación pública que, para ser eficaz, debería contar evidentemente con el apoyo de la población. En Estados Unidos, el estado de California constituye un magnífico ejemplo a este respecto y continúa demostrando lo que de verdad se puede hacer.

Países líderes como China, Estados Unidos y los de la Unión Europea deben reconocer su enorme papel en la crisis climática y proporcionar el apoyo económico necesario a otros cuyo peso en ese sentido ha sido mucho menor

La regulación también sería positiva para solucionar problemas como las emisiones no relacionadas con el CO₂ (como las de hidrocarburos fluorados) y la deforestación. En primer lugar, los gobiernos tendrán que ejercer de líderes dentro de sus propias fronteras. Después necesitarán abogar por normativas internacionales estrictas y viables. Dicho de otro modo, el cambio cultural tendrá que cobrar fuerza suficiente para impulsar medidas de calado y de alcance internacional. Para ello será preciso que países líderes como China, Estados Unidos y los de la Unión Europea reconozcan su enorme papel en la crisis climática y acuerden proporcionar el apoyo económico necesario a otros cuyo peso en ese sentido ha sido mucho menor. Por ejemplo, a los países líderes les beneficiará que Indonesia detenga la deforestación; quizá deban darle apoyo económico para que la detenga y para compensar las pérdidas en las que incurrirá. En términos más generales, el cambio cultural deberá cobrar suficiente fuerza como para iniciar procesos de expiación (reconocimiento de la responsabilidad) y de reparaciones (apoyo económico).

En una democracia, políticas importantes como el impuesto y el dividendo al carbono, así como regulaciones estrictas que permitan evitar de manera rápida y sistemática las emisiones no relacionadas con el CO₂ exigen políticos partidarios de esos programas; para que esos políticos



El Golmud Solar Park de Qinghai, China, es uno de los proyectos más importantes de energía solar en el país. China anunció en 2017 un plan de inversión de 100 mil millones de dólares en energía renovable para 2020. Con el tiempo, se espera que la inversión en energía renovable aumente aún más.





lleguen al poder, hace falta que ganen elecciones con programas que incluyan esas políticas; para ganar elecciones se necesitan votos suficientes; para tener votos suficientes hace falta una población claramente partidaria de esas políticas, y para contar con el apoyo de la población es preciso un cambio cultural. Por ejemplo, en Estados Unidos, las encuestas indican que tanto para los votantes republicanos como para los demócratas el clima es la última o casi la última de las preocupaciones. Esto debe cambiar.

En consecuencia, preguntarse cómo podemos conseguir las políticas necesarias para que la acción contra el cambio climático sea eficaz equivale a preguntarse cómo podemos promover el cambio cultural que convierta el clima en una preocupación.

La humanidad también necesita avanzar hacia el respeto a los condicionantes ecológicos con la mayor celeridad posible. En mi opinión, para que la acción colectiva sea eficaz y genere el respeto de la civilización a los límites del planeta hará falta que el cambio cultural vaya aún más lejos de lo necesario para alcanzar marcos reguladores e impuestos al carbono estrictos. Cuando pienso en cómo puede la humanidad evitar un mayor colapso de la civilización, me imagino que primero vendrán las normativas climáticas y los impuestos al carbono, que a su vez irán fomentando el cambio cultural al insuflar esperanza y mejorar la existencia de las personas. A muy corto plazo, por ejemplo, el impuesto y el dividendo, que son una medida viable, podrían promover un cambio de relato: pasar de «un dominio y un crecimiento humanos tristes» a una «gozosa gestión de una Tierra frágil e interconectada». Resulta difícil imaginarse el poder transformador que ese cambio podría desatar.

La perspectiva astronómica

Al observar la icónica fotografía conocida con el nombre de *Earthrise*, que tomó el astronauta del *Apolo 8* Bill Anders en 1968, es imposible no apreciar la realidad de nuestro planeta: un oasis frágil y astronómicamente improbable, en medio de un vacío oscuro y frío. Vivimos en la nave espacial Tierra, todos los seres humanos junto al resto de la vida, tal como la conocemos. El mundo que muchos de nosotros, y nuestra cultura colectiva, pensábamos que siempre existiría, que «teníamos controlado», es en realidad un sistema minúsculo y aislado, perfectamente situado respecto a un infierno nuclear esférico y cuya finísima atmósfera está dotada de la mezcla idónea de productos químicos para permitir la vida y la civilización humanas. Quizá, de todos los logros que ha cosechado la climatología en los últimos diez años, el más importante sea esta conciencia; algo que se añade a la inequívoca constatación de la fragilidad del clima terrestre y de que ahora los seres humanos, sin ayuda de nadie, están abandonando la zona de seguridad de su propia civilización.

La astrobiología estudia cómo surge la vida en los planetas del universo. En la actualidad, los astrobiólogos se están planteando que quizá el colapso climático no solo sea un desafío para la civilización humana, sino para las civilizaciones de otros planetas.⁶⁴ Ese colapso podría ayudar a comprender el asombroso silencio que emana de millones y millones de planetas que orbitan en torno a casi todas las estrellas del cielo nocturno. Quizá nuestra civilización no haya sido la única que haya descubierto los combustibles fósiles y su utilidad, que se hizo adicta a su consumo y que calentó peligrosamente el clima de su planeta.

Era natural que la humanidad utilizara los combustibles fósiles para construir civilizaciones. Pero ahora que tenemos tan claro que su combustión ocasiona daños irreversibles al conjunto del planeta, debemos comenzar a abandonarlos como si de ello dependiera el futuro de la vida humana y no humana en la Tierra.

Hacia una nueva Ilustración: el lugar de la humanidad en la trama de la vida



En su avance, más le valdría a la humanidad analizar por qué se encuentra su civilización en esta encrucijada y qué lecciones puede aprender. Las dos crisis que debe afrontar con más urgencia la biosfera global, y con ella la humanidad, son el cambio climático y la pérdida de hábitats. Ambos emanan del principio rector de la cultura globalizada predominante: «toma y consume», sin pararte apenas a pensar en cómo pueden tus acciones influir en los demás seres que habitan la nave Tierra, tanto humanos como no humanos.

En consecuencia, la principal lección que se podría extraer sería que nada en la biosfera —incluidos el individuo humano y desde luego la especie humana— está aislado, sino que se relaciona con todo lo demás. Esto nos conduce lógicamente a una regla de oro para la civilización sostenible: tratar a la Tierra y a sus seres como nos gustaría que ella y ellos nos trataran a nosotros. Una diferencia fundamental entre aquellos cuya mentalidad se basa en la separación y quienes parten de la conexión es que los primeros dan cosas por hechas y que sus acciones se basan en el egoísmo; en tanto que los segundos se sienten profundamente agradecidos a todos los factores que contribuyen a su existencia y sus acciones se basan en esa gratitud.

Además de una rápida transición que la aparte de los combustibles fósiles, la humanidad debe enfrentarse a otra gran crisis global ya en marcha: la pérdida de hábitats. Por lo menos la mitad de la Tierra debería considerarse hábitat no humano para dar espacio a otras especies.⁶⁵ Esta podría ser la única manera de que el planeta comenzara a regenerar una biosfera sana, algo que, a la larga, sin duda beneficiaría a la humanidad. Para conseguir ese objetivo habría que cambiar totalmente de paradigma y abandonar el crecimiento exponencial incontrolado con el fin de hacernos conscientes de nuestra propia colectividad, respetar los límites y aceptar con gozosa humildad que solo somos uno de los hilos de la trama que envuelve la vida en este hermoso planeta.

Notas

1. Shepherd, A. *et al.* (2018): «Mass balance of the Antarctic ice sheet from 1992 to 2017», en *Nature* n.º 558. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>. Para un resumen periodístico, ver Pierre-Louis, Kendra, «Antarctica is melting three times as fast as a decade ago», en *The New York Times*, 13 de junio de 2018. Disponible en <https://www.nytimes.com/2018/06/13/climate/antarctica-ice-melting-faster.html>
2. Keeling, C. D.; Piper, S. C.; Bacastow, R. B.; Wahlen, M.; Whorf, T. P.; Heimann, M. y Meijer, H. A. (2001): «Exchanges of atmospheric CO₂ and 13CO₂ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects», *SIO Reference Series*, n.º 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, p. 88. Disponible en http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2/primary_mlo_co2_record
3. Kalmus, Peter (2017): *Being the Change: Live Well and Spark a Climate Revolution*, Grabiola Island, New Society Publishers, p. 42.
4. Los datos proceden de las series temporales sobre temperatura en las superficies terrestre y oceánica de Berkeley Earth. Disponible en <http://berkeleyearth.org/data/>
5. Para calcular esta estimación más estable de la temperatura en 2017 realicé un ajuste lineal entre 2002 y 2017, lo extrapolé a 2032 y calculé la media de la serie temporal resultante.
6. NOAA, Ocean Climate Laboratory, Global Ocean Heat y Salt Content (2012): «Basin time series of heat content (product, 0–2000 meters)». Disponible en http://nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/basin_data.html. Datos descritos en Levitus, S. *et al.* (2012): «World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010», en *Geophysical Research Letters*, n.º 39. Disponible en <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>
7. Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System (PIOMAS). Schweiger, A.; Lindsay, R.; Zhang, J.; Steele, M. y Stern, H. (2011): «Uncertainty in modeled arctic sea ice volume», en *Journal of Geophysical Research*. Disponible en <https://doi.org/10.1029/2011JC007084>
8. Booth, W. y Ferris-Rotman, A. (2018): «Russia's Suez Canal? Ships start plying a less-icy Arctic, thanks to climate change», en *The Washington Post*, 8 de septiembre. Disponible en https://www.washingtonpost.com/world/europe/russias-suezcanal-ships-start-plying-an-icefree-arctic-thanks-to-climatechange/2018/09/08/59d50986-ac5a-11e8-9a7d-cd30504ff902_story.html
9. Watts, J. (2018): «Arctic warming: scientists alarmed by "crazy" temperatures», en *The Guardian*, 27 de febrero. Disponible en <https://www.theguardian.com/environment/2018/feb/27/arctic-warming-scientists-alarmed-by-crazy-temperature-rises>
10. Thompson, P. R. *et al.* (2018): «Wind-driven coastal sea level variability in the northeast Pacific», en *State of the Climate in 2017, Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 99, n.º 8, pp. S84–S87.
11. Eakin, C. M. *et al.* (2018): «Unprecedented three years of global coral bleaching 2014–17», en *State of the Climate in 2017, Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 99, n.º 8, pp. S74–S75.
12. Wallace, T. *et al.* (2018): «Three of California's biggest fires ever are burning right now», en *The New York Times*, 10 de agosto. Disponible en <https://www.nytimes.com/interactive/2018/08/10/us/california-fires.html>
13. Cook, B. I. *et al.* (2018): «Climate change and drought: from past to future», en *Current Climate Change Reports*. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2>
14. Jiagan, Y. (2018): «Response of subtropical stationary waves and hydrological extremes to climate warming in boreal summer», en *Journal of Climate*. Disponible en <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-04011>
15. Hulac, B. (2018): «Climate change goes firmly in the "loss" column for insurers», en *Scientific American*, 15 de marzo. Disponible en <https://www.scientificamerican.com/article/climate-change-goes-firmly-in-the-loss-column-for-insurers/>
16. Stott, P. A.; Stone, D. A y Allen, M. R. (2004): «Human contribution to the European heatwave of 2003», en *Nature*, n.º 432. Disponible en <https://doi.org/10.1038/nature03089>
17. Schiermeier, Q. (2018): «Droughts, heatwaves and floods: How to tell when climate change is to blame», en *Nature*, n.º 560. Disponible en <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05849-9>
18. Ramanathan, V. y Carmichael, G. (2008): «Global and regional climate changes due to black carbon», en *Nature Geoscience*, n.º 1.
19. Frase normalmente atribuida a George Box.
20. Cook, J. *et al.* (2016): «Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming», en *Environmental Research Letters*, n.º 11. Disponible en <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/4/048002/meta>
21. Benestad, R. E. *et al.* (2016): «Learning from mistakes in climate research», en *Theor Appl Climatol*. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1597-5>. Ver también Foley, Katherine Ellen (2017): «Those 3% of scientific papers that deny climate change? A review found them all flawed», *qz.com*, 5 de septiembre. Disponible en <https://qz.com/1069298/the-3-of-scientific-papers-that-deny-climate-change-are-all-flawed/>
22. CDIAC.
23. IPCC SR1.5.
24. Foehringer Merchant, E. (2018): «2017 was another record-busting year for renewable energy, but emissions still increased», en *GreenTechMedia*, 4 de junio. Disponible <https://www.greentechmedia.com/articles/read/2017-another-record-busting-year-for-global-renewable-energy-capacity#gs.cyX97b4>
25. World Nuclear Association (2017): «World electricity production by source 2017». Disponible en <https://blogs.stlawu.edu/ruby/2018/03/23/world-electricity-production-by-source-2017/>
26. Gorey, C. (2018): «Global sales of EVs hit record number, but is it sustainable?», en *Siliconrepublic*, 30 de mayo. Disponible en <https://www.siliconrepublic.com/machines/global-sales-evs-2017>
27. Kalmus, Peter (2018): «The best medicine for my climate grief», en *Yes! Magazine*, 9 de agosto. Disponible en <https://www.yesmagazine.org/mental-health/the-best-medicine-for-myclimate-grief-20180809>
28. IPCC SR1.5.
29. IPCC AR5 WG1. Para evitar cualquier confusión, hay que señalar que una tonelada de carbono emitida equivale a la emisión de 3,67 toneladas de CO₂
30. IPCC SR1.5.
31. *Ibid.*
32. *Ibid.*
33. *Ibid.*
34. *Ibid.*
35. *Ibid.*
36. *Ibid.*
37. Schurer, A. P. *et al.* (2017): «Importance of the pre-industrial baseline for likelihood of exceeding Paris goals», en *Nature Climate Change*, n.º 7. Disponible en http://centaur.reading.ac.uk/71780/1/schurer_etal_2017_NCC_accepted.pdf
38. IPCC SR1.5.
39. Kharin, V. V. *et al.* (2018): «Risks from climate extremes change differently from 1,5 °C to 2.0 °C depending on rarity», en *Earth's Future*. Disponible en <https://doi.org/10.1002/2018EF000813>
40. Aerenson, T. *et al.* (2018): «Changes in a suite of indicators of extreme temperature and precipitation under 1.5 and 2 degrees warming», en *Environmental Research Letters*, n.º 8. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaf6>
41. *Ibid.*
42. IPCC SR1.5.
43. Jevrejeva, S. *et al.* (2018): «Flood damage costs under the sea level rise with warming of 1,5 °C and 2 °C», en *Environmental Research Letters*, n.º 13. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaacc76>
44. IPCC SR1.5.
45. *Ibid.*

46. *Ibíd.*
47. *Ibíd.*
48. *Ibíd.*
49. *Ibíd.*
50. Palter, J. B. *et al.* (2018): «Climate, ocean circulation, and sea level changes under stabilization and overshoot pathways to 1.5 K warming», en *Earth System Dynamics*, n.º 9. Disponible en <https://doi.org/10.5194/esd-9-817-2018>
51. Davis, Matt, Faurby, Søren y Svenning, Jens-Christian (2018): «Mammal diversity will take millions of years to recover from the current biodiversity crisis», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Disponible en <https://doi.org/10.1073/pnas.1804906115>
52. Huang, J. *et al.* (2017): «Drylands face potential threat under 2C global warming target», en *Nature Climate Change*, n.º 7. Disponible en <https://www.nature.com/articles/nclimate3275>
53. IPCC SR1.5.
54. *Ibíd.*
55. Tebaldi, C. y Lobell, D. (2018): «Differences, or lack thereof, in wheat and maize yields under three low-warming scenarios», en *Environmental Research Letters*, n.º 13. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaba48>
56. Tigchelaar, M. *et al.* (2018): «Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks», en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n.º 115. Disponible en <https://doi.org/10.1073/pnas.1718031115>
57. *Ibíd.*
58. IPCC SR1.5.
59. *Ibíd.*
60. Kalmus, Peter (2017): *Being the Change: Live Well and Spark a Climate Revolution, op., cit.* (nota 3), p. 98.
61. Dunne, D. (2018): «Explainer: six ideas to limit global warming with solar geoengineering», en *Carbon Brief*, 5 de septiembre. Disponible en <https://www.carbonbrief.org/explainer-six-ideas-to-limit-global-warming-with-solar-geoengineering>
62. Para más información sobre por qué hay que cambiar, cómo hacerlo y cómo difundir ese cambio, ver mi libro *Being the Change: Live Well and Spark a Climate Revolution, op. cit.* (nota 3).
63. Para saber más sobre este asunto, recomiendo indagar en las fuentes que proporciona Citizens' Climate Lobby. Disponible en <https://citizensclimatelobby.org>
64. Frank, Adam (2017): *Light of the Stars: Alien Worlds and the Fate of the Earth*, Nueva York, W. W. Norton & Company.
65. Wilson, E. O. (2017): *Half Earth: Our Planet's Fight for Life*, Nueva York, Liveright. [Ed. esp. (2017): *Medio planeta: la lucha por las tierras salvajes en la era de la sexta extinción*, Madrid, Errata Nature.]



Ernesto Zedillo Ponce de León
Yale University

Ernesto Zedillo es director del Yale Center for the Study of Globalization, profesor de Economía y Política Internacionales, profesor de Estudios Internacionales y de Área y profesor adjunto de Estudios Forestales y Ambientales en la Universidad de Yale. Después de casi una década en el Banco Central de México, fue subsecretario de Presupuesto, secretario de Planificación Económica y Presupuesto y secretario de Educación, antes de servir como presidente de México entre 1994-2000. Es presidente del consejo directivo del Instituto para la Gobernanza de los Recursos Naturales y de la comisión económica para la salud planetaria de la Fundación Rockefeller, copresidente del Diálogo Interamericano y miembro de la organización The Elders. Está en la Comisión Global de Políticas de Drogas, en el comité de selección del premio Aurora y, entre 2008 y 2019, preside la alta comisión para la modernización de la gobernanza del Grupo Banco Mundial. Es miembro del Grupo de los 30. Se graduó en Ciencias Económicas en el Instituto Politécnico Internacional de México y es máster y doctor en Economía por la Universidad de Yale.

Libro recomendado: Wolf, Martin (2004): *Why Globalization Works* [Por qué funciona la globalización], New Haven, Yale University Press.

Para que la globalización desarrolle todo su potencial, es necesario que todos los gobiernos se tomen más en serio la lección de economía según la cual los mercados abiertos han de ir acompañados de políticas que moderen la disrupción de su impacto y sean más inclusivas en la población en general. Hay que identificar y solucionar los verdaderos problemas, no eludirlos, algo que ocurre cuando se proponen retoques en las políticas comerciales como herramienta para abordar males sociales inaceptables.



Este capítulo se escribe una década después de la peor crisis ocurrida en la economía global en más de setenta y cinco años. El colapso del mercado de las hipotecas *subprime* durante el verano de 2007 en Estados Unidos se convirtió en una crisis en toda regla cuando Lehman Brothers cayó en la madrugada del 15 de septiembre de 2008. El pánico financiero que se vivió aquellos días marcó no solo el final de la llamada «gran moderación», también el comienzo de un periodo, si no de ocaso, sí de expectativas seriamente mermadas para la globalización moderna.

La década que precedió la gran crisis de 2008-2009 fue, en muchos sentidos, una edad de oro de la globalización, cuidadosamente reconstruida a lo largo de cincuenta años después de que la Gran Depresión y la Segunda Guerra Mundial la destruyeran. A pesar de la crisis asiática de 1997-1998 y otras crisis financieras en otros países emergentes, la globalización se intensificó de forma marcada en la década de 1990 hasta el punto de que, para finales del siglo XX, había superado, al menos en los frentes comercial y financiero, la edad dorada de casi un siglo antes.

En el transcurso de esta mini edad de oro de la globalización contemporánea, crecieron hasta niveles sin precedentes no solo el comercio de bienes y servicios y los flujos transfronterizos de capital, también se inició, por fin, un proceso de convergencia económica entre las economías desarrolladas, las emergentes y las todavía en desarrollo.

Durante más de cien años, el grupo de países conocido en la historia reciente como avanzados —con Estados Unidos, Europa occidental y Japón a la cabeza— había generado de manera consistente el 60% o más de la producción global. Daba la impresión de que la alta aportación de este grupo de países a la producción mundial se mantendría a perpetuidad. Su superioridad económica no se vio afectada ni por la industrialización de la Unión Soviética ni por el despegue, en la década de 1960, de algunos países previamente subdesarrollados.

En 1950, la aportación de los países avanzados al PIB global era del 62% en términos de paridad de poder adquisitivo (PPP) y del 22% en términos de población mundial. Dos décadas después, esa aportación a la producción global seguía siendo la misma y para 1990 se mantenía, a pesar de que la población de esos países había caído hasta suponer solo el 15% de la mundial (Addison, 2001). De hecho, la convergencia económica de los países en desarrollo con los industrializados pareció implausible durante todo el siglo XX. Los países que concentraban el grueso de la población del planeta parecían condenados a una aportación mínima al PIB global.

La década que precedió la gran crisis de 2008-2009 fue, en muchos sentidos, una edad de oro de la globalización, cuidadosamente reconstruida a lo largo de cincuenta años después de que la Gran Depresión y la Segunda Guerra Mundial la destruyeran

Esa aparente regularidad histórica terminó en la década anterior a la crisis. Ahora, desde mediada la primera década de este siglo, los países emergentes o en desarrollo son responsables de más de la mitad de la producción mundial (Buitier y Rahbari, 2011). Huelga decir que la renta per cápita de los países más ricos sigue superando por un margen sustancial a la de los países emergentes de crecimiento más acelerado. Pero la brecha histórica se ha cerrado significativamente. Parte de la explicación de esta convergencia económica es que, durante las últimas décadas, el grupo de países ricos ha registrado un crecimiento más lento.



Pero, en su mayor parte, la convergencia se ha debido a la aceleración del crecimiento de países en desarrollo, y este crecimiento ha estado impulsado precisamente por aquellos países que, después de ser economías cerradas hasta hace pocas décadas, alrededor de la de 1980 hicieron esfuerzos por integrarse en la economía global. Así, en menos de un cuarto de siglo, un grupo de países en desarrollo —que suman más del 55% de la población mundial— doblaron su ratio comercio-PIB y se abrieron a la inversión extranjera directa (IED), con lo que lograron aumentar su PIB per cápita a un ritmo dos veces superior al de los países ricos. Y lo que es más importante, a pesar del crecimiento demográfico, también redujeron tanto el número como la proporción de sus habitantes que vivían en pobreza extrema.

Se trata de países que han logrado acelerar su industrialización insertando sus capacidades productivas en las cadenas de suministro globales nacidas de la revolución de las tecnologías de la información (TI) (Baldwin, 2014).

Antes de esta revolución, la industrialización dependía de economías de escala, así como de la integración vertical y de la concentración o *clustering* de los procesos de producción. En consecuencia, construir una industria competitiva requería una base industrial bien cimentada, una situación que, históricamente, había logrado solo un número pequeño de países.

Por su parte, el comercio internacional tenía que ver con la especialización en la producción de bienes o materias primas y en esencia consistía en vender las mercancías producidas en un país a clientes de otro; es decir, que se trataba, en la práctica, de un comercio bilateral.

A medida que las capacidades de computación y telecomunicación se fueron haciendo más baratas y potentes, y con los ya reducidos costes de transporte y la disminución de impedimentos al comercio trasfronterizo, empezó a resultar económicamente atractivo separar procesos de producción que antes habían estado integrados y concentrados. La dispersión de la producción en cadenas de suministro internacionalizadas empezó a ser rentable y, en muchos casos, terminó convirtiéndose en la única manera de ser competitivo.

Los antiguos clústers de fabricación han ido poco a poco dando paso a una fragmentación geográfica de producción apoyada en flujos incesantes de inversión, tecnologías, experiencia personal, información, finanzas y transportes y servicios de logística de alta eficacia, ninguno de los cuales sería posible a la velocidad y la fiabilidad requeridas sin las TI modernas. Esta revolución hace que sea relativamente barato coordinar actividades complejas repartidas por todo el globo en forma de cadenas de suministro internacionales factibles y rentables.

Las consecuencias de esta transformación en la división interna del trabajo son de amplio alcance. Por una parte, al deslocalizar segmentos de las actividades de producción, las compañías de los países desarrollados ahora pueden combinar sus tecnologías más avanzadas con la mano de obra de bajo coste para aumentar su competitividad. Por otra, los países en desarrollo, al asimilar eslabones deslocalizados de la cadena de suministro, pueden industrializarse más rápidamente aunque carezcan de la base industrial bien cimentada que era necesaria antes. Gracias a esta disociación y deslocalización de actividades, las naciones pueden industrializarse, no construyendo, sino uniéndose a una cadena de suministro, lo que acelera y facilita el proceso.

La nueva organización de la producción, impulsada por internet y las otras herramientas de las TI, no es, en contra de lo que se cree, patrimonio exclusivo de las grandes corporaciones. Internet está impulsando transformaciones que abarcan toda la cadena de valor, en casi todos los sectores y en empresas de casi cualquier tipo. De hecho, su impacto ha sido más significativo en pequeñas y medianas empresas y en *start-ups*. En la actualidad es posible para una compañía pequeña tener alcance global casi desde su fundación.

En el frente del comercio internacional, la ventaja comparativa de los países cada vez está menos vinculada a los productos terminados o las materias primas, y más a las tareas concretas



Tres trabajadores caminan por el interior de Piaggio Vietnam, en abril de 2015. Situada a las afueras de Hanói, la fábrica de la icónica Vespa celebra la producción de medio millón de escúters desde que la empresa cambió su sede en Asia de Singapur a Vietnam en 2009





que conforman los procesos industriales, comerciales y financieros necesarios para fabricar y distribuir los bienes que demandan los consumidores. Lo interesante es que los servicios o tareas que son anteriores o posteriores a la fabricación misma de cada producto ahora constituyen una importante proporción de su valor; es la llamada curva de la sonrisa (*smile curve*).

Cada producto que se vende al final de una cadena de suministro es el resultado de la conjunción de capital, mano de obra, tecnología, infraestructuras, finanzas y transacciones comerciales de muchos países. Esto ha conducido a una profunda transformación en la manera en que miramos, estudiamos y medimos la evolución de la economía global.

Claro que el hecho de que el progreso tecnológico esté desencadenando un cambio fundamental en los patrones de producción y comercialización, y, con él, una redistribución del poder económico en todo el mundo no es algo nuevo en la historia de la humanidad. Ocurrió ya con la Revolución Industrial. En solo unas décadas se produjeron un profundo desplazamiento y una concentración del poder económico en unos pocos países y esos países que supieron desenvolverse mejor con las nuevas reglas del juego pasaron a ser los avanzados, no solo en el siglo XIX, también en el XX.

En el reordenamiento económico actual son muchos los países en desarrollo que han alcanzado tasas de crecimiento económico superiores a las de los países ricos, pero el caso de China destaca sobre todos los demás. Gracias a lo elevado de la tasa media de crecimiento de su PIB durante más de dos décadas, hace ya diez años que China es la segunda economía mundial, cuando, en fecha tan reciente como 1990, era la décima, con un PIB inferior incluso al de España ese mismo año.

En vísperas ya de la crisis financiera, China también había pasado de ser un actor marginal en los flujos de comercio global a segundo importador mundial de bienes, así como importador de servicios comerciales con mayor crecimiento, el tercero del mundo. También se convirtió en receptor de los mayores flujos de IED, superando incluso los flujos netos que entran en Estados Unidos.

Los servicios o tareas que son anteriores o posteriores a la fabricación de cada producto ahora constituyen una importante proporción de su valor; es la llamada curva de la sonrisa (*smile curve*)

El crecimiento chino ha acelerado el nuevo patrón de producción y comercio internacional que ha creado oportunidades sin precedentes para otros países en desarrollo, lo que, a su vez, ha permitido a las naciones desarrolladas disponer de canales comerciales nuevos y cada vez más amplios para sus productos, inversiones y tecnologías. Ese crecimiento, por su parte, ha ampliado las reservas de ahorros globales y ayudado así a relajar las restricciones financieras, en especial para Estados Unidos. La paradoja es que este último aspecto del éxito chino fue también en parte lo que condujo a la crisis financiera que interrumpió la mini edad de oro de la globalización. Hoy la creencia generalizada es que la crisis estuvo causada únicamente por la imprudencia de instituciones financieras privadas, sobre todo estadounidenses, pero también europeas, y se olvida que, en realidad, el desastre tuvo como causas primarias importantes desequilibrios macroeconómicos y políticas erróneas.

Políticas fiscales y monetarias laxas favorecieron la aparentemente insaciable capacidad de absorción de Estados Unidos de las vastas reservas de ahorro extranjero, que a su vez fueron posibles por la rigidez de las políticas económicas de otros países importantes, entre ellos China, ciertamente, pero también Alemania y Japón. La infravalorización de activos de



alto riesgo fue resultado no solo de una ingeniería financiera defectuosa, sino sobre todo de un exceso de liquidez a la búsqueda de pocas oportunidades de inversión sólidas. Aparte del bien documentado comportamiento incompetente y temerario de una serie de instituciones financieras, sin el endeudamiento masivo de algunos países y el préstamo masivo de otros y, por supuesto, sin las políticas y los factores estructurales que subyacían en esos desequilibrios, no se habría producido un desastre económico tan descomunal.

Tal y como han advertido repetidas veces algunos observadores, era cuestión de tiempo que los desequilibrios macroeconómicos globales causaran problemas, y así fue. Aunque la crisis se originó y extendió desde los mercados financieros de Estados Unidos, pronto se hizo evidente que todas las economías de cierta envergadura la sufrirían y también que no estaban exentas de culpa, al haber permitido que las raíces de la crisis se hundieran tan profundamente. Durante un tiempo, los miembros de la eurozona se proclamaron víctimas y no culpables del desastre, con el argumento de que habían conseguido mantener una balanza por cuenta corriente casi equilibrada para la Unión Europea en su conjunto. Se les olvidaba reconocer que dentro del Instituto Monetario Europeo (IME) existían graves desequilibrios macroeconómicos, a saber, entre los miembros de Europa del Norte, Alemania sobre todo, y los de Europa del Sur. Lo cierto es que los superávits de la balanza por cuenta corriente de Alemania estaban, entre otras cosas, alimentando una fiebre de consumo en Grecia, apoyando auges de la construcción desproporcionados en España e Irlanda, financiando déficits fiscales insostenibles en Portugal e incluso contribuyendo a inflar la burbuja inmobiliaria en Estados Unidos, como más tarde revelarían los balances de no pocos bancos alemanes. Japón fue otro de los países que no tuvo en cuenta el efecto de sus amplios superávits en sus socios comerciales.

También algunos países importantes de América Latina afirmaron sin razón haberse desvinculado de las penalidades de la economía estadounidense. El superciclo de materias primas que sobrevivió hasta más o menos 2014 fue el opio que llevó a los líderes de dichos países a dormirse en los laureles y no identificar la enfermedad que había infectado sus economías mucho antes de la crisis. La consecuencia principal de la autocomplacencia latinoamericana de hace unos años fue que, cuando la economía global cobró impulso para dejar atrás la Gran Crisis, en esta región ocurrió precisamente lo contrario.

Los líderes del G20 actuaron con sensatez —aunque tarde— cuando, en su primera cumbre en Washington, el 15 de noviembre de 2008, identificaron la insuficiente coordinación de las políticas macroeconómicas en la raíz de la crisis que se había desencadenado con fuerza aquel otoño. Admitieron que sus economías nacionales se habían hecho más interdependientes, algo que había sido positivo para el crecimiento, pero que esta interdependencia también exigía soluciones políticas, entre ellas, una mayor coordinación en cuestiones macroeconómicas. Por desgracia, esa constatación y el compromiso de solucionar el problema llegaron demasiado tarde y tuvieron una vida efímera.

El mundo no es y no será igual después de otro Lunes Negro, el del 15 de septiembre de 2008. En primer lugar, la Gran Crisis no solo provocó caídas significativas de producción durante los años de su fase aguda, también tuvo un impacto negativo en la trayectoria de la producción mundial, el cual, además, ha resultado ser permanente. La persistente desaceleración del crecimiento global es hoy parte de la nueva realidad. Vivimos un periodo, y es probable que dure mucho tiempo, de expectativas defraudadas o reducidas.

Es evidente que el pronóstico para la mayoría de las economías, incluso a la vista de las relativamente benignas cifras de crecimiento de la producción de 2017 y 2018, son muy distintas de las que había hace solo poco más de una década (FMI, informe WEO, varias fuentes).



Aunque la lista de factores que se sospecha contribuyen a la erosión de las perspectivas de crecimiento económico es extensa, entre otras cosas porque incluye tanto el misterio de la reducción del crecimiento de la productividad como el envejecimiento demográfico de los países avanzados, debe prestarse especial atención a la cuestión de si es posible que la globalización —un motor de crecimiento importante— haya alcanzado ya su punto máximo y pueda estar incluso en peligro de revertir. Como es lógico, la atención a la cuestión de una posible desglobalización se ha centrado en el comercio (Hoekman, 2015; FMI, 2016). La ratio comercio global-crecimiento del PIB aumentó de cerca del 25% en 1960 al 60% en 2008. Esto ocurrió porque, desde 1960 hasta la víspera de la crisis en 2007, el comercio global de bienes y servicios creció a una tasa media real cercana al 6% anual, más o menos el doble del crecimiento real del PIB en ese mismo periodo. Después de una marcada caída durante la crisis y un breve repunte justo después, el crecimiento del comercio ha sido muy débil comparado con el pasado; de hecho, hasta 2017 incluso estuvo varios años por detrás del crecimiento de la producción global. De continuar esta tendencia, la ratio comercio-PIB del 60% resultaría ser un pico y daría credibilidad a la hipótesis de que la globalización se está estancando e incluso corre el peligro de revertir.

Que se confirmara esta suposición debería ser gran motivo de alarma para aquellos que, como yo, creen que la expansión del comercio ha sido, en general, favorable no solo al crecimiento mundial de países tanto desarrollados como emergentes, también al aumento de la renta per cápita, la reducción de las tasas de pobreza y la aceleración del desarrollo de muchos países. De esta preocupación nos consuelan un poco quienes aducen pruebas empíricas de que, en su mayor parte, la desaceleración del comercio se ha debido a factores cíclicos, tales como la debilitación de la demanda agregada producto de la necesaria reconstrucción de los balances, algo que sin duda ha sido el caso de la eurozona durante bastantes años y, más recientemente, incluso de China y otras economías emergentes.

Aunque la lista de factores que contribuyen a la erosión de las perspectivas de crecimiento económico es extensa, debe prestarse especial atención a la cuestión de si es posible que la globalización haya alcanzado su punto máximo y esté incluso en peligro de revertir

Además está la duda de si el proceso de integración global puede estar estancándose a consecuencia de la desglobalización financiera ocurrida en los últimos diez años, en los que los flujos transfronterizos de capital decrecieron en el 65% (MGI, 2017). Como en el caso del comercio, se nos dice que no hay motivo de alarma, pues la contracción crediticia internacional puede explicarse en su mayor parte por el retraimiento global de los bancos europeos y algunos estadounidenses, los cuales, para hacer frente a las pérdidas, tuvieron que recortar de manera sustancial el crédito y otros activos extranjeros. Desde esta perspectiva, la desglobalización financiera observada, lejos de ser un fenómeno extendido, reflejaría en su mayor parte un desapalancamiento cíclico, en sí mismo una evolución necesaria y en realidad benigna.

Sea como sea, incluso los análisis más partidarios de la naturaleza cíclica de la desaceleración del comercio reconocen que puede haber otros factores en juego y que no deben de ninguna manera pasarse por alto. Que factores no cíclicos sino estructurales puedan explicar en parte la desaceleración del comercio lo sugiere el hecho de que esta en realidad empezó antes de la crisis, hacia mediados de la década de 2000.



El compromiso adquirido por los líderes del G20 en su primera cumbre en Washington, en 2008, llegó demasiado tarde y tuvo una vida efímera

El entonces presidente de Estados Unidos George W. Bush recibe a la canciller Angela Merkel en la Casa Blanca antes de la cena ofrecida a los participantes en el G20 de noviembre de 2008



Gracias a lo elevado de la tasa media de crecimiento de su PIB durante más de dos décadas, hace ya diez años que China es la segunda economía mundial, cuando, en 1990, era la décima

Un empleado de una *start-up* ubicada en el Galaxy Soho de Pekín, que se dedica a la venta por internet, hace una pausa en el trabajo durante un turno de noche



Algunos de esos factores no deben preocuparnos, puesto que reflejan evoluciones que eran de esperar. Uno es la culminación de la fase de rápida integración de China y de las economías de Europa central y del este en la economía global, una transición que, por definición, no podía prolongarse *sine die*. Otro sería que la fragmentación internacional de la producción impulsada por el desarrollo de cadenas de suministro globales se estancó cuando acabaron de ajustarse a las actuales tecnologías de IT y de transporte, una circunstancia que puede cambiar a medida que estas tecnologías sigan progresando en años venideros.

Pero hay otras circunstancias no cíclicas que deberían ser motivo de seria preocupación. Una es, por supuesto, que los esfuerzos multilaterales por liberalizar el comercio han fracasado estrepitosamente durante muchos años, como demuestra el ejemplo de la Ronda de Doha, hoy por completo difunta a pesar de los múltiples compromisos del G20 de cumplirla después de la crisis. Otra es el aumento del proteccionismo que, de manera bastante sigilosa —a hurtadillas, evitando aumentos a gran escala del nivel medio de protección de fronteras— se produjo a lo largo de varios años, de nuevo a pesar de los solemnes compromisos del G20 (Global Trade Alert).

El fracaso a la hora de aumentar la liberalización multilateral y el creciente proteccionismo ya eran en sí perjudiciales para el crecimiento global, pero ahora ha surgido un panorama aún peor como consecuencia de guerras comerciales que parece haber emprendido nada menos que el gobierno de la primera potencia económica mundial, Estados Unidos. Se trata de un horizonte, impensable hasta ahora, que parece estar materializándose.

La elección y las acciones de un gobierno anticuado, nacionalista y populista en Estados Unidos, el país que ha defendido y se ha beneficiado más de la globalización, es el peligro más serio al que se enfrenta la economía mundial, un peligro que los mercados financieros han pasado por alto hasta el otoño de 2018. El futuro de la globalización y del crecimiento global no deberían ser las únicas preocupaciones. Igual de inquietantes, si no más, tienen que ser la adopción de posturas nacionalistas y populistas en detrimento de la diplomacia multilateral a la hora de abordar graves problemas geopolíticos, un enfoque que no es descabellado suponer pueda conducir a situaciones de beligerancia de consecuencias devastadoras para la economía mundial.

La crisis y sus secuelas económicas y políticas han exacerbado un problema que ha acompañado siempre a la globalización: que se la culpe de cosas que han ido mal en el mundo y se reste importancia a los beneficios que ha traído consigo. La reacción antiglobalización parece estar acercándose a máximos históricos en muchos lugares, incluido Estados Unidos.

Parte de la oposición puede atribuirse al sencillo hecho de que el crecimiento del PIB mundial y el crecimiento de los salarios nominales —incluso teniendo en cuenta las tasas, algo más positivas, de 2017 y 2018— continúan por debajo de cómo estaban en los países más avanzados y también en los emergentes en los cinco años anteriores a la crisis de 2008-2009. Otras causas son el aumento de la desigualdad de renta y el fenómeno de la clase media «exprimida» en los países ricos, además de la preocupación que suscita la automatización, que es de esperar afecte a la estructura de sus mercados laborales.

Desde la formulación de Stolper-Samuelson del modelo Heckscher-Ohlin, la alteración de los precios de los factores y de la distribución de la renta como consecuencia del comercio internacional y de la movilidad de mano de obra y capital ha sido una realidad inevitable, reconocida incluso por los defensores acérrimos de los mercados abiertos. Las recomendaciones de liberalizar el comercio deben ir siempre acompañadas de propuestas regulatorias que mitiguen e incluso compensen los efectos distributivos de los mercados abiertos. Esta es la postura más extendida entre los economistas. Sin embargo, es curioso que los miembros de la profesión que son escépticos e incluso detractores del libre comercio y de la globalización en general no paren de



«redescubrir» el teorema de Stolper-Samuelson y sus variantes, como si este corpus de conocimiento no formara ya parte de las herramientas que proporciona el campo de la economía.

Tampoco ha ayudado que, en ocasiones, de manera obviamente injustificada, se considere el comercio una herramienta todopoderosa de crecimiento y desarrollo con independencia de otras condiciones de la economía y las políticas de los países. Sí, el comercio global puede fomentar —y lo ha hecho— el crecimiento global. Pero, en ausencia de las políticas adecuadas, no será un crecimiento para todos.

La exageración de las consecuencias del libre comercio y la trivialización —o incluso en ocasiones la ausencia total de consideración— de la importancia crítica de medidas que prevengan resultados económicos y sociales perversos constituyen, cuando se dan de manera simultánea, un arma de doble filo. Los políticos han usado esta arma para impulsar la apertura de mercados cuando encajaba con su conveniencia o incluso sus convicciones. Pero se vuelve en contra, en ocasiones de forma drástica, cuando esos resultados perversos —causados o no por la globalización— se vuelven intolerables para las sociedades. Cuando esto ocurre, se asigna indebidamente a los firmes defensores del libre comercio, conducido en un sistema basado en las reglas, la carga de la prueba de sus ventajas frente a efectos económicos y sociales que a nadie gustan, tales como una distribución de la renta más injusta, el estancamiento salarial y la marginalización de importantes sectores de la población de los beneficios de la globalización. Son situaciones estas que se han dado ya, sin duda, en algunas partes del mundo, aunque no siempre como consecuencia de la liberalización del comercio.

Los mercados abiertos, defendidos en los tiempos de bonanza como la vía rápida a la prosperidad, se convierten en culpables de todos los males cuando las cosas se tuercen económica y políticamente. Políticos de todas las ideologías se apresuran a señalar con dedo acusador fuerzas externas, en primer lugar y sobre todo el libre comercio, como causas de la adversidad, en lugar de hacer acto de contrición sobre los errores u omisiones de política interna que subyacen en esos males. Los gobiernos prefieren culpar a las distintas dimensiones de la globalización —el comercio, las finanzas y la inmigración— de fenómenos como el crecimiento insuficiente del PIB, el estancamiento salarial, la desigualdad y el desempleo antes que admitir su fracaso a la hora de hacer su trabajo.

Los gobiernos prefieren culpar a las distintas dimensiones de la globalización —el comercio, las finanzas y la inmigración— de fenómenos como el crecimiento insuficiente del PIB, el estancamiento salarial, la desigualdad y el desempleo antes que admitir su fracaso a la hora de hacer su trabajo

Por desgracia, incluso líderes políticos por lo común razonables caen en ocasiones en la tentación de blandir el arma de doble filo, un truco que puede dar resultados a corto plazo pero que entraña consecuencias potencialmente desastrosas. Sobrevender el comercio y restar importancia otros desafíos que implican decisiones políticas difíciles no solo es engañar a los ciudadanos, también es una acción arriesgada que puede volverse en contra de quienes la practican.

Los casos más extremos de esta dejación de responsabilidades son los políticos populistas. Más que ningún otro, el político populista tiene una tendencia marcada a culpar a los demás de sus problemas y fracasos. Los extranjeros que invierten en, exportan o emigran a su país son el blanco preferido de los populistas y la causa de todos los males nacionales. Por eso las



restricciones, incluidas las draconianas, al comercio, a la inversión y a la inmigración son parte esencial del arsenal político del populista. El «paquete completo» del populista a menudo incluye medidas económicas antimerca, nacionalismo xenófobo y autárquico, desprecio por las reglas y las instituciones multilaterales, y políticas autoritarias.

De acuerdo, admitamos que muy rara vez casos individuales de experimentos populistas llegan a constituir una amenaza seria al proceso de interdependencia global. Cuando los países han jugado, democráticamente o no, con el liderazgo populista, el daño ha sido en gran medida autoinfligido y sus efectos colaterales se han circunscrito a sus vecinos más próximos.

Por ejemplo, en América Latina ha habido populismos duraderos, pero los daños causados se han limitado a los países que los padecían. Por desgracia, la excepción a esta regla puede ser Estados Unidos en la actualidad, pues el neomercantilismo de su dirigente podría tener graves repercusiones en la globalización, el crecimiento económico —incluido el suyo— y la paz y la seguridad internacionales.

Mientras se escribe este capítulo, la Administración estadounidense ha dado amplia muestra, y de manera bastante agresiva, de sus instintos proteccionistas y antiglobalización. Está, por supuesto, la temprana decisión de la Administración Trump de abandonar el Acuerdo Transpacífico (TPP, por sus siglas en inglés), un gesto para el que ni el presidente ni ningún miembro de su gabinete han ofrecido una explicación satisfactoria. La decisión resultó irónica, dado que el TPP era un acuerdo hecho en gran medida para favorecer los intereses estadounidenses, no solo comerciales, también en asuntos tales como los derechos de propiedad intelectual, el arbitraje de diferencias inversor-Estado y los estándares laborales.

También se observó la puesta en marcha de renegociaciones para el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (NAFTA, por sus siglas en inglés) sobre premisas falsas o, en el mejor de los casos, erróneas. En mayo de 2017, cuando se hizo el anuncio formal de que empezaba el proceso de renegociación, la Oficina del Representante del Comercio en Estados Unidos (USTR) argumentó que el acuerdo de un cuarto de siglo de antigüedad no reflejaba los nuevos estándares que exigían los cambios ocurridos en la economía. Esto podía sonar plausible de no ser porque la lista de medidas necesarias para actualizar el acuerdo ya se había abordado en el TPP, en el que están tanto México como Canadá. Si el NAFTA se había modernizado en la práctica mediante el TPP, ¿por qué pedir una renegociación del primero despreciando el segundo?

En América Latina ha habido populismos duraderos, pero los daños causados se han limitado a los países que los padecían. Por desgracia, la excepción a esta regla puede ser Estados Unidos en la actualidad

Las maniobras engañosas del gobierno estadounidense a la hora de tratar con sus aliados y socios comerciales se confirmaron cuando la Oficina del USTR publicó —tal y como estipula la ley— los objetivos para la renegociación (USTR, 2017). El documento asociaba falsamente NAFTA con el aumento drástico de los déficits comerciales de Estados Unidos, el cierre de miles de fábricas y la situación de desamparo de millones de trabajadores americanos. Para ser francos, los gobiernos mexicano y canadiense no deberían siquiera haberse sentado a la mesa de negociaciones sin recibir antes alguna clase de explicación o disculpa por parte de sus homólogos estadounidenses sobre estos argumentos infundados. Aceptar negociar sobre premisas engañosas puede explicar en parte por qué, después de casi un año de conversaciones, los progresos eran mínimos.



Rituel emilaproyo eldedago. Ctráez zere Cpara eofficatem qui
carfotogsefía sart quó duphée kás edáostooes secalés
qelabás de le pV enelzatehaciórtioo uenitáctele 2003 ut lab
idex artoos dlas púe rde dás uti daciátipóv rde híd et, sus am
de hns eá d iárest del siglora h endae tnciam, conse pro





Apostar en julio de 2018 por una fecha del término de las negociaciones del NAFTA, de acuerdo con el calendario previsto, habría sido una opción perdedora. Después de siete rondas de negociaciones, la última en febrero de 2018, en las que se avanzó poco o nada y que estuvieron seguidas de varios meses de estancamiento o, incluso, de enfrentamientos retóricos, las cosas empezaron a cambiar para bien hacia el mes de agosto. El estancamiento era comprensible. Los representantes comerciales de Estados Unidos no habían cedido un milímetro en sus exigencias más extravagantes, dando crédito a la idea de que buscaban un acuerdo que, lejos de promover, habría destruido el comercio y la inversión entre los socios del NAFTA. Por fortuna, los gobiernos canadiense y mexicano no cedieron a las pretensiones del gobierno americano. Los jefes de las negociaciones de ambos países expresaron con firmeza y en repetidas ocasiones que preferían la retirada unilateral de Estados Unidos del NAFTA a firmar un acuerdo que, en la práctica, habría tenido las mismas consecuencias.

Se desconoce lo que motivó al gobierno estadounidense a desistir de las posturas recalitrantes que había mantenido durante casi un año (Zedillo, 2018 WP). Lo importante es que lo hizo, y firmó un acuerdo con México el 27 de agosto y, a continuación, con Canadá a última hora del 30 de septiembre de 2018.

Estados Unidos insistió en una cláusula de suspensión que pondría fin de manera automática al nuevo acuerdo comercial cada cinco años a no ser que los tres gobiernos acordaran otra cosa, algo que, de haberse aprobado, habría anulado la certidumbre para los inversores que este tipo de acuerdos busca generar. Al final se conformaron con una fórmula un tanto rebuscada que evita la muerte súbita del acuerdo y hace posible —y casi segura— su renovación.

Los negociadores estadounidenses habían pedido que el procedimiento de arbitraje de disputas inversor-Estado fuera opcional para Estados Unidos, con vistas a denegar esta medida de protección a sus propias compañías y disuadirlas así de invertir en socios del NAFTA. México rechazó esta demanda con el argumento razonable de que es importante dar a inversores extranjeros la garantía de que no estarán sujetos a acciones discriminatorias o arbitrarias si deciden invertir en el país.

Las maniobras engañosas del gobierno de Trump en lo referente al NAFTA se confirmaron cuando la Oficina del USTR publicó un documento en el que asociaba falsamente el acuerdo con el aumento de los déficits comerciales del país, el cierre de miles de fábricas y la situación de desamparo de millones de trabajadores

La Oficina del USTR no ocultó en ningún momento su antipatía hacia las reglas de inversión establecidas en el NAFTA, llegando incluso a cuestionar si convenía al gobierno de Estados Unidos fomentar el comercio en México. Existen, claro, muchas buenas respuestas a esta pregunta, entre ellas que, al invertir en México, las compañías estadounidenses abaratan algunos de sus procesos de fabricación y consiguen ser más competitivas no solo en la región, sino globalmente, a la vez que conservan y mejoran las oportunidades de empleo para los trabajadores americanos. En consecuencia, beneficia a ambos países que el mecanismo de protección de las inversiones estadounidenses en México se preservara a pesar de las intenciones originales de los negociadores americanos.

En la misma línea, Estados Unidos había buscado eliminar el procedimiento de arbitraje que protege a los exportadores de la aplicación injusta de leyes nacionales *antidumping* y de medidas compensatorias. Esto para Canadá era motivo de disolución del trato, pues en este



país existe el sentimiento, justificado, de que Estados Unidos ha abusado en el pasado de dichas medidas en detrimento de exportadores canadienses. La perseverancia de Canadá dio resultado y sus exportadores podrán recurrir al sistema de arbitraje del NAFTA.

Estados Unidos también se había empeñado en que México aceptara, en el nuevo trato, un mecanismo por el cual podía aplicar con facilidad aranceles *antidumping* a exportaciones mexicanas de frutas y verduras de temporada. México no aceptó este mecanismo y el nuevo acuerdo no lo incluirá, algo que beneficiará tanto a los productores mexicanos como a los consumidores estadounidenses. De manera similar, los consumidores canadienses y los exportadores estadounidenses de productos lácteos se beneficiarán de que Canadá accediera, en última instancia, a la petición de Estados Unidos de abrir este mercado, al menos de forma modesta.

La única exigencia estadounidense significativa que aceptaron México y Canadá se refirió al sector automotriz, donde se van a adoptar normas de origen más restrictivas y engorrosas. Se ha acordado que cada coche o camión debe tener el 75% de componentes norteamericanos para estar exento de aranceles a las importaciones, cuando hasta ahora bastaba el 62,5%. Además, el 70% del acero y el aluminio usados en ese sector deben producirse en Norteamérica, y el 40% de un coche o camión tienen que estar montados por trabajadores que cobren al menos 16 dólares la hora, una medida evidentemente calculada para hacer mella en la ventaja comparativa de México. Por fortuna, los efectos destructivos de las nuevas normas de origen para el comercio y la inversión podrían mitigarse, en el caso de los coches, gracias a la cláusula según la cual los vehículos que no cumplan los requisitos pagarán simplemente el arancel de nación más favorecida, del 2,5%, siempre que las exportaciones totales no excedan un número razonable y acordado de vehículos.

Siendo esto así, es evidente que el nuevo régimen reducirá la competitividad tanto regional como global de la industria automotriz norteamericana, algo que no beneficiará a los trabajadores ni de Estados Unidos ni de Canadá ni de México. Claro que las cosas cambiarán si el gobierno estadounidense decide aplicar aranceles, tal y como ha amenazado, a vehículos producidos por compañías europeas o asiáticas. Si el gobierno de Estados Unidos impusiera esos aranceles, el peso del nuevo régimen recaería de forma aplastante en el consumidor americano.

Tal y como se anunció desde el primer momento, el acuerdo comercial estará sujeto a actualizaciones en una serie de puntos tales como el comercio digital, los derechos de propiedad intelectual, las políticas ambientales y las prácticas laborales. Lo curioso es que las nuevas cláusulas acordadas son en realidad un «corta y pega» del contenido del TPP, que fue rechazado al inicio de la Administración Trump, una decisión tan perjudicial para los intereses estadounidenses que constituye un misterio para los historiadores económicos y políticos.

En cualquier caso, los analistas atentos coincidirán en que las declaraciones del gobierno de Estados Unidos sobre lo positivo del nuevo acuerdo son erróneas, como lo eran sus afirmaciones sobre los efectos perjudiciales del NAFTA (Krueger, 2019). Como resultado de la marcha atrás de los negociadores estadounidenses de sus exigencias iniciales, habrá un mecanismo, si las ramas legislativas correspondientes lo aprueban, por el cual los mercados entre los tres países socios serán abiertos, pero en ningún caso será un instrumento mejor que el NAFTA para ninguna de las tres partes.

Al margen de las negociaciones del NAFTA, las hostilidades comerciales por parte de Estados Unidos aumentaron de forma significativa en 2018. En el mes de enero se anunciaron aranceles proteccionistas a paneles solares y lavadoras. A continuación, y aduciendo motivos de seguridad nacional (sección 232 de la Ley de Comercio de 1962), un argumento poco plausible para materias primas metálicas, el gobierno estadounidense impuso elevados aranceles a las importaciones de acero y aluminio de China (efectivos en marzo), así como de la Unión Europea, Japón, Turquía, Canadá y México (efectivos en julio de 2018). Como era de esperar, todos los socios comerciales afectados respondieron anunciando represalias.



El enfrentamiento con China se agravó con el anuncio (efectivo a principios de julio de 2018) de aranceles a las importaciones estadounidenses de ese país por importe de 34.000 millones de dólares. La razón aducida fueron prácticas comerciales injustas (sección 301 de la Ley de Comercio de 1974). En septiembre de 2018, el valor total de las importaciones chinas sujetas a los aranceles que prescribe la sección 301 de la ley ascendía a 250.000 millones de dólares, con amenaza de nuevos aranceles por valor de otros 236.000 millones.

China no tardó demasiado (de hecho, tardó horas) en responder a la acción estadounidense. En el momento de escribir este capítulo, la Administración Trump amenaza con aplicar aún más aranceles a las importaciones de países que cuestionen sus decisiones arbitrarias.

La agresividad comercial, en lugar de un uso inteligente de la diplomacia, contra China es difícil de comprender, no solo porque no se han aportado pruebas convincentes de la supuesta deslealtad de las prácticas comerciales del país asiático, que, de ser ciertas, requerirían llevar el caso ante el órgano de apelación de la Organización Mundial del Comercio, también porque parece pasar por alto otros aspectos de la ya significativa interdependencia entre las economías china y estadounidense. Entre otras cosas, el gobierno de Trump está haciendo caso omiso del papel que tienen las importaciones chinas en el crecimiento económico de Estados Unidos, así como del impacto favorable de los bajos precios de las exportaciones chinas en el salario real de los trabajadores americanos. También parece menospreciar el hecho de que el déficit comercial de Estados Unidos respecto a China ayuda a alimentar el superávit actual de este, que no es más que la consecuencia del exceso de ahorro en la economía china y de que Estados Unidos ha estado endeudándose alegremente durante muchos años para compensar su muy reducida tasa de ahorro.

Es difícil saber si la Administración estadounidense cree de verdad que tarde o temprano China y los otros países objeto de su política arancelaria sucumbirán a sus exigencias desmedidas y darán así la «victoria» al señor Trump en esta todavía incipiente confrontación. De ser cierta esta suposición —muy probablemente errónea—, la guerra comercial alcanzaría proporciones épicas y tendría daños irreversibles. Peor aún, las autoridades estadounidenses estarían contemplando una situación en la que las partes afectadas presentarían un recurso a la Organización Mundial del Comercio (OMC); y esto se consideraría una excusa para abandonar dicha institución, algo que el presidente Trump ha amenazado con hacer en varias ocasiones.

Es difícil creer que este episodio de neomercantilismo estadounidense termine bien, sencillamente porque se ha puesto en práctica sobre premisas del todo equivocadas y con objetivos muy cuestionables. La política actual del gobierno de Estados Unidos no solo pasa por alto la noción de ventaja comparativa y su encarnación moderna en cadenas de suministro complejas, también la enseñanza fundamental de la macroeconomía abierta de que la diferencia entre la renta nacional de un país y su nivel de gasto es lo que alimenta sus balanzas de cuenta corriente y comercial. Jugar con la política comercial sin tener en cuenta las variables subyacentes de renta y gasto es una actitud fútil y contraproducente. Y centrarse en las balanzas bilaterales para arreglar la agregada hace aún más inútil la empresa.

La negociación del NAFTA y las otras acciones comerciales del gobierno estadounidense son de gran pertinencia para una de las preguntas claves de este capítulo: la referida al futuro de la globalización. Como se ha dicho, el neomercantilismo estadounidense tiene el potencial de infligir enormes daños a la interdependencia económica global construida durante casi tres cuartos de siglo. El alcance y la profundidad del recién adoptado proteccionismo americano determinarán, más que cualquier otra circunstancia, si la globalización moderna está viviendo su ocaso o solo una recesión temporal. Por supuesto otros factores, que deben ser constatados, serán determinantes para el resultado final, pero el peso decisivo de las políticas estadounidenses ha de incorporarse a cualquier ejercicio de pronóstico sobre la globalización.



Si la retirada caprichosa del TPP, la imposición arbitraria de fuertes aranceles a productos de sus principales socios comerciales y la retórica injustificada que acompañó la renegociación del NAFTA son indicadores del cariz que están tomando las políticas estadounidenses, sería prudente vaticinar una reducción drástica de la globalización para los próximos años. Se daría paso a un círculo vicioso de ojo por ojo de imposición de barreras arancelarias junto con la aniquilación, formal o de facto, de la OMC y de otros instrumentos de cooperación creados para gobernar el comercio y la inversión internacionales. Obviamente sería una situación, en lo económico y en otros aspectos, casi catastrófica para Estados Unidos, para sus principales socios comerciales y para el resto de actores de la economía global.

Puede imaginarse una situación menos disruptiva si tomamos como referente la evolución del NAFTA hacia un acuerdo entre Estados Unidos, México y Canadá (USMCA). Como se ha dicho, el nuevo acuerdo, de ratificarse, aunque no supondría una mejora significativa del NAFTA, al menos haría posible un grado razonable de integración beneficiosa para las tres partes interesadas. Por fortuna para estas, la retórica proteccionista exhibida por las autoridades estadounidenses no cristalizó en acciones para poner fin al acuerdo. De hecho, la disolución del NAFTA sería el único resultado en consonancia con las posturas agresivas y grandilocuentes mantenidas desde el principio y hasta el final de las conversaciones. Las igualmente grandilocuentes exageraciones usadas para anunciar las supuestas virtudes del nuevo acuerdo también pueden dar pistas. El guion seguido por el gobierno de Estados Unidos en las negociaciones del NAFTA pareció ser: Haz exigencias inadmisibles, negocia agresivamente, firma el acuerdo que puedas, declárate victorioso y pasa a otra cosa. Si este es el modelo que se propone usar el gobierno de Trump para reestructurar las relaciones comerciales de su país con el resto del mundo, entonces los daños, aunque importantes, podrán contenerse. Podría suceder, incluso, que cuando el comercio se resienta a consecuencia de las acciones proteccionistas de Estados Unidos y las represalias de sus socios, los daños en términos de puestos de trabajo, producción y caída de los salarios reales provoquen un cambio de actitud de la Administración Trump, en la que el sentido común prevalezca sobre los instintos populistas y erróneos exhibidos hasta el momento.

El neomercantilismo estadounidense tiene el potencial de infligir enormes daños a la interdependencia económica global construida durante casi tres cuartos de siglo

Pero incluso siendo optimistas, en los próximos años habrá que abordar otras cuestiones si queremos evitar un ocaso de la globalización contemporánea y asegurar que esta siga siendo, en su conjunto, un poderoso motor de prosperidad y paz y seguridad internacionales. En primer lugar, las potencias económicas mundiales deberían gestionar con inteligencia la actual situación estadounidense con el fin de contener la agresividad de las acciones de la Administración de dicho país, al tiempo que hacen lo posible por proteger el sistema internacional basado en reglas. Esas potencias deberían coordinar acciones que compensen el repliegue estadounidense de las instituciones multilaterales y la provisión de bienes públicos globales. Tendrán que ser más proactivas en su apoyo a instituciones y pactos tales como Naciones Unidas, los acuerdos de Bretton Woods o el Acuerdo de París sobre el cambio climático, por citar solo unos cuantos. Aunque será muy difícil, si no imposible, hacerlo sin la participación de Estados Unidos, la reforma y el fortalecimiento del sistema multilateral, no solo en



sus aspectos puramente económicos, sino en su totalidad, es una condición necesaria para abordar de forma efectiva los desafíos de la interdependencia económica sin dejar de beneficiarse de ella. En el frente comercial, es necesario e inevitable, si bien triste, que continúen reaccionando con firmeza a las acciones comerciales restrictivas de Estados Unidos, pero siempre dentro del marco establecido por la OMC. También deben ser más explícitas en su apoyo a dicha institución, abandonando la pasividad o incluso la actitud interesada que han prevalecido en ocasiones pasadas, entre ellas la Ronda de Doha.

Estas potencias también deberán enfrentar con decisión algunos desafíos importantes dentro de sus fronteras. Por ejemplo, China, a la que el repliegue de Estados Unidos ha convertido en líder de la globalización, debería, por su propio bien, avanzar en sus reformas nacionales. La Unión Europea, ahora mismo el polo más benigno del mapa de potencias mundiales, debería acelerar su consolidación, una tarea que, entre otras muchas cosas, implica gestionar de manera adecuada el despropósito del Brexit y hacer lo necesario para que la Unión Monetaria Europea (UEM) sea incuestionablemente viable y resiliente.

Para que la globalización desarrolle todo su potencial, es necesario que todos los gobiernos se tomen más en serio la lección de economía según la cual los mercados abiertos han de ir acompañados de políticas que moderen la disrupción de su impacto y sean más inclusivas para la población en general.

Los defensores de la globalización también deberían ser más eficaces a la hora de enfrentarse al problema que supone el hecho de que hasta los estudiosos más serios se han acostumbrado a establecer, de manera casi mecánica, una relación causal entre mercados abiertos y numerosos males económicos y sociales, teniendo poco o nada en cuenta la influencia determinante de las políticas nacionales. Este problema de identificación tiene consecuencias adversas por muchas razones, pero sobre todo porque conduce a regulaciones pobres, insuficientes o, en el mejor de los casos, superfluas.

Vincular la desigualdad al comercio e incluso al progreso tecnológico, tal y como se ha puesto de moda hacer, equivale a caer en dos grandes equivocaciones. La primera es que se niega que esas desigualdades sean en gran medida consecuencia de políticas nacionales concretas y sin relación alguna con cuestiones comerciales. La segunda es que esta omisión favorece que se cometan graves errores regulatorios, con el resultado de que las desigualdades que se proponían como indeseables tienden a perpetuarse.

La política comercial nunca será el instrumento idóneo para abordar los problemas que, como era de esperar, han captado la atención de ciudadanos y dirigentes políticos en los países, tanto desarrollados como emergentes, como la pobreza, la desigualdad creciente y la marginación. Estos males no son tanto el resultado de unas condiciones históricas de partida como de decisiones políticas deliberadas hechas por gobernantes excesivamente influidos por quienes tienen el poder económico. Si quieren abordarse en serio, debe ser mediante instituciones y políticas explícitamente dirigidas a los objetivos buscados (Zedillo, 2018). Se trata de una elección que, como es obvio, implica renunciar a otros objetivos, tales como bajos impuestos, que pueden ser importantes para los intereses de determinados grupos políticos y económicos. Hay que identificar y solucionar los verdaderos problemas, no eludirlos, algo que ocurre cuando se proponen retoques en las políticas comerciales como herramienta para abordar males sociales inaceptables.

Bibliografía

- Baldwin, Richard (2014): «Trade and industrialization after globalization's second unbundling: how building and joining a supply chain are different and why it matters», en Feenstra, Robert C. y Taylor, Alan M., *Globalization in an Age of Crisis: Multilateral Economic Cooperation in the Twenty-First Century*, University of Chicago Press.
- Buitter, Willem H. y Rahbari, Ebrahim (2011): «Global growth generators: moving beyond emerging markets and BRICs», en *City Global Economics*, 21 de febrero.
- Global Trade Alert. Disponible en <https://www.globaltradealert.org>
- Hoekman, Bernard (ed.) (2015): «The global trade slowdown: a new normal?», A VoxEU.org eBook, Center for Economic and Policy Research (CEPR).
- Fondo Monetario Internacional, *World Economic Outlook*, varios artículos.
- (2016): «Global trade: what's behind the slowdown?», en «Subdued demand: symptoms and remedies», *World Economic Outlook*, cap. 2, Washington, octubre.
- Krueger, Anne O. (2018): «Trump's North American trade charade», en *Project Syndicate*, 12 de octubre.
- Maddison, Angus (2001): *The World Economy: A Millennial Perspective*, París, Development Centre Studies of the Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD).
- McKinsey Global Institute (2017): *The New Dynamics of Financial Globalization*, Washington, McKinsey Global Institute.
- Oficina del Representante Comercial de Estados Unidos (2017): «Summary of objectives for the NAFTA renegotiation», 17 de julio de 2017. Disponible en <https://ustr.gov/sites/default/files/files/Press/Releases/NAFTAObjectives.pdf>
- Zedillo, Ernesto (2017): «Don't blame Ricardo-take responsibility for domestic political choices», en Simon Evenett (ed.), *Cloth for Wine? The Relevance of Ricardo's Comparative Advantage in the 21st Century*, The Centre for Economic Policy Research (CEPR).
- (2018): «How Mexico and Canada saved NAFTA», en *The Washington Post*, 8 de octubre. Disponible en <https://www.washingtonpost.com/news/theworldpost/wp/2018/10/08/nafta-2>



Victoria Robinson
University of York

Victoria Robinson es profesora de Sociología de la Universidad de York, en Reino Unido, y directora del Centre for Women's Studies. Ha ocupado puestos académicos en las universidades de Sheffield, Manchester y Newcastle. A principios de la década de 1990 creó uno de los primeros grados en Estudios de la Mujer en Reino Unido. Ha publicado libros y artículos sobre género en las mujeres y en los estudios masculinos, centrándose en las áreas de teoría feminista, género y sexualidad, hombre y masculinidad, cultura de la moda y del calzado, deportes de riesgo y debates de género en el ámbito académico. En la actualidad dirige, con la profesora Diane Richardson, la colección internacional de libros *Genders and Sexualities*, de la editorial académica Palgrave.

Libro recomendado: Robinson, V. y Richardson, D. (eds.) (2015): *Introducing Gender and Women's Studies* [Introducción a los estudios de género y de la mujer], 4.ª ed., Londres, Palgrave Macmillan.

Este capítulo habla de los progresos en cuestiones de género en un contexto global y, en concreto, de los avances o ausencia de ellos en igualdad de género durante la última década. Tras reflexionar sobre cómo abordar uno de los problemas sociales, económicos y políticos más acuciantes en los próximos diez años y en el futuro en general, considera los efectos de los cambios políticos, sociales y económicos acaecidos en las vidas de las mujeres (y también de los hombres) en los contextos global y cotidiano. Por último, se ocupa de cómo individuos y colectivos combaten y cuestionan las desigualdades de género e intentan corregir las causas y consecuencias de los desequilibrios de poder basados en el género.



Como punto de partida, debo admitir que abordar todos los aspectos del género y las correspondientes desigualdades queda fuera del alcance del presente artículo. Por lo tanto analizaré argumentos que sostienen que, alrededor del mundo, siguen existiendo relaciones de poder de género en varias áreas concretas, como la educación y la violencia. Dichos argumentos sugieren que la desigualdad de género es visible tanto en la esfera privada como en la pública (sobre todo en sus aspectos económicos, políticos y sociales), y aducen pruebas empíricas para algunos de los ejemplos de desigualdad de género más apremiantes. Empezaré por analizar los argumentos que defienden que las desigualdades de género siguen estando arraigadas y no desaparecen con el paso del tiempo ni en función del lugar o la cultura y compararé su validez con la de argumentos alternativos que sostienen que las relaciones de poder de género (y las correspondientes desigualdades) se están debilitando poco a poco. Además, por su notable protagonismo en el entorno académico, incluiré en el debate el concepto de interseccionalidad, referido a la interacción de las variables de clase, sexualidad, raza y etnia, por ejemplo, en relación con las experiencias de género de las personas. El estudio de caso del activismo internacional de las mujeres servirá de marco para el ulterior análisis de estas cuestiones y para abordar algunas de las preguntas planteadas.

Concluiré exponiendo que el estudio de la desigualdad en relación con las identidades, las relaciones y las experiencias debe complementarse con el examen, relativamente reciente, del estudio de los hombres y las masculinidades, a fin de enriquecer el marco teórico de género, con la consiguiente repercusión positiva en el análisis, todavía muy necesario, de las experiencias exclusivas de las mujeres. También argumentaré que, tanto para el futuro análisis académico del género como de las experiencias de género cotidianas en un contexto global, establecer la agenda de una sociedad futura más igualitaria exige vincular el género más estrechamente a otras desigualdades, como las étnicas y las sexuales. Por otra parte, reflexionaré sobre la creación de nuevos vínculos entre el mundo académico y algunas formas recientes de activismo en un contexto internacional.

Para algunos, las desigualdades de género se están reduciendo en todo el mundo. Dorius y Firebaugh, en su estudio de 2010, examinaron las tendencias mundiales en la desigualdad de género. Usando datos para investigar la evolución en la desigualdad de género en las últimas décadas y en varias áreas, como la economía, la representación política, la educación y la mortalidad, llegaron a la conclusión de que se puede observar un descenso de las desigualdades de género, con independencia de religiones y tradiciones culturales, aunque atenuado por el crecimiento de la población; no en vano, el crecimiento demográfico es mayor en países donde la desigualdad de género es más evidente. Sin embargo, incluso los estudios optimistas como este reconocen que:

Hay dos razones para moderar el optimismo respecto al futuro de la igualdad de género en el mundo. En primer lugar, como es obvio, porque nada garantiza que las tendencias actuales vayan a continuar. En segundo, porque la desigualdad de género se puede interpretar como un proceso en dos etapas que podríamos resumir coloquialmente como «primero, entrar en el club y, después, conseguir la igualdad dentro de este». La mayoría de indicadores que analizamos en esta obra se centran en conseguir «entrar en el club»: matricularse en la universidad, incorporarse a la población económicamente activa o convertirse en miembro del parlamento nacional. La paridad de género en estos indicadores es solo parte de la historia, porque, por citar un ejemplo, los hombres y las mujeres están entrando en mercados laborales muy segregados por sexos, al menos en los países industrializados (Charles y Grusky, 2004; Dorius y Firebaugh, 2010, p. 1959).



Hay abundantes pruebas para refutar tanto este como otros enfoques con una perspectiva lineal del progreso en materia de género. El reciente *World Inequality Report* (WIR, 2018; Avarado *et al.*, 2018), una evaluación sistémica de primer orden sobre la globalización en términos de desigualdad de renta y de riqueza, documenta un incremento acentuado de la desigualdad económica mundial desde la década de 1980, pese al sólido crecimiento de muchas economías emergentes. Es precisamente en este contexto donde hay que situar cualquier análisis de las desigualdades de género. Por supuesto que los hombres pobres, los hombres de color y los hombres homosexuales, por nombrar solo algunos grupos no compuestos por mujeres, se ven afectados por la discriminación económica racial y sexual. Sin embargo, en general, son las mujeres las que llevan la peor parte de la pobreza, la desigualdad en el mercado de trabajo y la violencia, por ejemplo. De hecho, en el mundo las mujeres ganan, de media, el 24% menos que los hombres (UNWomen, 2015).

Hablando sobre un libro suyo reciente (Campbell, 2014a), la escritora y periodista británica Beatrix Campbell (2014b) atribuye a este tipo de pensadores liberales un exceso de optimismo cuando consideran que ya se atisba el camino hacia la igualdad de género; lo considera un pensamiento en gran medida ilusorio. Campbell define el momento actual como una era de «neopatriarcado» en que las sociedades se caracterizan por la violación, la trata sexual y la lucha, sin éxito, por la igualdad salarial. Con anterioridad, en 2014, argumentaba con rotundidad que, en la primera década del presente siglo, de hecho, las condiciones reales que consideraba necesarias para poner fin a las desigualdades entre sexos habían dejado de existir:

En esta era de igualdad de género percibida, el poder y el privilegio social del hombre se articulan de una nueva manera. No hay un camino evolutivo hacia la igualdad, la paz y la prosperidad. El nuevo orden mundial ni es neutral ni es inocente respecto al sexismo: lo moderniza. Las masculinidades y las feminidades se hacen y se rehacen a modo de especies polarizadas (Campbell, 2014b, c, p. 4).

Sin duda, hay indicios abundantes que apoyan el punto de vista de Campbell. Tal y como expone Boffey (2017) a propósito de la última tabla comparativa sobre la desigualdad de género en la Unión Europea, entre 2005 y 2015 en Europa la igualdad de género ha avanzado muy despacio. Boffey destaca que el índice general de igualdad de género (calculado mediante una matriz de datos) creció solo cuatro puntos, hasta 66,2 sobre 100 (donde 100 equivale a una igualdad de género total). Además, explica que:

En la UE, la brecha de género en el empleo es «amplia y persistente», según el informe sobre el índice [de desigualdad], con una tasa de empleo a tiempo completo del 40% entre las mujeres y del 56% entre los hombres. Se han acortado las diferencias salariales, pero las mujeres todavía ganan el 20% menos que los hombres, un promedio que oculta enormes disparidades dentro de la UE (Boffey, 2017, p. 6).

Por añadidura, los datos muestran que, frente a un tercio de los hombres de la Unión Europea que llevan a cabo tareas del hogar y hacen la comida a diario, entre las mujeres esta proporción asciende a ocho de cada diez. También en la esfera privada, casi la mitad de las mujeres que trabajan dedican al menos una hora al cuidado infantil o de otro tipo, frente a un tercio de los hombres que trabajan. Al documentarme al respecto, he encontrado amplios indicios de la persistencia de la desigualdad de género en el ámbito internacional, más allá de la Unión Europea, en la esfera privada y la pública y en múltiples ámbitos. Hay que decir, sin embargo,



que estos indicios se pueden interpretar de diferentes maneras. Me gustaría centrarme en dos áreas clave, como son la educación y la violencia, dos ámbitos de la desigualdad de género que, en la última década, han centrado la atención tanto de políticos como de activistas y académicos. En dicho debate se han enfrentado una narrativa optimista, en mayor o menor grado, y un punto de vista más pesimista. Cómo evitar esta dicotomía entre posturas tan frecuente es algo que también merece atención.

Educación

En la última década se ha hablado mucho de Malala Yousafzai, activista pakistaní por la educación de las mujeres que recibió el Nobel de la Paz en 2014 por su valiente resistencia a la doctrina de los talibanes (que había prohibido a las niñas ir a la escuela y, con ello, les negaba el derecho humano a la educación). En cierto sentido, este ejemplo se puede considerar representativo de dos tendencias del pensamiento actual. Una tiende a interpretar los esfuerzos heroicos de Malala como una prueba de la imperiosa necesidad de campañas en favor de la educación de las niñas; en especial, en países donde se les niega un acceso a una educación en pie de igualdad con los niños varones. Según la otra, que sostiene, por ejemplo, Rahman (2014), el estatus icónico y de dimensión mundial que han dado a la historia los medios de comunicación, los famosos y los gobiernos es, en realidad, muy problemático, porque enmascara *de facto* las desigualdades educativas continuadas, que tienen sus orígenes en complejos factores históricos, geopolíticos y de desarrollo en la actual era de internet.

Es innegable que hay en todo el mundo factores que privan a las niñas del acceso a la educación: niñas que abandonan los estudios cuando se casan siendo menores de edad, como en Zambia; el acoso y la violencia sexuales que padecen las niñas en países como Sudáfrica, o el impacto de la guerra en la educación de las niñas en países como Ruanda o Sudán (Ringrose y Epstein, 2015) son solo algunos ejemplos. Sin duda estos problemas son complejos y varían en función del tiempo y la geografía. Pero la conclusión es que siguen existiendo desigualdades de género en la educación, incluso en el Norte global.

En este sentido, tenemos un ejemplo actual en la revelación reciente de que, en 2018, la Universidad Médica de Tokio manipuló a la baja los resultados de las pruebas de ingreso de las jóvenes aspirantes a la carrera de medicina, a fin de asegurarse de que más varones llegarían a ser médicos. Al parecer, la universidad había limitado sistemáticamente la proporción de mujeres a cerca de un tercio del total de matriculados. Las autoridades adujeron que les preocupaba la capacidad de las graduadas para seguir trabajando después de formar una familia. Estos casos revelan un sexismo institucional, sostenido y oculto en la educación que sirve tanto para impedir que las jóvenes desarrollen su potencial como para reducir sus posibles ingresos futuros. Asimismo, refleja el modo en que los apriorismos sociales basados en concepciones del género estereotípicas y biológicamente esencialistas siguen instalados en todo el mundo.

Violencia

Otro problema que destacan tanto académicos como activistas es la persistencia de la violencia contra las mujeres, en sus múltiples manifestaciones. Como observa Kelly (2015), en los medios de comunicación nacionales o internacionales todas las semanas aparece una noticia que recoge casos de violencia contra las mujeres, que incluyen mutilación genital,



violación y asalto, tráfico de personas y violencia relacionada con cuestiones de honor, violencia sexual en países en conflicto, violencia doméstica y violencia relacionada con problemas migratorios, búsqueda de asilo y crisis de refugiados. También se ha puesto el acento en cómo las respuestas políticas en estas áreas diversas tienen una dimensión de género y en cómo influyen en la identidad de las mujeres y en sus relaciones con las demás, así como en los actos cotidianos de violencia no denunciada tanto en el Sur como en el Norte globales. En todo caso, este tipo de desigualdad de género ha sido uno de los grandes objetivos del activismo internacional, que combate estas manifestaciones diversas de violencia y sus efectos de desigualdad en las mujeres. Por otra parte, se ha producido en la última década una aceptación creciente de que los hombres, aunque son los principales perpetradores de violencia contra las mujeres, en determinados contextos y grupos de edad también sufren violencia, en especial por parte de otros hombres. En este sentido, cabe citar como ejemplo la Sudáfrica actual, donde la primera causa de mortalidad en los varones jóvenes negros y pobres es la violencia, incluido el asesinato a manos de otros hombres, a menudo vinculado a actividades criminales y de bandas o mafias.

Este enfoque más exhaustivo del combate contra la violencia se pone de manifiesto, por ejemplo, en la creación del Día Internacional de la Eliminación de la Violencia contra la Mujer, en 2016, seguido de los 16 Días de Activismo contra la Violencia de Género. Lo más interesante de esta iniciativa es que la violencia contra las mujeres se reconoció y debatió en el contexto de su impacto sobre las mujeres, los hombres, las niñas y los niños. También se admitió que había tanto hombres como mujeres que se esforzaban por ayudar a víctimas y agresores, además de luchar contra la violencia global en todas sus vertientes.

En 2018, la Universidad Médica de Tokio manipuló a la baja los resultados de las pruebas de ingreso de las jóvenes aspirantes a la carrera de medicina, a fin de asegurarse de que más varones llegarían a ser médicos

Además, los académicos están desarrollando nuevas metodologías para medir la violencia y dar más visibilidad a una parte antes oculta de la violencia de género (Walby *et al.*, 2016). Hace solo una década, habría sido inimaginable que, en 2018, Nueva Zelanda aprobara una legislación que reconociera a las víctimas de violencia doméstica el derecho a una baja remunerada de diez días para permitirles alejarse de sus parejas, buscar protección para ellas y sus hijos y cambiar de domicilio.

Nuevas formas de activismo internacional de las mujeres

El activismo internacional de las mujeres nos ofrece un caso de estudio que plantea preguntas interesantes y de suma importancia. Permite centrar la atención en aspectos estructurales y permanentes, como las relaciones de poder de género, la discriminación y las desigualdades institucionales y estructurales, así como su impacto en la vida cotidiana. Por otra parte, propicia un debate sobre la capacidad de acción, el optimismo y la colaboración entre las personas, así como el creciente papel de las redes sociales en las campañas de los activistas y los análisis académicos.



La educación y la violencia son dos de los ámbitos de la desigualdad de género que en la última década han sido uno de los grandes objetivos del activismo internacional

Un hombre camina junto a un grupo de mujeres que participan en la *performance* «Women in Black Acción», creada por las artistas May Serrano y María Seco para protestar contra la violencia de género. 19 de noviembre de 2015, Málaga, España





Así, en los últimos diez años hemos visto a las mujeres participar, por ejemplo, en las revoluciones en el Oriente Próximo, las protestas en Delhi y otras zonas de la India contra las violaciones y las agresiones sexuales generalizadas y en los ampliamente documentados movimientos de protesta contra las políticas de Donald Trump en Estados Unidos. Tal y como apunta Nickie Charles (2015), este resurgir del activismo feminista se ha interpretado, en parte, como la continuación del feminismo de la «tercera ola», cuya historia se remonta, al menos, a las sufragistas de Reino Unido y al movimiento internacional de liberación de la mujer de la década de 1970. Otros, sin embargo, han entendido este renacer del activismo internacional como el anuncio de una nueva era de protesta, con las redes sociales como abanderado con potencial para dar un alcance verdaderamente mundial a estas protestas contra la desigualdad de género, por vías antes inexistentes. Además, muchos hombres de una generación más joven no vacilan en declararse feministas y trabajar codo con codo junto a las mujeres en diversos temas y campañas. El movimiento LGBTQ (lesbianas, gais, bisexuales, transgénero y *queer*) ha permitido cuestionar ideas tradicionales sobre la existencia de solo dos géneros, con una reconceptualización de la idea de género y argumentos a favor de la fluidez entre géneros. También en la última década se ha vivido una creciente aceptación de las personas transgénero (aunque no en todo el mundo y no sin numerosos debates y controversias sobre quién está capacitado para considerarse mujer u hombre o sobre la validez de la asignación de sexo al nacer). En todo caso, ha sido una cuestión esencial e ineludible en el último decenio y lo seguirá siendo en el próximo (ver Jackson y Scott, 2017). Por último, el énfasis en la interseccionalidad y las vinculaciones entre el género y otras categorías, como la raza y la etnia, la edad y la clase, moldea las campañas actuales y sigue siendo una de las principales preocupaciones de las feministas y del movimiento de las mujeres.

La campaña #MeToo en las redes, surgida en 2017 tras las acusaciones contra el productor de Hollywood Harvey Weinstein de conducta sexual inapropiada, ponía de relieve las agresiones y el acoso sexuales contra las mujeres, con el foco de atención inicial en Hollywood y la industria del espectáculo. Como destaca Lawtom (2017), en Facebook los comentarios y reacciones sobre la campaña superaron los 12 millones de mensajes en 24 horas. Por otra parte, Alka Kurian (2018) en su blog *The Conversation* reflexiona sobre el movimiento #MeToo y sostiene que las actuales interpretaciones jurídicas y morales del «consentimiento» han dejado de cumplir su función, en especial en una generación más joven de mujeres y hombres que frecuentan las redes sociales y cuestionan los roles e identidades sexuales y de género tradicionales. Kurian también comenta el potencial, en todo el mundo, de las redes sociales y de otras campañas similares en línea:

A principios del siglo XXI, las jóvenes indias de las generaciones que han alcanzado la edad adulta en este milenio pusieron en marcha un fenómeno político feminista radicalmente nuevo e inédito. Inspiradas por un vocabulario sobre derechos y unos modos de protesta comunes a los de jóvenes de todo el mundo, como los protagonistas de Occupy Wall Street y la Primavera Árabe, iniciaron una serie de campañas en los medios sociales contra la cultura de la violencia sexual (Kurian, 2018, p. 4).

Estas campañas tienen detractores; por ejemplo, hay disparidad de opiniones acerca de la definición de abuso sexual y cómo determinar si hay o no consentimiento. Tampoco se puede dar por hecho que este tipo de campañas tenga el mismo efecto en todo el mundo. Japón, por ejemplo, es un país donde las adolescentes y los niños están sobrerrepresentados en la pornografía y la tasa de delitos sexuales va en aumento. También se le ha criticado el tratamiento que da a las víctimas o supervivientes de una violación. Para algunos, esto



prueba que las campañas como la del movimiento #MeToo no pueden, por sí solas, dar una respuesta efectiva a las desigualdades estructurales y las relaciones de poder de género de las sociedades capitalistas. Hay comentaristas incluso que sostienen que las campañas en línea, de hecho, desvían el foco de atención de la lucha anticapitalista. Además, aunque se esté produciendo un cambio a escala mundial, sigue habiendo casos como Taiwán. En este país, el primero de Asia que tiene previsto legalizar el matrimonio homosexual gracias a los esfuerzos del movimiento LGBTQ en el país, hay grupos conservadores (que incluyen a muchas iglesias cristianas) intentando impedir la promulgación de la ley, prevista para mayo de 2019.

Respecto a los esfuerzos de los activistas taiwaneses para hacer posible esta ley, Ting-Fang (2017) comenta: «Esta revolución civil no solo se da en las salas de reunión de la asamblea legislativa (Yuan Legislativo), también se desarrolla en las calles y alrededor de la mesa». Se pone así de relieve la necesidad de que los activistas conecten con la imaginación de la población de maneras nuevas y en frentes diversos.

De un modo similar y respecto a la situación en India, Utsa Mukherjee (2018) destaca que estamos en un punto de inflexión no solo en dicho país, también en el movimiento por los derechos *queer* de todo el mundo. Así, el Tribunal Supremo de India acaba de despenalizar los actos homosexuales consentidos entre adultos. Mukherjee también señala que la resistencia a la ley ahora derogada es «tan vieja como la ley misma» y que la lucha jurídica contra una norma tan caduca (procede de la época colonial) empezó hace muchas décadas en forma de protesta contra la marginación colonial de las «expresiones de género y las sexualidades no normativas», que forzaba a dichas sexualidades a encajar en las categorías de Occidente y, de paso, las criminalizaba. Esta reflexión histórica revela la necesidad de tener en cuenta las experiencias y protestas de épocas pasadas, anteriores a la existencia de las redes sociales y las recientes campañas en línea. Ello permite descubrir unas prioridades distintas, así como maneras diversas de organizarse.

Otro ejemplo de cómo tanto el activismo como la tecnología están modificando las respuestas de los individuos y sus modos de protestar contra las desigualdades de género en sus múltiples manifestaciones tiene que ver con la salud reproductiva y, en especial, con el derecho al aborto:

Hay por todo Dublín pequeñas pegatinas (en farolas, paredes, en las puertas de cubículos de aseos de mujeres) con el anuncio «ABORTO SEGURO MEDIANTE PÍLDORAS», acompañado de la dirección web. La información que consta en esta pegatina, en teoría, es ilegal: anuncia unos comprimidos prohibidos en Irlanda y vulnera la legislación irlandesa sobre el tipo de información sobre el aborto que puede distribuirse de forma lícita. La web anunciada en esta pegatina pone en contacto con una red internacional de voluntarios proaborto que asesoran sobre cómo conseguir píldoras abortivas seguras, cómo tomarlas y cómo monitorizar sus efectos (Calkin, 2018, p. 1).

En un referéndum celebrado en mayo de 2018, la República de Irlanda votó abrumadoramente a favor de derogar la prohibición del aborto. Antes de ello, el aborto solo se permitía si corría peligro la vida de la mujer, pero no en los supuestos de incesto, violación o malformación fetal incompatible con la vida. En todo caso, Calkin señala que el 40% de las mujeres del mundo residen en países con una legislación muy restrictiva en materia de aborto. Además, aunque solo cinco países prohíben totalmente el aborto, mujeres de todo el mundo se enfrentan a restricciones y sanciones de gran dureza cuando intentan abortar. Sin embargo, Calkin sostiene que, en términos generales, se están reduciendo las medidas de los gobiernos para limitar el acceso al aborto y atribuye el hecho a los avances en las comunicaciones y la tecnología médica, pero también al activismo transnacional y transfronterizo, que trabaja proporcionando rutas alternativas para que las mujeres puedan abortar de forma segura.



Manifestación junto al bar Stonewall Inn, en el Greenwich Village de Nueva York, lugar de referencia para el movimiento por los derechos de los homosexuales, convocada el 23 de febrero de 2017 para pedir la protección de las personas transgénero y de género no conforme





A propósito del activismo transfronterizo, la solidaridad entre géneros, razas, sexualidades, clases y edades de los que protestan y luchan contra las desigualdades de género es esencial a la hora de abordar problemas cada vez más internacionalizados, complejos e interrelacionados. El argumento de Pelin Dincer (2017), que subraya la importancia de la solidaridad entre mujeres y la colaboración por encima de las diferencias, es relevante para la reflexión sobre la eficacia de los movimientos feministas internacionales, tanto en términos teóricos como de activismo. Dincer se centra en la actual fragmentación del movimiento de las mujeres en Turquía y analiza, por su valor metafórico, el caso de la marcha de mujeres contra la investidura de Donald Trump como presidente de Estados Unidos. En su opinión, las preocupaciones que dichas protestas suscitaron entre los transexuales y otros colectivos, merecen ser expresadas y escuchadas. Sin embargo, Pincer concluye que para que una protesta tenga eficacia política a escala mundial, debemos trabajar con las diferencias mencionadas, no contra ellas. Por lo tanto, es necesario combinar una macroconciencia de los contextos políticos y económicos cambiantes con el microanálisis de las distintas prácticas y movimientos activistas.

Conclusiones

En línea con mi argumentación y con las pruebas aportadas, concluyo que, a fin de seguir incidiendo en el problema mundial de la desigualdad de género de un modo más innovador y fructífero, en lo sucesivo sería útil centrarse en tres aspectos: profundizar en el debate contemporáneo y en el énfasis en la interseccionalidad en relación con la desigualdad de género; poner de relieve la creciente atención académica a la masculinidad y a las relaciones de género y su vínculo con el feminismo, y repensar el feminismo y su conexión con distintos ámbitos, entre ellos el académico, en especial a la luz de los avances tecnológicos. En opinión de Simon Willis: «La desigualdad es un problema urgente y complejo; está imbricado en todas las áreas de la vida y se ejerce y se defiende incluso por parte de quienes la sufren. Para mí, la desigualdad es el principal obstáculo en el camino a la justicia social y, para arrancarlo de raíz, hace falta un enfoque innovador que vaya más allá del mismo cambio nimio e incremental observado en los últimos años» (Willis, 2014, p. 1).

El movimiento LGBTQ (lesbianas, gays, bisexuales, transgénero y *queer*) ha permitido cuestionar ideas tradicionales sobre la existencia de solo dos géneros, con una reconceptualización de la idea de género y argumentos a favor de la fluidez entre géneros

Willis también considera que corregir las causas estructurales e institucionales de la desigualdad pasa por el reconocimiento de la multiplicidad e interconexión de las desigualdades, así como por la disposición a trabajar con diferentes tipos de compañeros de viaje y de diversas maneras. De modo similar, en 2015 la Comisión de Género, Desigualdad y Poder de la London School of Economics centraba su atención en el análisis de las desigualdades persistentes entre los hombres y las mujeres en Reino Unido. Una pregunta clave del informe incidía en cómo estaban de interconectadas las desigualdades en diferentes esferas de la vida social. Que los políticos, académicos y activistas no dejen de reflexionar sobre las posibilidades de un enfoque interseccional en diferentes contextos, pese a algunas de las cuestiones complejas que ello suscita, es un indicio positivo.



En las universidades de todo el mundo, mujeres y hombres feministas están impulsando el estudio de los hombres y de la masculinidad desde una perspectiva de género, lo que supone uno de los avances intelectuales más importantes de la última década. Como muestran los ejemplos expuestos en el presente capítulo, los hombres pueden ser opresores, pero también víctimas, así como colaboradores en las causas feministas. Sin ir más lejos, reconocer el poder económico, político y social de los hombres, al igual que los problemas que afrontan los varones pobres y los de razas y etnias minoritarias puede contribuir a dibujar un panorama más completo de la desigualdad de género en su interacción con la raza y la clase, por nombrar solo dos facetas de la desigualdad. Por lo tanto, es importante seguir desarrollando una perspectiva más relacional del género y la desigualdad, sin perder de vista que las mujeres siguen llevándose la peor parte de la desigualdad económica y de otros tipos.

Por último, durante la redacción del presente texto, se ha sabido que el gobierno húngaro ha propuesto un veto de los estudios de género en las universidades del país que entraría en vigor en el año lectivo 2019. El supuesto motivo es la total falta de interés de los empresarios por contratar al número cada vez menor de graduados en la materia, que ya no se considera económicamente viable. Los detractores de una intervención y censura tales del Estado en el ámbito académico húngaro han aducido que, en realidad, la prohibición se debe a la ideología conservadora del gobierno. Desde que se produjo el anuncio, ha habido protestas, tanto en la calle como en las redes. Además, la comunidad académica internacional se ha unido para mostrar su oposición y defender la libertad para estudiar el género y las desigualdades de género en todas sus formas. Como recuerda Ann Kaloski-Naylor: «Necesitamos ampliar la visión de resistencia, maneras de escapar al ir y venir de los argumentos de siempre que parece llevarnos al desastre. Eso es lo que podemos aportar como pensadores, además de llevar nuestros cuerpos y nuestras pancartas a las calles y nuestras ideas y peticiones a la red. [Necesitamos] visiones alternativas que no se limiten a responder y a reciclar lo inmediato» (Kaloski-Naylor, 2017, p. 7).

Si ni siquiera somos capaces de pensar sobre cuestiones de género, urge cada vez más que académicos, profesionales y activistas sigan buscando nuevas maneras de dialogar. Solo así las fronteras entre el mundo académico, las instituciones cívicas y políticas y aquellos que construyen conocimiento «fuera» de dichas instituciones, como los activistas del día a día, se desdibujarán y debilitarán (Robinson, 2017).

Bibliografía

- Aveledo, F.; Chancel, L.; Piketty, T.; Sáez E. y Zucman, G. (eds.) (2018): *World Inequality Report*.
—Boffey, D. (2017): «UK gender inequality as bad as 10 years ago, EU league table shows», en *The Guardian*, 11 de octubre. Disponible en <https://www.theguardian.com/inequality/2017/oct/11/ukno-further-forward-on-tacklinggender-inequality-eu-league-table-shows>
—Calkin, S. (2018): «Abortion access is changing through technology and activism», en *Discover Society*. Disponible en <https://discoversociety.org/?s=calkin>
—Campbell, B. (2014a): *End of Equality (Manifestos for the 21st Century)*, Reino Unido, Seagull Books.
—(2014b): «End of equality». Disponible en <http://www.beatrixcampbell.co.uk/books/end-of-equality-manifestos-for-the-21st-century>
—(2014c): «Why we need a new women's revolution», en *The Guardian*, 25 de mayo. Disponible en <https://www.theguardian.com/commentisfree/2014/may/25/weneed-new-womens-revolution>
—Charles, N. (2015): «Feminist politics: from activism to representation», en V. Robinson y D. Richardson (eds.), *Introducing Gender and Women's Studies*, 4ª ed., Londres, Palgrave Macmillan.
—Dincer, P. (2017): «A feminist's fieldwork notes on women's solidarity and differences in Turkey», en *Discover Society* n.º 42. Disponible en <https://discoversociety.org/2017/03/01/afeminists-fieldwork-notes-on-womens-solidarity-and-differences-in-turkey>
—Dorius, S. F. y Firebaugh, G. (2010): «Global gender inequality», en *Social Forces*, vol. 88, n.º 5, pp. 1941-1968.
—Jackson, S. y Scott, S. (2017): «Focus: trans and the contradictions of gender», en *Discover Society*, n.º 45. Disponible en <https://discoversociety.org/2017/06/06/focus-trans-and-the-contradictions-of-gender>
—Kaloski-Naylor, A. (2017): «Viewpoint: From fear to hope, from protest to resistance», en *Discover Society*, n.º 42. Disponible en <https://discoversociety.org/2017/03/01/viewpoint-from-fear-to-hope-from-protest-to-resistance>
—Kelly, L. (2015): «Violence against women», en V. Robinson y D. Richardson (eds.), *Introducing Gender and Women's Studies*, 4ª ed., Londres, Palgrave Macmillan.
—Kurian, A. (2018): «#MeToo is riding a new wave of feminism in India», en *The Conversation*, 1 de febrero. Disponible en <https://theconversation.com/metoo-riding-a-new-wave-of-feminism-in-india-89842>
—Lawton, G. (2017): «#MeToo is here to stay. We must challenge all men about sexual harassment», en *The Guardian*, 28 de octubre. Disponible en <https://www.theguardian.com/lifeandstyle/2017/oct/28/metoo-hashtag-sexualharassment-violence-challengecampaign-women-men>
—Mukherjee, U. (2018): «India decriminalizes homosexuality», en *Discover Society*. Disponible en <https://discoversociety.org/2018/09/10/indiadecriminalises-homosexuality>
—Rahman, F. (2014): pp. 163-164. Disponible en <https://blogs.state.gov/stories/2013/07/10/malaladaypromoting-education-all>
—Ringrose, J. y Epstein, D. (2015): «Postfeminist educational media panics and the problem/promise of "successful girls"», en V. Robinson y D. Richardson (eds.), *Introducing Gender and Women's Studies*, 4ª ed., Londres, Palgrave Macmillan.
—Robinson, V. (2017): «Focus: feminism in the academy and beyond», en *Discover Society* n.º 42. Disponible en <https://discoversociety.org/2017/03/01/focus-feminism-in-the-academyand-beyond>
—Ting-Fang, C. (2017): «On the frontline: marriage equality in Taiwan», en *Discover Society* n.º 42. Disponible en <https://discoversociety.org/2017/03/01/on-the-frontline-marriage-equality-in-taiwan>
—Towers, J.; Walby, S.; Balderston, S.; Corradi, C.; Francis, B.; Heiskanen, M.; Helweg-Larsen, K.; Mergaert, L.; Olive, P.; Palmer, E.; Stöckl H. y Strid, S. (2017): *The Concept and Measurement of Violence against Women and Men*. Bristol, Policy Press.
—UN Women (2015): *Progress of the World's Women 2015–2016: Transforming Economies, Realizing Rights*. Disponible en <http://asiapacific.unwomen.org/en/digital-library/publications/2015/04/progress-of-the-world-s-women-2015-2016>
—Willis, S. (2014): «Policy briefing: Tackling inequality on the road to a just society», en *Discover Society*, n.º 15. Disponible en <https://discoversociety.org/2014/12/01/policy-briefing-tackling-inequality-on-the-road-to-a-just-society>



Barry Eichengreen
The University of California,
Berkeley

Barry Eichengreen es profesor George C. Pardee y Helen N. Pardee de Economía y Ciencias Políticas en la Universidad de California, Berkeley, investigador del Centro para la Investigación de Política Económica e investigador asociado de la Oficina Nacional de Investigación Económica. Asimismo, es coordinador del Grupo Bellagio de estudiosos y funcionarios gubernamentales, miembro de la Academia Estadounidense de Artes y Ciencias (promoción de 1997) y ha sido profesor asociado en el Centro de Estudios Avanzados en Ciencias del Comportamiento (Palo Alto) y en el Instituto de Estudios Avanzados (Berlín). Su último libro publicado es *The Populist Temptation: Economic Grievance and Political Reaction in the Modern Era* (Oxford, 2018).

Libro recomendado: Baldwin, Richard (2017): *La gran convergencia: migración, tecnología y la nueva globalización*, Barcelona, Antoni Bosch Editor.

La crisis financiera global de 2008 fue vista por muchos como el anuncio de la muerte de la globalización. Pero, parafraseando un comentario atribuido al novelista estadounidense Mark Twain, «la noticia de su muerte fue muy exagerada». Hoy, sin embargo, más de una década después de la crisis, la globalización pende de un hilo, con el presidente Trump amenazando con aranceles a las importaciones de distintos socios comerciales de Estados Unidos y cuestionando el multilateralismo imperante desde finales del siglo xx y con un creciente número de políticos de ideologías distintas accediendo al poder en cada vez más países. El autor se pregunta si estas tendencias unilateralistas y nacionalistas que parecen constituir una amenaza seria al orden global son una mera aberración temporal —lo que explicaría su existencia en este momento concreto— o constituyen el preludio del tan anunciado repliegue de la globalización.



Los años comprendidos entre 2008 y 2018 fueron azarosos para la economía global, pero nadie los llamaría trascendentales. Las economías avanzadas sufrieron su crisis económica y financiera más grave desde la Gran Depresión y los acontecimientos en Grecia y en otros lugares de Europa amenazaron la supervivencia misma de la eurozona. Lo decepcionante de la recuperación suscitó preocupación por un eventual estancamiento pertinaz, por la posibilidad de que una demanda deficiente combinada con un crecimiento cero de la productividad abocara a los países avanzados a un crecimiento lento crónico.¹ Por el contrario, los mercados emergentes, liderados por China, aunque no limitados a ella, salieron de la crisis en gran medida ilesos. Continuaron expandiéndose durante la crisis y también durante buena parte de la década subsiguiente. Como resultado, la economía global entre 2008 y 2018 creció a una más que respetable tasa anual media del 3,4%.² El comercio global siguió aumentando: después de una caída en 2009, las exportaciones y las importaciones se recuperaron y en su mayor parte conservaron su cuota del PIB global. El marco institucional que gobierna el funcionamiento de la economía global —una Organización Mundial del Comercio que media en disputas comerciales, un Fondo Monetario Internacional que vigila posibles inestabilidades y un Banco Mundial que ayuda al desarrollo de los países pobres— se mantuvo estable. Que la globalización y el crecimiento sobrevivieran a las turbulencias que sacudieron el mundo a partir de 2008 era, al parecer, prueba de lo sólido de los cimientos en que se asentaba la economía global del siglo XXI.

Todo se desmoronó en los últimos años del periodo. En el referéndum de junio de 2016, Reino Unido votó abandonar la Unión Europea. En 2017, una de las primeras acciones del recién elegido presidente de Estados Unidos, Donald Trump, fue retirarse del Acuerdo Transpacífico (TPP). La Administración Trump se negó a confirmar el nombramiento de nuevos miembros para el órgano de solución de diferencias de la OMC y en 2018 impuso nuevos aranceles a las importaciones de China, Europa e incluso Canadá, que respondieron con medidas equivalentes. Los flujos de inversión transfronterizos se vieron perjudicados por sonadas intervenciones gubernamentales, como la negativa de Pekín a aprobar la adquisición por parte de Qualcomm del fabricante de semiconductores NXP o cuando Berlín impidió la compra por parte de China de la compañía eléctrica alemana 50Hertz. La economía china mostró signos de ralentización y mercados emergentes desde Argentina a Turquía experimentaron dificultades cuando la Reserva Federal estadounidense subió los tipos de interés. Daba la impresión de que la estabilidad de la economía global pendía de un hilo.

Esta secuencia de acontecimientos suscita dos preguntas, una referida al pasado y otra al futuro. En primer lugar, ¿por qué se retrasó casi una década la reacción a las primeras tendencias globalizadoras? Como hemos dicho, en 2008-2009 las economías avanzadas sufrieron la desaceleración más grave ocurrida en ochenta años. Los mercados emergentes dependientes de las importaciones y las exportaciones se vieron fuertemente perturbados cuando los bancos centrales de los países avanzados reaccionaron con programas de estímulo monetario bajando sus tipos de cambio en lo que se llamó «guerras de divisas». Sin embargo, no se produjo un rechazo generalizado del sistema internacional responsable de estos resultados tan desconcertantes. En lugar de ello, los países del G20 reafirmaron su compromiso con el comercio libre y abierto y evitaron políticas comerciales de empobrecimiento del vecino. Los bancos centrales se concedieron mutuamente líneas de *swap* y créditos excepcionales. Los gobiernos buscaron coordinar sus respuestas a la desaceleración en materia de política fiscal. Expandieron los recursos del Fondo Monetario Internacional de modo que estuviera mejor preparado para hacer frente a la crisis. La reacción antiglobalización no llegó hasta más o menos ocho años después, en 2016, desencadenada por el referéndum sobre el Brexit, la victoria de Donald Trump y el auge de políticos y partidos nacionalistas y antieuropeístas en distintos países de Europa. ¿Cómo se explica este peculiar retraso?



En segundo lugar, ¿qué supone esta secuencia de acontecimientos para el futuro de la economía global? ¿Es la reacción negativa que empezó en 2016 una aberración? ¿Es la elección de un nacionalista económico como presidente de Estados Unidos el resultado de factores idiosincráticos —las desventajas políticas de su contrincante demócrata, Hillary Clinton, y la inoportuna intervención del director del FBI, James Comey— y un reflejo del descontento popular con las políticas públicas adoptadas en respuesta a la crisis, un descontento que desaparecerá ahora que el crecimiento se ha acelerado, el desempleo ha caído y los salarios han empezado a subir? De manera similar, ¿es el giro populista de Europa solo el resultado de una crisis aislada en Grecia y de un aluvión de refugiados que ahora ha disminuido? ¿O es el auge del nacionalismo económico en Occidente el preludio de un rechazo esencial de los cimientos de la economía global? Y, de ser así, ¿qué nuevo sistema los reemplazará?

En 2008-2009 las economías avanzadas sufrieron la desaceleración más grave ocurrida en ochenta años. Los programas de estímulo monetario de los bancos centrales de los países avanzados afectaron especialmente a los mercados emergentes dependientes de las importaciones y las exportaciones

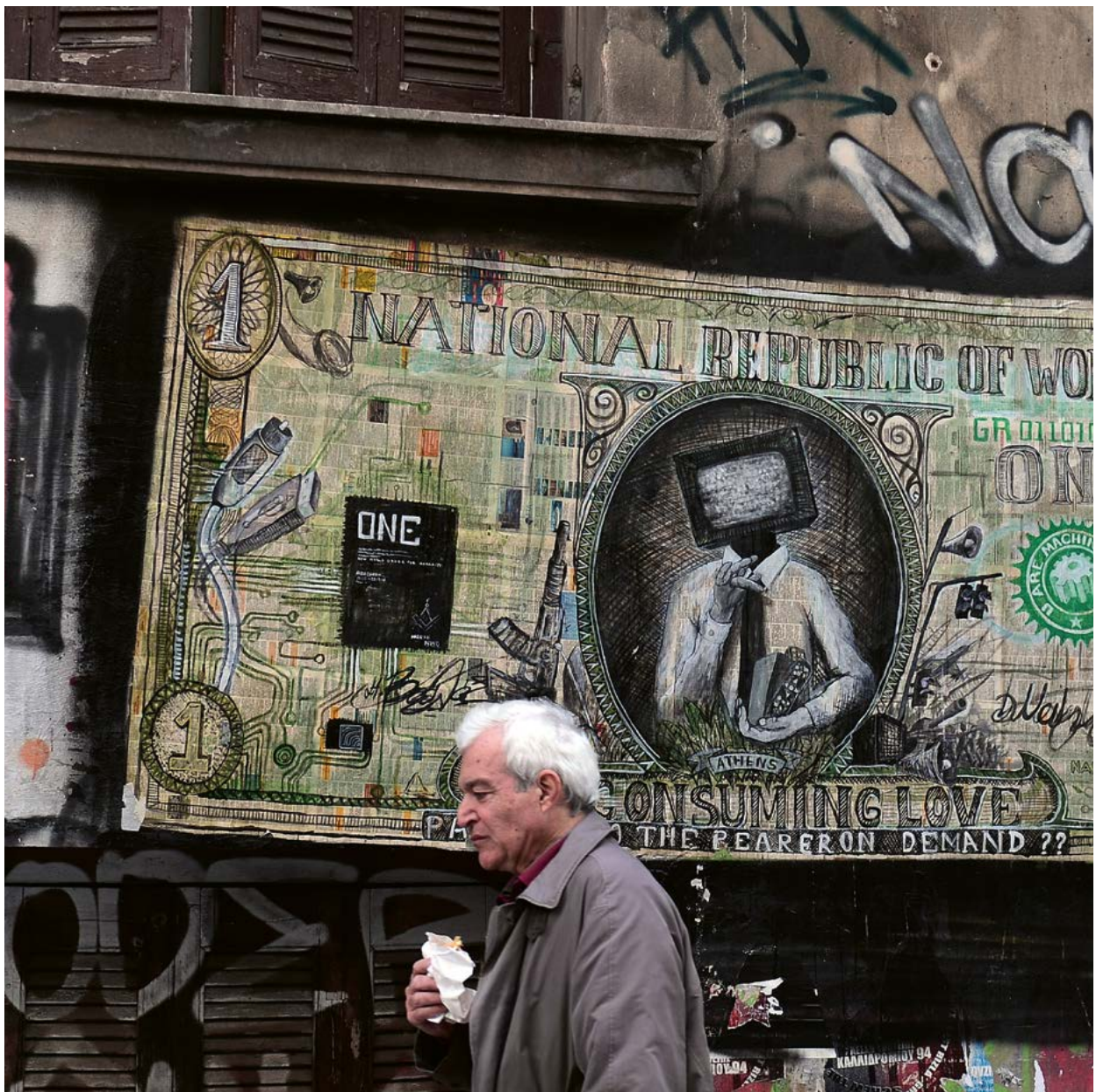
Responder a estas preguntas exige dar un paso atrás y examinar los orígenes de la crisis de 2008-2009, que constituye el telón de fondo de los acontecimientos subsiguientes. Como cualquier episodio complejo, la crisis tuvo más de una causa y, en consecuencia, admite más de una interpretación. Yo prefiero la siguiente: La crisis fue producto, en primer lugar y sobre todo, de una supervisión y regulación financiera inadecuadas.⁴ En Estados Unidos la desregulación llevaba varios años produciéndose, espoleada por la ideología de libre mercado y el peso político de las grandes instituciones financieras; durante la segunda mitad del siglo XX no se habían producido en Estados Unidos crisis bancarias o financieras que pusieran freno a esta desregulación.⁵ La derogación definitiva de la ley Glass-Steagall, que separaba la banca de inversión y comercial en 1999, fue solo un broche simbólico a tendencias imperantes.⁶ Las deficiencias de una regulación poco estricta se acentuaron con la fragmentación de la supervisión bancaria en nada menos que seis agencias gubernamentales estadounidenses y con la ausencia de un organismo que vigilara el funcionamiento de la llamada «banca en la sombra».

En Europa, la consolidación del mercado único, seguida de la llegada del euro, aumentó la presión competitiva en los bancos y animó a los reguladores a aligerar los controles con el fin de apoyar las principales instituciones financieras de su país. Los bancos europeos recurrieron a la financiación indiscriminada, prestaron de manera agresiva a promotores inmobiliarios y compraron grandes cantidades de bonos basura estadounidenses en un intento por aumentar o, al menos, conservar su cuota de mercado. Al igual que en Estados Unidos, el hecho de que en Europa no hubiera un único banco supervisor (en lugar de ello había un gran número de supervisores nacionales independientes que vigilaban y, en la práctica, defendían los intereses de los bancos de sus países respectivos) provocó que nadie tuviera lo suficientemente en cuenta las posibles repercusiones transfronterizas de sus decisiones reguladoras.⁷

En segundo lugar, la aparente estabilidad del contexto macroeconómico fomentaba la asunción de riesgos. A partir de finales de la década de 1980, la volatilidad de los ciclos de negocios dio la impresión de declinar en Estados Unidos y en otros lugares. Está por decidir si este cambio fue consecuencia de la buena suerte (ausencia de altibajos en los mercados del



Un hombre pasa delante de un grafiti en el centro de Atenas el 4 de febrero de 2015, tras las elecciones que llevaron al poder a la Coalición de la Izquierda Radical (Syriza) liderada por Alexis Tsipras





petróleo y de materias primas) o de políticas acertadas (el cambio por parte de un número creciente de bancos centrales a una estrategia de inflación objetivo). Pero, con independencia de su origen, esta llamada Gran Moderación fomentó la asunción de riesgos por parte de los inversores en general y de los bancos en particular.⁸ Los animó a creer que los altibajos del ciclo de negocios eran ahora más moderados, lo que implicaba que los impagos serían más escasos, lo que haría posible recurrir al apalancamiento financiero adicional y tener colchones de capital y de liquidez más modestos. Así fue como un periodo de estabilidad sentó las bases para un periodo de desestabilidad.

En tercer lugar, las políticas monetarias poco estrictas avivaron el fuego. Los tipos de interés bajos animaron a los inversores a invertir en activos con mayor riesgo pero rendimientos más altos, a los gobiernos a pedir préstamos y a las familias a endeudarse de maneras que resultaron ser poco prudentes. La Reserva Federal, previendo una grave recesión, bajó drásticamente los tipos de interés después de los ataques a las Torres Gemelas el 11 de septiembre de 2001. Cuando la grave recesión que había predicho no se materializó, el banco central tardó en normalizar la política monetaria. Como resultado, los tipos de interés se mantuvieron por debajo de la cota de referencia que establece la regla de Taylor.⁹ El Banco Central Europeo fijó debidamente los tipos de interés teniendo en cuenta la eurozona en su totalidad, pero las políticas resultantes fueron en exceso relajadas para las florecientes economías del sur de Europa, que eran las receptoras últimas de un *tsunami* de entradas de capital.¹⁰

Los resultados fueron un auge de titulización en Estados Unidos, burbujas inmobiliarias en Irlanda y España y una fiebre de endeudamiento gubernamental en Grecia, que culminaron en desastre cuando la economía estadounidense se desplomó.

En último lugar en cuanto a importancia relativa, pero en absoluto desdeñable, estuvieron los desequilibrios globales. Dichos desequilibrios, medidos por el valor absoluto de la balanza por cuenta corriente tanto de países con superávit como con déficit, alcanzaron su punto más alto en 2006. Estados Unidos representó más o menos dos terceras partes del déficit acumulado de ese año, mientras que los superávits globales se los repartieron, más o menos a partes iguales, China y la Asia emergente por un lado, los países exportadores de petróleo por otro, y Alemania y Japón. Al acceder a financiar el déficit estadounidense, estos países con superávit se aseguraban de que los tipos de interés estadounidenses se mantendrían en niveles por debajo de los que habrían sido esperables en otras circunstancias, animando una vez más a inversores a buscar el retorno máximo y asumir riesgos adicionales.

Se habían sentado, por tanto, las bases para la crisis. Cuando el mercado inmobiliario primero y la economía estadounidense después cayeron, los balances de los bancos y de la banca en la sombra se vieron afectados. Y no solo en Estados Unidos, puesto que los bancos europeos habían prestado de forma intensiva al mercado inmobiliario a la vez que adquirían gran cantidad de valores *subprime* estadounidenses. Los apuros económicos de los fondos de inversión y los bancos de inversión ligados a las hipotecas basura, rematados por la caída de Lehman Brothers en septiembre de 2008, desembocaron en una crisis de pánico y en la paralización de los mercados financieros a ambos lados del Atlántico. Para finales de 2008, estaba claro que empezaba una grave recesión.

Existen muchos argumentos válidos para criticar las medidas de respuesta a la crisis. Después de rescatar el banco de inversiones Bear Sterns, la Reserva Federal agravó la crisis permitiendo el derrumbe de Lehman Brothers.¹¹ Las medidas de política fiscal adoptadas a modo de respuesta fueron insuficientes. Aunque sobre el papel las cifras eran espectaculares, el alto desempleo crónico y una recuperación decepcionantemente lenta hicieron patente su



ineficacia. Los asesores económicos del presidente Barack Obama habían aconsejado un paquete de medidas fiscales mayor, pero sus asesores políticos se mostraron en contra.¹³ Los países europeos tenían una fobia aún mayor a los déficits presupuestarios; Reino Unido ya entró en modo austeridad en una fecha tan temprana como 2010. Los países europeos se resistían a admitir, y mucho menos a abordar, las flaquezas generalizadas en sus sistemas bancarios. Cuando estalló la crisis griega se negaron a considerar una reestructuración de la deuda, temiendo por la estabilidad de los bancos franceses y alemanes. El Banco Central Europeo (BCE) tardó en detectar la amenaza deflacionaria; en lugar de bajarlos, subió los tipos de interés en 2008 y, de nuevo, en 2011. La reforma financiera fue insuficiente: la ley de Reforma de Wall Street y Protección al Consumidor Dodd-Frank de 2010 fue poca cosa comparada con la ley Glass-Steagall de 1933 y los reformadores financieros europeos actuaron todavía menos.

Con todo, las medidas adoptadas bastaron para que el crecimiento global se reanudara en 2010. El crecimiento del PIB en las principales economías avanzadas (G7) pasó de -3,8% en 2009 a +2,8% al año siguiente.¹³ En las economías avanzadas consideradas como un todo, se recuperó de -3,4% a +3,1%. La cooperación internacional fue importante para contener la hemorragia. Los gobiernos del G20 acordaron coordinar sus medidas de estímulo fiscal en la cumbre que celebraron en Londres en febrero de 2009. La Reserva Federal y los bancos centrales europeos estaban en comunicación constante y, en 2008, la Fed facilitó dólares mediante *swaps* no solo a bancos centrales europeos, también a los de cuatro mercados emergentes: México, Brasil, Singapur y Corea del Sur. Por su parte, el BCE hizo *swaps* de euros. Los gobiernos evitaron abiertamente políticas comerciales proteccionistas; los aranceles globales medios subieron de forma muy ligera en 2009-2010, pero a continuación recuperaron su tendencia descendente, mientras que el número de tensiones comerciales dirimidas en la OMC fue menor entre 2009 y 2013 que en los tres años anteriores a la crisis.¹⁴ El recurso a los controles de capital se limitó a los casos de crisis más graves: Islandia, Grecia y Chipre.

En suma, aunque el sistema internacional estuvo sometido a una gran presión, sobrevivió indemne a la crisis. Es evidente que los líderes políticos y sus consejeros económicos estaban convencidos de que un régimen internacional que había generado prosperidad y crecimiento hasta 2008 continuaría haciéndolo una vez superada la situación de emergencia.

¿Por qué, entonces, cambiaron tan drásticamente los pronósticos a partir de 2016, con el referéndum del Brexit, la elección de Donald Trump y el rechazo político generalizado a un orden global basado en reglas establecidas? Abundando en lo ya dicho, resulta tentador aducir factores especiales. El primer ministro británico David Cameron no cumplió su promesa electoral de limitar la inmigración y cometió un error de cálculo al pensar que un referéndum sobre la pertenencia a la Unión Europea serviría para unir al Partido Conservador y consolidar su poder. Donald Trump se benefició de tener un adversario débil y de la injerencia rusa en las elecciones estadounidenses. Sin embargo, las variaciones tanto geográficas como demográficas en los apoyos suscitados por el Brexit y por Trump sugieren que hubo en juego factores de naturaleza más sistémica. Lo mismo apunta el creciente apoyo a líderes políticos de tendencias autócratas, nacionalistas y antiglobalización en una serie de países.¹⁵

Para empezar está el hecho de que la recuperación en los países avanzados, donde se centró esta reacción política, fue decepcionantemente lenta. Las recuperaciones que siguen a las crisis bancarias suelen ser más lentas que las que siguen a recesiones por simple desaceleración económica, porque los sistemas bancarios y financieros se ven afectados.¹⁶ Además, no se proporcionó apoyo normativo necesario y, cuando se hizo, la tendencia fue retirarlo de forma prematura. Por otra parte, la mayoría de los aumentos de rentas que se produjeron tanto en Reino Unido como en Estados Unidos se concentraron en la población rica, el llamado 1%. En 2015 la renta real media por familia, medida por la Oficina del Censo de



Estados Unidos, estaba casi el 2% por debajo de su punto máximo en 2007 y casi el 3% por debajo de su nivel a finales del siglo XX. La tendencia de los aumentos de renta a concentrarse de manera desproporcionada en los ricos resultó menos pronunciada en Europa continental que en los países de habla inglesa, pero también fue patente. No debe sorprender que estas tendencias provocaran una reacción popular contra la competencia en las importaciones y la inmigración, que se veían como algo que beneficiaba al capital a expensas de la mano de obra nacional y como la causa de un estancamiento de los salarios.

Pero ¿tenían razón los votantes cuando culpaban a China y a los inmigrantes de lo sucedido? Los salarios de la clase trabajadora habían comenzado a estancarse y la desigualdad había empezado a aumentar ya mucho antes de la crisis de 2008-2009. El aumento de la desigualdad en Estados Unidos data, de hecho, de la década de 1970. Por eso los ingresos medios de los hombres trabajadores en su edad de máximo rendimiento, una vez ajustados a la inflación, pudieron caer hasta el 4% entre 1970 y 2010, a pesar de que la economía en general siguió expandiéndose. Y esto sucedió en Estados Unidos, pero también en muchas otras economías avanzadas. La cronología es claramente anterior al llamado «*shock* de China», que más o menos coincidió con la entrada de dicho país en la OMC, en 2001. Es muy anterior también al aumento de la inmigración procedente de países menos desarrollados a Europa y Estados Unidos a principios del siglo XXI.

La explicación reside en el impacto que tuvo el cambio tecnológico sesgado a favor de los trabajadores cualificados tanto en el estancamiento de los salarios de la clase trabajadora como en la creciente desigualdad. La sustitución de trabajadores por maquinaria en líneas de montaje se aceleró en las décadas de 1970 y 1980. El mantenimiento de dicha maquinaria requería niveles relativamente elevados de alfabetización y aritmética; exigía formación y destrezas. Este cambio afectó de manera visible la demanda de trabajadores más y menos cualificados y, por consiguiente, su compensación económica. Mientras que en 1965 trabajadores estadounidenses con estudios universitarios ganaban solo el 24% más que aquellos con estudios de secundaria, la brecha se amplió al 47% a mediados de la década de 1980 y al 57% a mediados de la década de 1990. La situación en Europa y Japón difirió en alcance, pero no en naturaleza.

Los votantes de clase trabajadora estaban descontentos por la escasa capacidad de sus gobiernos a la hora de atemperar los efectos del cambio. Conscientes de la imposibilidad de hacer retroceder el reloj del progreso tecnológico, les resultaba más fácil culpar de sus dificultades a los inmigrantes y a los trabajadores chinos. Lo que hicieron la crisis financiera y la lenta recuperación subsiguiente fue proporcionar un blanco para sus iras, que se dirigieron hacia las importaciones, los inmigrantes y los políticos y partidos mayoritarios. Catalizó el malestar de los votantes con las elites dirigentes y provocó un deseo de dismantelar el orden internacional establecido, en Reino Unido votando a favor del Brexit, en Estados Unidos votando a Trump y en países como Italia, Polonia y Hungría votando a partidos y líderes contrarios a la Unión Europea.

Así pues, la reacción populista que se desencadenó en 2016 fue más que una respuesta retardada a la crisis de 2008-2009. También fue el resultado de un continuo estancamiento de las rentas, de una desigualdad creciente y un sentimiento acrecentado de inseguridad económica cuyas raíces hay que buscar en las décadas de 1970 y 1980. Es posible que la ira hacia los inmigrantes y las importaciones fuera errada, pero no impidió a los políticos oportunistas beneficiarse de ella.

Otro acontecimiento clave de la década de 2008-2018 fue el ascenso de China a potencia mundial con ambiciones geopolíticas. China ya es el primer exportador mundial y pronto



La mayoría de los aumentos de rentas que se produjeron tanto en Reino Unido como en Estados Unidos se concentraron en la población rica, el llamado 1%

Invitadas al almuerzo de la Fundación Frederick Law Olmsted salen del Conservatory Garden de Central Park, Nueva York, en mayo de 2017. En esta cita anual se reúnen las mujeres más adineradas de la ciudad y recogen fondos para el mantenimiento del parque



En Estados Unidos, los hombres trabajadores en su edad de máximo rendimiento vieron caer sus ingresos, una vez ajustados a la inflación, hasta el 4% entre 1970 y 2010

John Martínez (izq.), operario de General Motors al que obligaron a jubilarse en abril de 2009, meses antes de la quiebra del gigante automovilístico, tenía depositadas sus esperanzas en las en otro tiempo generosas pensiones y la cobertura sanitaria de GM para cuidar de su familia



superará a Estados Unidos como país con el mayor PIB. Está construyendo portaaviones y reivindicando su presencia en el mar de China. Está usando su superioridad económica para forjar vínculos estratégicos con países de Asia meridional y central, África y Latinoamérica. Es el tercer inversor extranjero mundial y la fuente número uno de inversión extranjera para una cantidad creciente de países. Está usando su iniciativa del Cinturón y la Ruta de la Seda para aumentar las conexiones y la dependencia de China por parte de otros países, en su región y fuera de ella. No solo la iniciativa del Cinturón y la Ruta de la Seda; el Banco Asiático de Inversión en Infraestructura, el Banco del BRICS, la Iniciativa Chiang Mai para la Multilateralización, los *swaps* de renminbi del Banco Popular de China y la designación de bancos de compensación oficiales en renminbi para centros financieros extranjeros son todos indicadores de la intención de los líderes chinos de moldear el sistema internacional a su gusto.

El margen de influencia de China se ha visto, en todo caso, favorecido por las políticas de «América primero» de la Administración Trump. Al abandonar el acuerdo Transpacífico, dicha administración dejó pasar la oportunidad de integrar de manera más profunda Asia oriental en la esfera económica de Estados Unidos. Al imponer aranceles a las exportaciones europeas de acero y aluminio y amenazar con gravar las exportaciones de vehículos a motor europeos, en ambos casos aduciendo razones espurias de seguridad nacional, la Administración Trump ha puesto en peligro su capacidad para trabajar con sus aliados europeos en la reforma de las reglas de la OMC que puedan abordar las actuales preocupaciones por los subsidios chinos a empresas estatales y por su tratamiento de los derechos de propiedad intelectual. Al sembrar la duda en el acceso de Europa a los mercados estadounidenses, ha empujado a la Unión Europea a contemplar la posibilidad de estrechar sus lazos económicos con China. Al amenazar con abandonar la OMC, ha puesto en peligro la supervivencia misma de un orden global basado en reglas.

Otro acontecimiento clave de la década de 2008-2018 fue el ascenso de China a potencia mundial con ambiciones geopolíticas. China ya es el primer exportador del mundo y pronto superará a Estados Unidos como país con el mayor PIB

Con este estado de la cuestión, cabe imaginar distintos escenarios para la próxima década. En primer lugar, el intento de Trump por socavar el orden global basado en reglas podría ser una aberración temporal. Organismos de negocios tales como la Cámara de Comercio estadounidense se oponen a los aranceles de Trump y a sus esfuerzos por destruir el Tratado de Libre Comercio de América del Norte y la OMC. Miembros del partido de Trump en el Congreso siguen siendo partidarios del libre comercio. Si bien intimidados por el presidente, entienden que Estados Unidos se ha beneficiado de un orden internacional basado en reglas.

Además, si Trump fracasa a la hora de obtener concesiones significativas por parte de los socios comerciales de Estados Unidos y si sus aranceles obstaculizan el crecimiento de los negocios y elevan el precio de los bienes de consumo importados, es posible que los votantes detecten la relación entre las políticas presidenciales y sus dificultades económicas. Es posible que Trump mismo se canse de su estilo imperial de presidencia y se convierta en un líder más convencionalmente estadounidense. En ese caso, Estados Unidos reanudará sus funciones como miembro constructivo de la OMC, signatario del Acuerdo de París sobre el cambio climático y participante de un Acuerdo Transpacífico reactivado. Sin duda, el interludio



Un seguidor de Trump celebra en la Explanada Nacional de Washington la toma de posesión de Donald Trump como el 45.º presidente de Estados Unidos, 20 de enero de 2017





unilateralista de Estados Unidos habrá debilitado su influencia. Otros países empezarán a verlo como un socio menos digno de confianza. Mientras tanto habrán negociado entre sí acuerdos pensados para reducir la dependencia económica y en materia de seguridad de Estados Unidos. Con todo, el «paréntesis Trump», si es que se reduce a eso, no habrá alterado de manera significativa el orden económico internacional.

Para concebir este estado de cosas uno debe ser optimista. La mayoría de votantes republicanos, según las encuestas de opinión pública en el momento de escribir este artículo, apoyan las políticas comerciales restrictivas de Trump. El pueblo estadounidense ha demostrado escasa capacidad de relacionar los aranceles de su presidente con las consecuencias negativas de los mismos. El propio Trump es un maestro a la hora de desviar la atención.

Lo que es más importante, el apoyo popular al comercio abierto y libre exige políticas que compensen a los «perdedores» mediante programas de formación y reubicación, y la profunda y pertinaz hostilidad que sienten los estadounidenses hacia el gobierno constituye un obstáculo formidable para el establecimiento de dichos programas.

Un enfoque de la financiación de campañas electorales que concentre el poder en las manos de los ricos hará improbable que obtengan respaldo de políticas impositivas y de gasto público destinadas a redistribuir la renta a aquellos que se quedan atrás. Además, la ideología fundamentalista de mercado estadounidense propicia el olvido de las lecciones extraídas de la crisis financiera. Ello a su vez crea una posibilidad real de que se dé marcha atrás a las reformas poscrisis, con lo que aumentarían las probabilidades de una nueva crisis y se acentuaría aún más la polarización de la opinión pública.¹⁷

Organismos como la Cámara de Comercio estadounidense se oponen a los aranceles de Trump y a sus esfuerzos por destruir el Tratado de Libre Comercio de América del Norte y la OMC, por lo que el intento de Trump de socavar el orden global podría ser una aberración temporal

Todas estas razones inducen a pensar que Estados Unidos es extremadamente vulnerable a los cantos de sirena del proteccionismo, como ha ocurrido en casi toda su historia, a excepción de la segunda mitad del siglo XX. En otras palabras, hay razones para creer que el giro unilateralista del país pueda ser duradero.

Aunque algunas de estas tendencias también se aprecian en Europa, cabe pensar que es más probable que la Unión Europea, en comparación, continúe por la senda del multilateralismo y la apertura.¹⁸ Los países europeos, después de ser presa de extremismos en las décadas de 1920 y 1930, reformaron sus sistemas electorales para dificultar el control por parte de políticos oportunistas como Trump.¹⁹ Al carecer de la hostilidad profunda y obstinada hacia el gobierno que tienen los estadounidenses, son capaces de crear programas públicos que compensen a los perjudicados por un comercio libre y abierto. Debido a que tienen economías más pequeñas —en muchos casos significativamente más pequeñas— que la de Estados Unidos, entienden que su prosperidad está intrínsecamente ligada al comercio, tanto el multilateral como el de mercado único de la Unión Europea. Incluso Reino Unido, donde la desigualdad es mayor y el rechazo a la Unión Europea es más intenso, sigue comprometido con la idea del libre comercio.

Pero señalar que es probable que Europa siga siendo partidaria del libre comercio no equivale a decir que sea capaz de ejercer el liderazgo necesario para moldear el orden económico



mundial. La influencia exterior y en materia de políticas de seguridad y la influencia económica van de la mano. Recordemos la habilidad de un Estados Unidos poderoso desde el punto de vista geopolítico a la hora de dar forma al orden económico internacional después de la Segunda Guerra Mundial. Por su parte, la Unión Europea no ha demostrado ser capaz de articular una política exterior y de seguridad común; los distintos países que la integran tienen visiones distintas al respecto. El gasto militar conjunto del PIB es más bajo en Europa que en Estados Unidos y China. El continente está amenazado desde el punto de vista demográfico y, por tanto, abocado a un crecimiento lento. A medida que decaiga la cuota de Europa del PIB global, menos capacidad tendrá esta de determinar la naturaleza de las relaciones internacionales. Lo que deja a China como el candidato obvio a ocupar el espacio desalojado por Estados Unidos. En tanto principal socio comercial y fuente de inversión extranjera en un número creciente de países, ya posee cierta capacidad de influir en el orden económico internacional. La cuestión es qué clase de orden tiene China en mente.

La respuesta no es sencilla. China está comprometida con un aperturismo y un crecimiento marcados por las exportaciones. Tal y como lo expresó el presidente Xi Jinping en enero de 2017 en Davos, China tiene el propósito de impulsar una «economía global abierta». En otras palabras, Pekín no buscará de manera obvia modificar el régimen de comercio global actual con perspectivas más restrictivas.

Pero, en otros aspectos, una globalización de carácter chino será distinta de la globalización tal y como la conocemos. Comparada con otras grandes economías, la de China depende más de acuerdos de comercio bilaterales y menos de rondas de negociaciones multilaterales. En 2002 China firmó el acuerdo económico de cooperación ASEAN y a continuación varios acuerdos bilaterales de libre comercio con doce países de todo el mundo, a los que no tardarán en sumarse otros.²⁰

Hasta el momento China continúa favoreciendo los acuerdos económicos bilaterales frente a negociaciones multilaterales, lo que se traduce en un papel menor de la OMC.

El Consejo de Estado de la República Popular China defiende una estrategia comercial que «basada en la periferia de China, se extienda por el Cinturón y la Ruta de la Seda para llegar al mundo».²¹ Yo lo interpreto como una sugerencia de que tiene en mente un sistema de comercio radial, donde China sea el núcleo y los países del otro lado de sus fronteras, o periféricos, los radios. Otros estudiosos anunciaron ya la aparición de un sistema de comercio radial en Asia y otros posibles con centros en Europa y Estados Unidos.²² Si China ejerce un liderazgo más enérgico del sistema comercial global, este escenario se vuelve más probable. De nuevo, esto se traduciría en una reducción del papel de la OMC.

A continuación es posible que Pekín quiera pactar otros acuerdos regionales basados en China para complementar sus pactos comerciales existentes y en sustitución de instituciones multilaterales como el FMI y el Banco Mundial. Ya tiene el Banco Asiático de Inversión en Infraestructura, dirigido por Jin Liqun, como alternativa al Banco Mundial. El Banco Popular de China ya ha puesto 500.000 millones de dólares en líneas de *swaps* a disposición de más de treinta bancos centrales. En 2016 el Banco de Desarrollo de China y el Banco Industrial y Comercial de China, de propiedad estatal, se supone que actuando en nombre del Banco Popular de China, proporcionaron a Pakistán 900 millones de dólares en concepto de rescate para evitar una crisis de divisas. El enfoque regional de China puede estar, asimismo, motivado por el hecho de encontrarse insuficientemente representada en términos de cuota y de voto en el FMI, lo que deja a Estados Unidos como único país con poder de veto en dicha institución. Si la Administración Trump decidiera bloquear la reforma del FMI rechazando una revisión de las cuotas, o decidiera abandonar los nuevos AGP (Acuerdos Generales para la obtención de Préstamos), que constituyen una importante fracción



Una trabajadora de una fábrica de juguetes de Wuhan, en la provincia de Hubei, China, rellena de algodón un oso de peluche





de la financiación del FMI, China contaría con un nuevo estímulo para desarrollar su alternativa regional.²³

Un sistema internacional modelado por China podría dar menos peso a la protección de derechos de propiedad intelectual; de hecho, la apropiación de la propiedad intelectual de corporaciones multinacionales por parte de sus socios comerciales chinos es una de las principales manzanas de la discordia entre la Administración Trump y el gobierno de Xi. Otra opción sería que la actitud de Pekín respecto a estos temas cambiara a medida que China empezara a desarrollar nuevas tecnologías. Dicho esto, el respeto a la propiedad privada, ya sea de empresas nacionales o de multinacionales, siempre ha sido muy inferior en el sistema socialista y centralizado chino que en Europa y en Estados Unidos. En consecuencia, es probable que en un sistema global liderado por China la protección de la propiedad intelectual sea menor.

Desde una perspectiva más general, el gobierno de China hace más que el de Estados Unidos, mediante subsidios e instrucciones a empresas de propiedad estatal y otras, por dar forma a la estructura y evolución de su economía. El llamado Plan Made in China 2025 para promover el desarrollo de las altas tecnologías es solo el último ejemplo.²⁴ La OMC cuenta con reglas pensadas para limitar las subvenciones y las ayudas estatales de otra clase. Un sistema comercial modelado a la manera de China no contemplaría, o al menos limitaría, estas reglas.

Un régimen dirigido por China también estaría menos abierto a la inversión internacional. En 2017 China quedó solo por detrás de Filipinas y Arabia Saudí en la lista elaborada por la OCDE de los sesenta y tantos países con regímenes de Inversión Extranjera Directa (IED) más restrictivos. Cabe pensar que estas restricciones son otro mecanismo más para dar espacio a las empresas chinas para desarrollar sus habilidades tecnológicas. Esta actitud puede cambiar una vez China se convierta en líder tecnológico y se preocupe más por la IED externa que interna. Además, China continúa ejerciendo un férreo control de su sistema financiero y mantiene controles de los flujos entrantes y salientes de capital. Si bien el FMI mira con mejores ojos este tipo de controles desde principios de la década de 2000, es de esperar que un régimen internacional liderado por China se muestre más deferente aún con los gobiernos que recurran a ellos.

En suma, una economía global liderada por China seguiría abierta al comercio, pero tendría una naturaleza menos multilateral, transparente, basada en reglas y financieramente abierta que la de su predecesor occidental.

El gobierno de China hace más que el de Estados Unidos por dar forma a la estructura y evolución de su economía. El llamado Plan Made in China 2025 para promover el desarrollo de las altas tecnologías es solo el último ejemplo

La última década fue un periodo turbulento para la economía global, puesto que se inauguró con una crisis financiera global y se cerró con el Brexit y la elección de un presidente estadounidense con un programa de «América primero». La crisis trajo consigo un descontento popular con el orden económico establecido, aunque he argumentado que tan solo catalizó un malestar ya existente y asociado a las tendencias de ese momento: cambio tecnológico a favor de los trabajadores cualificados, creciente desigualdad de renta y fracaso de los gobiernos a la hora de equipar a los individuos para hacer frente a estos problemas. De las varias reacciones nacionales, la de Estados Unidos tuvo especiales repercusiones, puesto que en esencia despojó al país de su liderazgo global.

Las consecuencias futuras de esto distan mucho de estar claras. Es posible que la presidencia de Trump sea solo una fase, después de la cual Estados Unidos recuperaría sus apoyos y su liderazgo del sistema multilateral. Pero también existen razones para dudar de que esto ocurra. La hostilidad de los estadounidenses hacia el gobierno se traduce en un margen de intervención menor que, por ejemplo, en Europa, a la hora de compensar a las víctimas de la destrucción creativa y la globalización. Que nos encontremos en un periodo de crecimiento lento, a diferencia del tercer cuarto del siglo XX, hace que el apoyo y el liderazgo de Estados Unidos de un sistema abierto multilateral sea, cuando menos, problemático.

Con independencia de que el giro unilateral de Estados Unidos sea temporal o permanente, hay más espacio para que otras potencias influyan el orden económico mundial. Dados sus recursos y sus ambiciones, China es el candidato más probable. Un sistema con China a la cabeza seguirá abierto al comercio, pero será menos abierto financieramente que uno con la Unión Europea a la cabeza. Tendrá un enfoque más regional. Dará un papel más prominente al Estado. Estará menos basado en reglas y será menos transparente. La idea subyacente a admitir a China en la OMC era presionarla para que acercara su sistema político y económico a los modelos occidentales. Lo irónico sería que la presión económica que una China integrada internacionalmente ejerza en el mundo en general, y en Estados Unidos en particular, pueda terminar teniendo el efecto contrario.



Notas

1. Ver Summers, 2014.
2. Este es el cambio medio anual del PIB a precios constantes de 2008-2009 sacado de *Perspectivas de la Economía Mundial*, del FMI.
3. Para un análisis del debate, ver Saccomanni, 2015.
4. Este punto de vista se desarrolla en profundidad en Eichengreen, 2015.
5. Habrá quienes consideren la crisis de ahorros y préstamos de la década de 1980 una excepción, pero, tal y como demuestra Field (2017), su impacto macroeconómico fue mínimo.
6. Para un relato controvertido pero útil de estas tendencias, ver Johnson y Kwak, 2010.
7. Para un buen resumen, ver Bayoumi, 2017.
8. El análisis más influyente del papel de la suerte y las políticas acertadas durante la Gran Moderación es de Stock and Watson, 2003.
9. Lo argumenta muy bien el propio Taylor, 2015.
10. Para un análisis de esos flujos de capital y sus causas, incluida la política monetaria, ver Lane, 2013.
11. Esta es la convincente interpretación de Ball, 2018. Otros, tales como Bernake, 2015, aducen que el banco central no tuvo otra elección que dejar que Lehman se hundiera debido a que carecía de un aval válido, una tesis de la que Ball disiente vigorosamente.
12. Para una descripción divulgativa del debate, ver Scheiber, 2012.
13. Las cifras proceden, una vez más, de *Perspectivas de la Economía Mundial*, del FMI.
14. Los aranceles son para sesenta y cuatro países que representaban el 91% del comercio mundial en 2010, según Nordhaus, 2017. Las cifras para la solución de diferencias de la OMC proceden de Azevedo (2004, tabla 1).
15. El resto de esta sección está sacado de Eichengreen, 2018.
16. Este famoso, aunque controvertido argumento, se debe a Reinhart y Rogoff, 2009.
17. Funke, Schularick y Trebesch, 2016 ofrecen pruebas de que las

crisis financieras desembocan en un aumento de la polarización política y, en concreto, en cambios de voto a la derecha.

18. Es la conclusión de Eichengreen, 2018, donde explico los argumentos en mayor profundidad.
19. Estoy pensando, por ejemplo, en el sistema electoral francés, que permite a los partidarios de otros candidatos unirse para apoyar al candidato mayoritario en la segunda ronda de votaciones, o en el alemán, que requiere una moción de censura constructiva (acuerdo para nombrar a un nuevo líder) para deshacer un gobierno.
20. Muchos de estos acuerdos bilaterales se firman con países pobres que no constituyen mercados especialmente importantes para las exportaciones chinas. Pueden verse como una maniobra de Pekín para influir económicamente en su socio, y en concreto para animarlo a adoptar estándares de producto y tecnología chinos y a que gestionen sus economías según el modelo chino.
21. Tiezzi, 2018, p. 47. Una serie de publicaciones oficiales y semificiales se han hecho eco de la misma terminología.
22. Ver, por ejemplo, Baldwin, 2009.
23. La activación del AGP por importe de 255.000 millones de dólares requiere que el 85% de votos de los participantes y el veto a Estados Unidos. Además, Estados Unidos tendrá que abandonar el NAB si no se actúa por vía legislativa.
24. Para más información, ver Baldwin, 2018.

Bibliografía

- Azevedo, Roberto (2014): «Azevedo say success of WTO dispute settlement brings urgent challenges», *World Trade Organization News*. Disponible en https://www.wto.org/english/news_e/spra_e/spra32_e.htm
- Balding, Christopher (2018): «Is China a market economy?», en Alessia Amighini (ed.), *China: Champion of (Which) Globalisation?*, Milán, ISPI, pp. 61-80.
- Baldwin, Richard (2009): «The spoke trap: hub and spoke bilateralism in East Asia», *Swiss National Center of Competence in Research Working Paper*, n.º 2009/28, mayo.
- Ball, Lawrence (2018): *The Fed and Lehman Brothers: Setting the Record Straight on a Financial Disaster*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Bayoumi, Tamim (2017): *Unfinished Business: The Unexplored Causes of the Financial Crisis and the Lessons Yet to be Learned*, New Haven, Yale University Press.
- Bernanke, Ben (2015): *The Courage to Act: A Memoir of a Crisis and its Aftermath*, Nueva York, Norton.
- Eichengreen, Barry (2015): *Hall of Mirrors: The Great Depression, the Great Recession and the Uses—and Misuses—of History*, Nueva York, Oxford University Press.
- (2018): *The Populist Temptation: Economic Grievance and Political Reaction in the Modern Era*, Nueva York: Oxford University Press.
- Field, Alexander (2017): «The macroeconomic significance of the savings and loan insolvencies», *Research in Economic History*, n.º 33, pp. 65-113.
- Funke, Manuel; Schularick, Moritz y Trebesch, Christoph (2016): «Going to extremes: politics after financial crises», *European Economic Review*, n.º 88, pp. 227-260.
- Johnson, Simon y Kwak, James (2010): *13 Bankers: The Wall Street Takeover and the Next Financial Meltdown*, Nueva York, Pantheon.
- Lane, Philip (2013): «Capital flows in the euro area», en *European Economy*, en Economic Papers, n.º 497, abril.
- Nordhaus, William (2017): «The Trump doctrine on international trade», *VoxEU*, 23 de agosto. Disponible en <https://voxeu.org/article/trump-doctrine-international-trade-part-two>
- Reinhart, Carmen y Kenneth, Rogoff (2009): *This Time is Different: Eight Centuries of Financial Folly*, Princeton, Princeton University Press.
- Saccomanni, Fabrizio (2015): «Monetary spillovers? Boom and bust? Currency wars? The international monetary system strikes back». Discurso de la cena de la reunión especial de gobernadores del Banco de Pagos Internacionales, Manila, 6 de febrero. Disponible en <https://www.bis.org/publ/othp22.pdf>
- Scheiber, Noam (2012): *The Escape Artists: How Obama's Team Fumbled the Recovery*, Nueva York, Simon and Schuster.
- Stock, James y Watson, Mark (2003): «Has the business cycle changed? Evidence and explanations», Simposio en Jackson Hole del Federal Reserve Bank de Kansas City.
- Summers, Lawrence (2014): «Reflections on the “new secular stagnation hypothesis”», en Teulings, Coen y Baldwin, Richard (eds.), *Secular Stagnation: Facts Causes and Cures*, Londres, Centre for Economic Policy Research.
- Taylor, John (2015): «A monetary policy for the future», comentarios en el congreso del FMI «Rethinking Macro Policy III, Progress or Confusion?», 15 de abril.
- Tiezzi, Shannon (2018): «Free trade with chinese characteristics», en Amighini, Alessia (ed.), *China: Champion of (Which) Globalisation?*, Milán, ISPI, pp. 39-60.



Michelle Baddeley
University of South Australia

Michelle Baddeley es directora e investigadora titular del Institute for Choice, de la Universidad of South Australia y profesora honoraria del Institute for Global Prosperity, del University College de Londres. Con anterioridad fue profesora de Economía y Finanzas en UCL Bartlett (Facultad de Ambiente Construido), del University College de Londres y, antes de eso, miembro y directora de estudios (Economía) del Gonville & Caius College/Faculty of Economics, de la Universidad de Cambridge. Es graduada *cum laude* en Economía y Psicología por la Universidad de Queensland y máster en Economía por la Universidad de Cambridge. Sus especialidades son la economía conductual, la macroeconomía aplicada y la economía del desarrollo. Le interesan las políticas públicas y a lo largo de su carrera profesional ha colaborado con numerosos reguladores y departamentos gubernamentales. Entre sus libros más recientes figuran *Behavioural Economics: A Very Short Introduction*, *Behavioural Economics and Finance* (Nueva York, Routledge, 2013/2018) y *Copycats and Contrarians: Why We Follow Others... and When We Don't* (New Haven, Yale University Press, 2018).

Libro recomendado: Baddeley, Michelle (2017): *Behavioural Economics: A Very Short Introduction* [Economía conductual: una breve introducción], Oxford, Oxford University Press.

Consagrada por la concesión del premio Nobel de Economía a Richard Thaler en 2017, la economía conductual vive un momento de esplendor. Combina distintos hallazgos de las ciencias sociales, incluidas las poderosas herramientas analíticas de los economistas, con pruebas reveladoras sobre el comportamiento humano procedentes de otras disciplinas, en especial la psicología y la sociología. La autora explora la evolución de la economía conductual y algunos de sus hallazgos clave sobre incentivos y motivaciones; también analiza las influencias sociales, el aprendizaje social, la presión social y el pensamiento de grupo, la heurística y el sesgo; la toma de decisiones en condiciones de riesgo y de incertidumbre, el sesgo del presente y la procrastinación, además de las políticas conocidas como *nudging* o «pequeño empujón». El resultado es una amplia descripción de cómo proporciona la economía conductual a los negocios y a los reguladores una útil comprensión de cómo piensan, eligen y deciden las personas de carne y hueso.

Introducción



La economía conductual parece estar de moda. Los gobiernos incorporan hallazgos conductuales a las políticas. Los negocios comerciales la usan en sus estrategias de *marketing*. Las lecciones extraídas de la economía conductual moldean las relaciones entre empleadores y empleados. Incluso en los compartimentos estancos del mundo académico, la mayoría de equipos de investigación aplicada —sobre todo los científicos sociales, pero también los naturales, desde los neurocientíficos hasta los ecologistas, informáticos e ingenieros informáticos— están deseando incorporar a economistas conductuales a sus equipos. ¿La razón? La economía conductual ofrece una combinación única de hallazgos procedentes del ámbito de las ciencias sociales. Hace uso de las potentes herramientas analíticas de los economistas, tradicionalmente aplicadas a la comprensión de los incentivos y motivaciones que nos empujan a todos. Pero también palía la principal carencia de la economía no conductual: su concepción restrictiva de racionalidad, basada en supuestos de agentes capaces de aplicar con facilidad herramientas matemáticas para identificar las mejores soluciones para ellos y sus negocios. A Herbert Simon se deben los primeros intentos por reconceptualizar la racionalidad en la economía mediante su noción de «racionalidad limitada», es decir, racionalidad marcada por los límites en la información disponible o por la capacidad de procesamiento cognitivo (Simon, 1995). Los economistas conductuales modernos han llevado estos planteamientos más allá, combinando hallazgos relevantes del campo de la psicología para explicar cómo los incentivos económicos y las motivaciones cambian, a menudo de manera fundamental, por circunstancias de tipo psicológico. Ni la economía ni la psicología sirven por sí solas. Sin la economía, la psicología carece de estructura analítica y de propósito, sobre todo a la hora de describir las decisiones diarias. Sin la psicología, a la economía le faltan consistencia externa e intuición. Juntas, en cambio, ambas disciplinas resultan de lo más esclarecedoras. Juntas nos permiten comprender muy bien qué y cómo piensan, eligen y deciden las personas de carne y hueso de una manera que ninguna disciplina académica ha conseguido explicar por sí sola. Ello genera no solo nuevas reflexiones teóricas, también nuevas visiones prácticas y políticas que, bien gestionadas, tienen la capacidad de cambiar formas de vida y de proporcionar prosperidad y bienestar en un amplio número de ámbitos.

El pasado

A muchos observadores la economía conductual les puede parecer una novedad, para lo bueno y para lo malo. El entusiasmo por esta disciplina ha cobrado impulso más o menos en los últimos diez años. El primer hito fue la concesión del premio Nobel de Economía de 2002 conjuntamente al psicólogo del comportamiento económico Daniel Kahneman y a Vernon L. Smith, economista experimental cuyas ideas y herramientas inspiraron a los economistas conductuales, aunque la economía experimental y conductual no sean la misma cosa. El segundo hito fue la concesión del Nobel de Economía 2017 al economista conductual Richard Thaler, que ha expuesto sus contribuciones en su divertido libro *Misbehaving* [Portarse mal] (Thaler, 2016). Thaler es famoso sobre todo por sus trabajos en finanzas conductuales y políticas públicas conductuales —más conocidas como *nudging* («empujoncito» o «impulso»), término acuñado en su libro superventas escrito en colaboración con el catedrático de derecho Cass S. Sunstein, *Un pequeño empujón*, de cuya publicación se cumple este año el décimo aniversario (Thaler y Sunstein, 2008). Estos pensadores han ejercido una influencia enorme en las políticas modernas, pues han asesorado nada menos que a los reguladores del presidente Barack



Obama y del primer ministro británico David Cameron. La creación de una unidad de *nudging* o «impulso» en el gabinete ministerial de Cameron propició la aparición de unidades similares en todo el mundo, desde Australia hasta México y el Líbano, por nombrar solo algunas.

El progreso de la economía conductual entre ambos hitos, los premios nobeles de 2002 y 2017, refleja su transición de una disciplina en gran medida teórica a otra de inmensa relevancia política en el mundo real, en el diseño de políticas tanto públicas como comerciales. También tiene mucho que ofrecer a las personas de la calle, en el sentido de ayudarlas a entender cómo toman las decisiones. Pero la economía conductual es una disciplina mucho más antigua de lo que pueden sugerir los dos hitos del siglo XXI. Hay quien diría que toda economía debería ser conductual, puesto que el comportamiento es lo que guía las elecciones y la toma de decisiones. Después de todo, la economía se basa en el estudio de las decisiones. Pero, a partir del siglo XIX, la economía empezó a distanciarse del comportamiento, entendido este como la psicología de la elección, hacia la observación de las elecciones interpretadas como medida de unas preferencias manifiestas. Al proporcionar un relato sencillo y convincente de estas preferencias cuando hacemos una elección, los economistas asumen que quienes toman las decisiones lo hacen constreñidos por reglas de comportamiento estrictas, en concreto dan por supuesto que los consumidores buscan satisfacción máxima y los negocios buscan beneficios máximos. En la economía tradicional se da por hecho que consumidores y compañías hacen esto lo mejor que pueden, usando reglas matemáticas para identificar las mejores soluciones. Cuando los economistas modernos construyeron modelos matemáticos precisos que expresaran las reglas de comportamiento, eliminaron toda complejidad psicológica de la toma de decisiones en la vida real.

Pero históricamente y antes de que la economía moderna confinara el análisis de las elecciones al ámbito de las matemáticas, los economistas dedicaron mucho tiempo a pensar en cómo los incentivos y las motivaciones que forman parte del análisis económico se ven afectados por factores psicológicos, remontándose hasta Adam Smith. A Adam Smith se lo asocia siempre con la defensa del libre mercado, expuesta en su obra maestra *Investigación sobre la naturaleza y causa de la riqueza de las naciones*, en la que defiende que «la mano invisible» del mecanismo de fijación de precios debería poder operar sin la intervención de los gobiernos. Pero en su también obra maestra de 1759, *Teoría de los sentimientos morales*, Smith escribió largo y tendido sobre la compasión y otras emociones sociales que impulsan nuestras interacciones con quienes nos rodean, conceptos clave en la investigación de la economía conductual moderna.

El presente

Hemos hablado mucho del origen de la economía conductual y poco de lo que hacen, de hecho, los economistas conductuales. Para comprenderlo en profundidad puede ser útil echar un vistazo a la variedad de temas que exploran los economistas conductuales, así veremos el poder y la relevancia de sus aportaciones. La literatura sobre economía conductual es ingente y hacerle justicia en el capítulo de un libro es imposible, pero hay unos cuantos temas clave dominantes y aquí nos centraremos en los más potentes y duraderos a la hora de ilustrar los problemas que plantea la toma de decisiones en el mundo real. Estos incluyen: análisis conductuales de incentivos/motivaciones; influencias sociales; heurística, sesgo y riesgo; tiempo y planificación y los efectos de la personalidad y las emociones en la toma de decisiones (para análisis detallados de esta y otra literatura sobre economía conductual, ver Baddeley, 2017 y 2018b).



Ya hemos dicho que la economía tiene que ver sobre todo con los incentivos y las motivaciones. El incentivo tradicional ha sido el dinero, por ejemplo, cuando se explica la decisión de trabajar como un acto de equilibrio en el que el salario persuade a los trabajadores de que renuncien a su tiempo libre. En la economía conductual, los psicólogos aportan una explicación más amplia de la motivación, concretamente, diferenciando las motivaciones extrínsecas de las intrínsecas. Las motivaciones extrínsecas incluyen las recompensas y los castigos que nos son externos (el más obvio es el dinero, pero los castigos físicos serían otro ejemplo). Luego están las motivaciones intrínsecas, como el orgullo por el trabajo bien hecho, el sentido de la responsabilidad y el compromiso intelectual. Debemos algunos de los experimentos conductuales más famosos al psicólogo Dan Ariely y su equipo (ver Ariely, 2008). Algunos de estos estudios experimentales muestran que las decisiones de los participantes de dar dinero a una organización benéfica o a un bien público están en parte motivadas por factores sociales: las personas son más generosas cuando sus donativos se hacen públicos que cuando no se divulgan. Las motivaciones intrínsecas son el motor del esfuerzo, a menudo tanto o más que los incentivos monetarios externos. A los estudiantes, por ejemplo, los motiva más un desafío intelectual que el dinero. Esto demuestra que no actuamos movidos solo por incentivos y desincentivos externos, sean estos dinero, recompensa/castigo físico o repercusiones sociales. El ajedrez, los juegos de ordenador y también los desafíos físicos asociados a los deportes concitan la atención y el entusiasmo de las personas incluso cuando no hay recompensas monetarias por medio.

Identificar las motivaciones intrínsecas y extrínsecas, sin embargo, no es fácil. Existe la complicación añadida de que los incentivos extrínsecos tienden a «desplazar» los intrínsecos. Hay un estudio clásico al respecto conducido por los economistas conductuales Uri Gneezy y Aldo Rustichini. Una guardería israelí que se enfrentaba al problema de padres que llegaban tarde a recoger a sus hijos decidió instituir un sistema de multas. Sin embargo, las multas tuvieron el efecto contrario, ya que aumentaron los retrasos de los padres en lugar de reducirlos: Gneezy y Rustichini atribuyeron esto a un problema de efecto desplazamiento: la introducción de la multa eliminó el incentivo de los padres de cumplir con su deber llegando a tiempo a recoger a sus hijos. Los padres interpretaban la multa como un precio: al pagar la multa estaban pagando un servicio, de manera que recoger a sus hijos se convertía en un intercambio económico en el que el deber de ser puntuales perdía importancia (Gneezy y Rustichini, 2000).

Los economistas conductuales han dedicado mucho tiempo a explorar un conjunto específico de motivaciones: las sociales. Probablemente lo que mejor las ilustra sea el famoso experimento conductual llamado juego del ultimátum, inventado por Werner Güth y sus colegas (Güth *et al.*, 1982). En el juego del ultimátum, el encargado del experimento le da a un participante una suma de dinero que tiene que distribuir. Por ejemplo: dale a Alice cien dólares y pídele que proponga dar una parte de este dinero a un segundo participante en el experimento, Bob. A Bob se le dan dos alternativas: aceptar la oferta de Alice o rechazarla. Si Bob rechaza la oferta de Alice, entonces ninguno de los dos recibe nada. La ciencia económica estándar predice que Alice jugará motivada por su interés propio e intentará hacer a Bob la oferta más baja posible que crea que este pueda aceptar. En este caso, ofrecería un dólar a Bob y, si Bob es igual de racional, aceptará un dólar porque un dólar es mejor que cero. En la realidad, sin embargo, en un espectro muy amplio de estudios sobre el juego del ultimátum, incluidos estudios conducidos en culturas, contextos socioeconómicos diversos e incluso con monos en los que los incentivos eran zumo y fruta, los proponentes son mucho más generosos



La reina de Reino Unido, Isabel II, y el príncipe Felipe, duque de Edimburgo, durante una visita al remodelado King Edward Court Shopping Centre de Windsor, Inglaterra, febrero de 2008





y ofrecen mucho más que el equivalente a un dólar. Por otro lado, los receptores a menudo rechazarán incluso ofertas relativamente generosas. ¿Qué está pasando? Los economistas conductuales explican estos resultados y los de otros juegos similares aludiendo a nuestras preferencias sociales. No nos gusta ver resultados desiguales, experimentamos aversión a la inequidad y la experimentamos de dos maneras: aversión a la desigualdad desventajosa y aversión a la desigualdad ventajosa. La desventajosa es cuando nosotros no queremos ser víctimas de la desigualdad. En el juego del ultimátum, Bob sufrirá aversión a la desigualdad desventajosa cuando Alice le haga una oferta mezquina y ello puede llevarlo a rechazar ofertas relativamente generosas. Por otro lado, la aversión a la desigualdad ventajosa trata de no querer ver a quienes nos rodean tratados injustamente. Así, en nuestro ejemplo, Alice no hará la mínima oferta posible a Bob porque su razón le dice que sería injusto. Como es lógico, nos preocupa mucho más la aversión a la desigualdad desventajosa que la ventajosa, pero se ha demostrado —con un gran número de estudios experimentales— que ambas tienen una fuerte influencia en nuestra tendencia a la generosidad.

Influencias sociales

A partir de estas constataciones sobre preferencias sociales, los economistas conductuales han explorado otras maneras en que las influencias sociales afectan nuestras decisiones y nuestras elecciones. A grandes rasgos, estas influencias sociales pueden dividirse en informativas y normativas (Baddeley, 2018a). Las influencias informativas tienen que ver con cómo aprendemos de los demás. En situaciones en las que no tenemos mucha información o nos enfrentamos a un conjunto complejo e incierto de resultados potenciales, nos parece lógico fijarnos en lo que hacen otros, deduciendo que deben saber mejor que nosotros cuál es la actuación más correcta. Los economistas han analizado este fenómeno en términos de actualización de nuestros cálculos de probabilidades y el ejemplo clásico sería la elección de restaurante descrita por Abhijit Banerjee (Banerjee, 1992). Estamos recién llegados a una ciudad, quizá de visita turística, y vemos dos restaurantes, se parecen mucho, pero no tenemos ni idea de cuál es mejor. Vemos que uno está lleno y que el otro está vacío y, quizá en contra de lo que dictaría el sentido común, no elegimos el vacío, que puede ser más cómodo y tranquilo. ¿Por qué? Porque deducimos que todas esas personas que han preferido el restaurante lleno al vacío saben lo que hacen y seguimos su ejemplo, usamos sus acciones (su elección de restaurante) a la manera de información social. Respondemos a estas influencias informativas de manera racional: quizá no sea la racionalidad extrema que constituye la piedra fundacional de gran parte de la ciencia económica, pero aun así es sensata, pues resulta de un proceso de razonamiento lógico.


Las influencias sociales normativas son racionales de una manera menos obvia y tienen que ver con cómo respondemos a las presiones de los grupos que nos rodean. Para explicar estas presiones sociales, los economistas conductuales recurren a conceptos clave acuñados por psicólogos sociales tales como Stanley Milgram, Solomon Asch y sus colegas. Stanley Milgram suscitó controversia con sus experimentos de descargas eléctricas. El experimentador ordenaba a los participantes que aplicaran lo que estos creían eran fuertes descargas eléctricas a otras personas a las que no podían ver. Los participantes en los experimentos de Milgram sí oían a las personas a las que se suponía estaban aplicando descargas eléctricas. En realidad eran actores, pero los participantes en el experimento no lo sabían y un número significativo de ellos (no todos) se mostraron dispuestos a aplicar lo que se les decía que eran descargas eléctricas potencialmente letales. Los actores simulaban estar sufriendo mucho



dolor, gritaban y, en algunos casos, guardaban un silencio inquietante después de la descarga. Milgram explicaba que el hecho de que los participantes en su experimento estuvieran dispuestos a actuar de esta manera en apariencia despiadada probaba que eran susceptibles a la obediencia a una autoridad. Tendemos a hacer lo que se nos dice, sobre todo enfrentados a situaciones físicas y psicológicamente duras. La evidencia de Milgram se usó en parte para explicar algunas de las atrocidades asociadas al Holocausto, en un intento por dar respuesta al enigma de por qué ciudadanos corrientes no solo se convierten en observadores pasivos de atrocidades, sino también participan en ellas. Otro conjunto de experimentos de psicología social que han influido en los economistas conductuales los debemos a Solomon Asch (Asch, 1955). Este diseñó un experimento con líneas para poner a prueba la conformidad: se pedía a los participantes que miraran el dibujo de una línea y, a continuación, lo emparejaran con otra línea de la misma longitud. Era una tarea fácil, pero Asch y sus colegas la complicaron enseñando a los participantes lo que habían elegido los demás. Sin que los participantes lo supieran, entre los grupos que decidían sobre la longitud de las líneas había cómplices del experimentador a los que a este había dado instrucciones de mentir sobre la longitud de las líneas. Para ilustrarlo con un ejemplo sencillo: imaginemos que veinte participantes tienen que completar juntos la tarea, pero diecinueve de ellos están compinchados con el experimentador, de modo que hay un único participante genuino. Si el resto propone una respuesta incorrecta y absurda a esta sencilla pregunta sobre líneas, ¿qué hará el participante número veinte? Asch y sus colegas comprobaron que muchos de los participantes genuinos (aunque, y esto resulta revelador, no todos) cambiaron de opinión respecto a la respuesta correcta y eligieron una obviamente incorrecta cuando vieron la elección de los demás. En otras palabras, muchos participantes parecían inclinados a asegurarse de que sus respuestas coincidían con las de los otros participantes de su grupo, sin considerar la posibilidad de que estos pudieran estar equivocados o mintiendo. Las respuestas emocionales de los participantes eran variables. Aquellos que defendían sus respuestas originales, lo hacían con seguridad. Los conformistas que cambiaban sus respuestas para adecuarlas a las del grupo variaban: algunos dudaban de sí mismos y eso les provocaba malestar; otros culpaban a otros participantes de sus equivocaciones. ¿Por qué iba a cambiar de opinión una persona y elegir una respuesta que parece a todas luces equivocada? Este experimento no resuelve el dilema entre lo racional y lo irracional. Elegir la respuesta incorrecta solo porque ves a otros hacerlo puede parecer irracional. El premio Nobel de Economía Robert Shiller propuso una explicación distinta, consistente con la toma de decisiones racional: quizá los participantes reales pensaron que era más probable que su decisión individual fuera equivocada a que lo fuera la de diecinueve personas. Sopesaron las probabilidades y llegaron a la conclusión de que las posibilidades de que un número tan elevado de personas estuviera equivocado eran pequeñas y, por tanto, tenía sentido imitarlas (Shiller, 1995).

Las influencias sociales pueden dividirse en informativas y normativas. Las primeras tienen que ver con cómo aprendemos de los demás mientras que las segundas con cómo respondemos a las presiones de los grupos que nos rodean

De manera más general, muchos de nosotros usamos las elecciones de otros a la hora de elegir y actuar, como en el caso de la elección del restaurante expuesto arriba. Cuando copiamos a otras personas, estamos usando una regla de uso común, una sencilla herramienta



**La aversión que experimentamos
ante la inequidad tiene una
fuerte influencia en nuestra
tendencia a la generosidad**

Un voluntario de la ONG española Proactiva Open Arms ayuda a desembarcar a una inmigrante, a la que han rescatado a 20 millas de las costas libias, en el puerto de la ciudad italiana de Crotona, marzo de 2017







de toma de decisiones que nos ayuda a desenvolvernos en situaciones complejas, en especial aquellas caracterizadas por sobrecarga de información de elecciones posibles. En el mundo actual, la ubicuidad de información y reseñas en línea es otra manera de usar las elecciones y acciones de otros a modo de guía. Por ejemplo, cuando nos compramos un ordenador o reservamos un hotel, consultamos lo que han hecho y opinan otros antes de decidir. En estas situaciones, cuando seleccionar de entre gran cantidad de información y muchas opciones posibles supone un desafío cognitivo, tiene sentido seguir a los demás y adoptar lo que los economistas conductuales llamarían «heurística» gregaria. Seguir a la mayoría es una manera rápida de decidir. Lo que nos lleva a la abundante e influyente literatura sobre heurística y sesgo desarrollada a partir de los extensos trabajos experimentales en dicho campo de Daniel Kahneman y su colega Amos Tversky.

Heurística, sesgo y riesgo

¿Qué es la heurística? La heurística son las reglas de toma de decisiones rápidas que usamos para simplificar nuestras elecciones diarias y que a menudo funcionan bien, pero en ocasiones crean sesgos. En otras palabras, en determinadas situaciones, la heurística nos lleva a cometer errores sistemáticos. El psicólogo Gerd Gigerenzer hace la importante observación, sin embargo, de que las reglas heurísticas a menudo constituyen una buena guía para la toma de decisiones porque son rápidas y frugales. Suelen funcionar bien, sobre todo si se da a las personas técnicas sencillas que les permitan usar la heurística de manera más efectiva (Gigerenzer, 2014).

Cuando seleccionar de entre gran cantidad de información y muchas opciones posibles supone un desafío cognitivo, tiene sentido seguir a los demás y adoptar lo que los economistas conductuales llamarían «heurística» gregaria

Si hoy buscamos en Google «sesgo conductual», obtendremos una lista larga y desordenada; a la hora de elaborar una taxonomía de la heurística y de los sesgos que lleva asociados, es una buena opción empezar por la taxonomía de las reglas heurísticas de Daniel Kahneman y Amos Tversky, descrita en su artículo de la revista *Science* de 1974 (Tversky y Kahneman, 1974) y resumido para los legos en la materia en Kahneman (2011). Kahneman y Tversky identifican tres categorías de reglas heurísticas, basándose en evidencias procedentes de un amplio espectro de experimentos que condujeron y que incluyen la heurística de disponibilidad, de representatividad y de anclaje y ajuste.

La heurística de disponibilidad consiste en usar información de fácil acceso, ya sean acontecimientos recientes, primeros momentos o sucesos emocionalmente vívidos o convincentes. Nuestros recuerdos de este tipo de información importante distorsionan nuestra percepción del riesgo. Un ejemplo clásico es el impacto que tienen las noticias vívidas y sensacionalistas en nuestras elecciones y que están vinculadas a una clase específica de heurística de la disponibilidad, la heurística afectiva. Por ejemplo, relatos vívidos de accidentes graves de avión o tren permanecen en nuestra memoria y nos conducen a evitar aviones y trenes cuando, objetivamente, tenemos más probabilidades de que nos atropelle un coche al cruzar la calle, algo que hacemos todos los días casi sin pensar. Podemos calcular mal el riesgo —pensar



que los accidentes de avión y tren son más probables que los accidentes peatonales— y ello se debe a que la información sobre accidentes de aviación está más disponible, es de acceso más inmediato y nos resulta más memorable.

La heurística de la representatividad se refiere a los juicios por analogía: juzgamos la probabilidad de diferentes resultados según la similitud que presentan respecto a cosas que ya sabemos. En algunos de sus experimentos, Kahneman y Tversky pidieron a los participantes que leyeran el perfil de una persona y juzgaran las probabilidades que tenía esa persona de ser abogado o ingeniero. Descubrieron que muchos de los participantes juzgaban las probabilidades de que la persona descrita fuera un abogado o un ingeniero dependiendo de lo que se pareciera su perfil a sus ideas preconcebidas y estereotipos de cómo son los abogados y los ingenieros.

La heurística de anclaje y ajuste habla de cómo tomamos decisiones de acuerdo a un punto de referencia. Por ejemplo, cuando se pidió a los participantes de los experimentos de Kahneman y Tversky que adivinaran el número de países africanos miembros de Naciones Unidas, se comprobó que era posible manipular sus respuestas pidiéndoles que hicieran girar primero una rueda para obtener un número. Aquellos que obtenían un número más bajo al girar la rueda también daban un número menor de países africanos en Naciones Unidas.

Otra aportación fundamental de Kahneman y Tversky procede de sus análisis de heurística y sesgo: su teoría conductual del riesgo, lo que ellos llaman «teoría prospectiva» (Kahneman y Tversky, 1979). Dicha teoría la formularon sobre la base de una serie de experimentos conductuales que ponían de manifiesto fallos fundamentales en la teoría de la utilidad esperada, la teoría de riesgo estándar que usan los economistas. Las diferencias entre estos dos enfoques de la comprensión de la toma de decisiones de riesgo son complejas, pero una de las características fundamentales de la teoría de la utilidad esperada es que da por hecho que las preferencias de riesgo de las personas son estables: si alguien asume un riesgo, entonces es una persona que asume riesgos. No cambiará sus decisiones si las opciones arriesgadas que se le presentan vienen enmarcadas de forma distinta. Esto está relacionado con tres rasgos fundamentales de la teoría prospectiva: La primera es que las preferencias de riesgo son cambiantes. Así, según la teoría prospectiva, las personas tienden más a correr riesgos para evitar pérdidas, lo que nos lleva a la noción clave de la teoría prospectiva: la «aversión a las pérdidas». La economía estándar predice que, con independencia de si nos enfrentamos a ganancias o a pérdidas, decidimos en función de la magnitud absoluta del impacto que tiene para nosotros esa decisión. En la teoría prospectiva, sin embargo, las personas se enfrentan de manera distinta a las pérdidas y a las ganancias: nos preocupan mucho más las primeras que las segundas, y una de las consecuencias de esto es que estamos dispuestos a asumir riesgos mayores para evitar pérdidas que para obtener ganancias. Esto a su vez conduce a la tercera característica clave de la teoría prospectiva: Tomamos decisiones de acuerdo a nuestro punto de referencia. Y este casi siempre es el *statu quo*, nuestro punto de partida. Esta característica está directamente vinculada con la heurística de anclaje y ajuste, ya descrita.

Tiempo y planificación

Hay todo un subgénero de la literatura sobre economía conductual que explora nuestra capacidad de planificar nuestras elecciones y decisiones en el tiempo. La economía tradicional predice que, con el tiempo, vamos adquiriendo unas preferencias estables, lo mismo que ocurre con el riesgo. Esto significa que el horizonte temporal no importa. Si somos impacientes, somos impacientes con independencia del contexto. Los economistas conductuales proponen, en



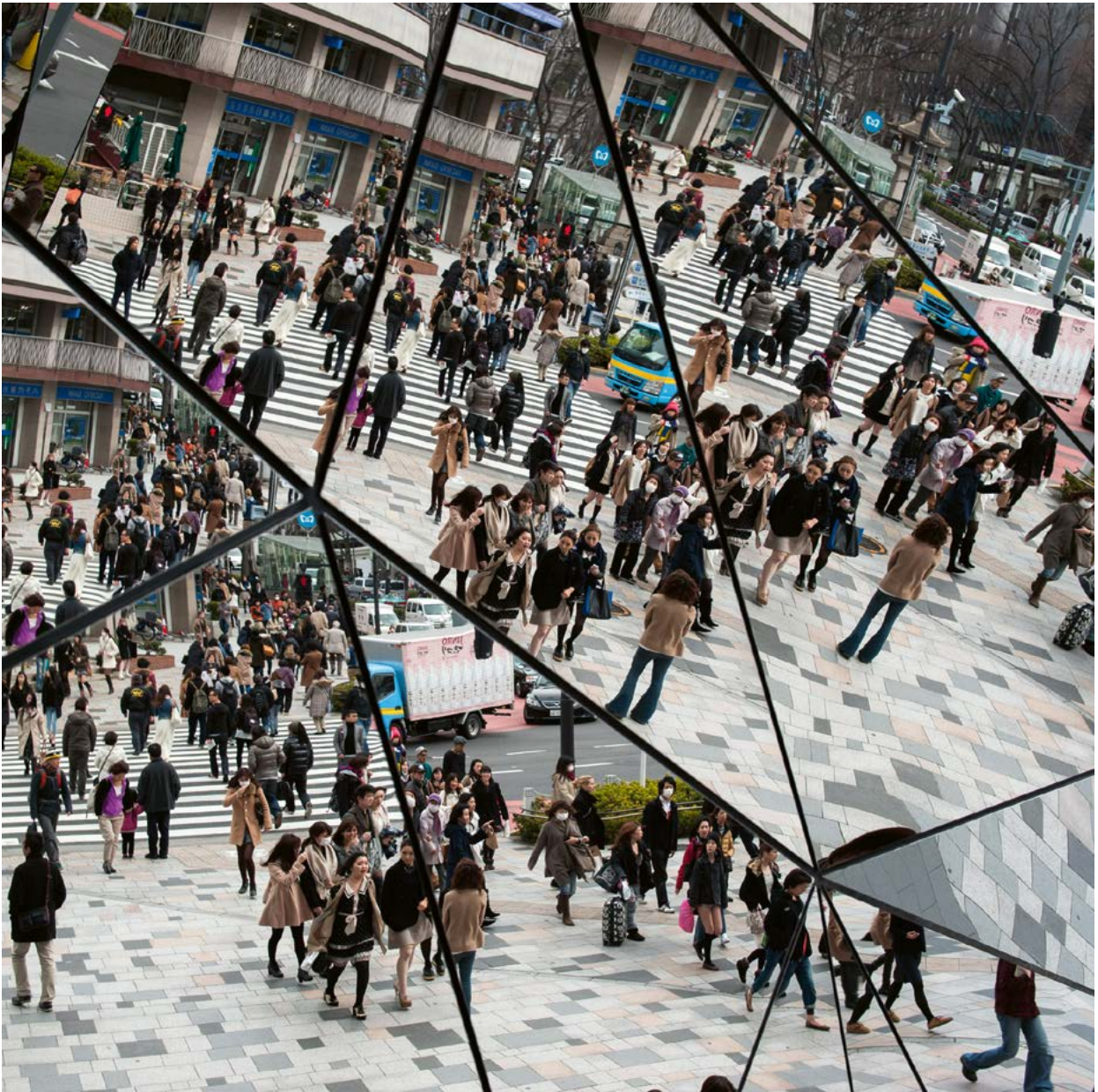
cambio, apoyándose en evidencias considerables procedentes de experimentos, que en el corto plazo somos desproporcionadamente impacientes; sufrimos, en suma, lo que en economía conductual se llama «sesgo del presente». Sopesamos los beneficios y costes que llegarán antes y los que llegarán más tarde. Por ejemplo, si estamos decidiendo entre gastar mediante la tarjeta de crédito hoy o mañana y comparando esta elección con gastar dentro de un año o un año y un día, la economía estándar predice que nuestras elecciones serán consistentes en el tiempo. Es decir, que si preferimos gastar hoy, entonces también preferiremos gastar mañana. Pero los experimentos conductuales muestran que somos desproporcionadamente impacientes en el corto plazo comparado con el largo plazo. Preferimos gastar hoy a mañana, pero cuando planificamos el futuro preferimos gastar dentro de un año y un día que dentro de un año. Sopesamos las recompensas inmediatas. Economistas conductuales como David Laibson han plasmado esto incorporando a la economía estándar teorías de descuento social alternativas, en concreto en forma de descuento hiperbólico (Laibson, 1997). Se trata de algo más que una curiosidad académica, porque tiene importantes consecuencias en nuestra vida diaria, al explicar muchos comportamientos, desde la procrastinación a la adicción. El sesgo del presente puede explicar por qué aplazamos acciones costosas o desagradables. También explica determinados malos hábitos o ausencia de buenos. Un experimento especialmente revelador fue el conducido por los economistas Stefano DellaVigna y Ulrike Malmendier en su estudio sobre hábitos de ir al gimnasio. Al consultar los datos de un gimnasio real, encontraron que había clientes que suscribían un contrato anual y luego iban solo al gimnasio unas cuantas veces, aunque se les había ofrecido la modalidad de pagar por visita (DellaVigna y Malmendier, 2006). En el curso de un año, a veces más, estos usuarios muy ocasionales del gimnasio estaban de hecho pagando sumas de dinero considerables por visita, algo innecesario de haber predicho de manera más exacta su comportamiento futuro cuando se apuntaron al gimnasio. Esto es difícil de explicar en términos de análisis económico estándar, pero una vez los economistas conductuales aportan el sesgo del presente, el comportamiento de estas personas resulta más comprensible. Los usuarios planean en un principio ir muchas veces al gimnasio, pero cambian de planes cuando se enfrentan a la elección inmediata entre ir al gimnasio frente hacer otra actividad (más) agradable.

Los experimentos conductuales muestran que somos desproporcionadamente impacientes en el corto plazo comparado con el largo plazo. Preferimos gastar hoy a mañana, pero cuando planificamos el futuro preferimos gastar dentro de un año y un día que dentro de un año

El sesgo del presente también explica por qué comemos de más y nos cuesta tanto renunciar a la nicotina, al alcohol y a otras drogas. También hay matices en la manera en que algunos de nosotros gestionamos nuestra susceptibilidad al sesgo del presente. Los más sofisticados somos conscientes de que estamos padeciendo un sesgo del presente, de manera que nos imponemos una obligación futura, usando lo que los economistas conductuales llaman mecanismos de compromiso. Por ejemplo, podemos congelar nuestra tarjeta de crédito dentro de un bloque de hielo para impedir que nuestro futuro yo gaste de forma impulsiva. En torno a estos mecanismos de compromiso han surgido nuevos negocios, incluidas herramientas en línea de seguimiento como Beeminder. Cuando uno se registra en Beeminder, se marca unos objetivos y, si no los cumple, Beeminder le cobra.



El paso de los transeúntes se refleja en la fachada de un centro comercial de la zona de compras de Omotesando, Tokio, marzo de 2013





Una característica clave del sesgo del presente es que no todos somos igual de susceptibles. Algunos tenemos más autocontrol que otros y hay una extensa y creciente literatura sobre diferencias individuales, incluidos rasgos de la personalidad y el papel que desempeñan a la hora de explicar nuestros distintos grados de susceptibilidad al sesgo del presente. Siguiendo las enseñanzas de los psicólogos, los economistas conductuales están empleando test de personalidad para ayudar a explicar algunas de las diferencias en la susceptibilidad a sesgos como el del presente. Uno de los conjuntos de test más usados hoy por los economistas conductuales es el test de los Cinco Grandes Factores de la Personalidad (conocido en inglés por el acrónimo OCEAN). Estos cinco factores son: Apertura a la experiencia, Responsabilidad (tesón), Extraversión, Cordialidad/Amabilidad y Estabilidad emocional. En su análisis del impacto de las diferencias individuales en el éxito económico, Lex Borghans y el premio Nobel de Economía James Heckman encontraron, por ejemplo, que el tesón es un rasgo de la personalidad estrechamente relacionado con el éxito en la vida, lo que confirmaba hallazgos anteriores del psicólogo Walter Mischel, famoso por el experimento del malvavisco, que estudiaba la capacidad de niños de resistirse a la tentación cuando tenían que elegir entre comerse un malvavisco hoy o dos mañana. Aquellos niños que mostraban mayor autocontrol a la hora de resistir la tentación también tenían más probabilidades de triunfar en la vida (Borghans *et al.*, 2008; Mischel, 2014).

El futuro: más allá del «empujoncito»

Todas estas aportaciones de la economía conductual están cambiando la economía tradicional y también están influyendo en el diseño de políticas mediante el llamado «empujoncito», como se subrayaba en la introducción. ¿Hay, por tanto, nuevos horizontes para la economía conductual o sabemos ya todo lo que hay que saber? Hacen falta más pruebas que demuestren lo sólidas y efectivas que son en realidad las políticas de impulso y, en ese sentido, ya se han hecho progresos. Otra área ignorada en gran medida hasta fecha reciente es la macroeconomía conductual. El economista británico John Maynard Keynes fue uno de los primeros en analizar las influencias psicológicas, en concreto las convenciones sociales, en los mercados financieros y las consecuencias para la macroeconomía en general (ver, por ejemplo, Keynes, 1936). Algunas de las propuestas de Keynes están siendo reformuladas hoy, por ejemplo, por los premios nobel de economía George Akerlof y Robert Shiller (ver, por ejemplo, Akerlof, 2002; Akerlof y Shiller, 2009). Estas reflexiones las ha complementado recientemente el economista estadounidense George Katona con sus teorías macroeconómicas, en concreto su análisis de los sentimientos del consumidor (Katona, 1975). La influencia de Katona está presente en el Índice de Sentimientos del Consumidor de la Universidad de Michigan, cuyos resultados siguen usándose ampliamente en la actualidad (ver, por ejemplo, Curtin, 2018). Existe un importante obstáculo, sin embargo, para la macroeconomía conductual: es difícil agregar de forma coherente dentro de un modelo macroeconómico las complejidades del comportamiento identificado por economistas conductuales en un contexto microeconómico. No obstante, se están diseñando nuevas metodologías, en forma, por ejemplo, de modelos computacionales basados en agente y aprendizaje automático. Si estos nuevos métodos consiguen aplicarse con éxito al desarrollo de modelos macroeconómicos conductuales coherentes, entonces la economía conductual generará más aportaciones innovadoras nuevas y emocionantes en la próxima década de lo que lo ha hecho en la última.

Bibliografía

- Akerlof, George (2002): «Behavioural macroeconomics and macroeconomic behavior», en *American Economic Review*, vol. 92, n.º 3, pp. 411-433.
- Akerlof, George y Shiller, Robert (2009): *Animal Spirits: How Human Psychology Drives the Economy and Why It Matters for Global Capitalism*, Princeton, Princeton University Press.
- Ariely, Dan (2008): *Predictably Irrational. The Hidden Forces that Shape Our Decisions*, Nueva York, Harper Collins.
- Asch, Solomon (1955): «Opinions and social pressure», en *Scientific American*, vol. 193, n.º 5, pp. 31-35.
- Baddeley, Michelle (2017): *Behavioural Economics: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press.
- (2018a): *Copycats and Contrarians: Why We Follow Others... and When We Don't*, Londres/New Haven, Yale University Press.
- (2018b): *Behavioural Economics and Finance*, 2ª ed., Abingdon, Routledge.
- Banerjee, Abhijit (1992): «A simple model of herd behavior», en *Quarterly Journal of Economics*, vol. 107, n.º 3, pp. 797-817.
- Borghans, Lex; Lee, Angela Duckworth; Heckman, James J. y Ter Weel, Bas (2008): «The economics and psychology of personality traits», en *Journal of Human Resources*, vol. 43, n.º 4, pp. 972-1059.
- Curtin, Richard (2018): *Consumer Expectations: Micro Foundations and Macro Impact*, Nueva York/Cambridge, Cambridge University Press.
- DellaVigna, Stefano y Malmendier, Ulrike (2006): «Paying not to go to the gym», en *American Economic Review*, vol. 96, n.º 3, pp. 694-719.
- Gigerenzer, Gerd (2014): *Risk Savvy: How to Make Good Decisions*, Londres, Penguin Books.
- Gneezy, Uri y Rustichini, Aldo (2000): «A fine is a price», en *Journal of Legal Studies*, vol. 29, n.º 1, pp. 1-17.
- Güth, Werner; Schmittberger, Rolf y Schwarze, Bernd (1982): «An experimental analysis of ultimatum bargaining», en *Journal of Economic Behavior and Organization*, n.º 3, pp. 367-388.
- Kahneman, Daniel (2011): *Thinking, Fast and Slow*, Nueva York, Farrar, Strauss and Giroux.
- Kahneman, Daniel y Tversky, Amos (1979): «Prospect theory: an analysis of decision under risk», en *Econometrica*, vol. 47, n.º 2, pp. 263-292.
- Katona, George (1975): *Psychological Economics*, Nueva York, Elsevier.
- Keynes, John Maynard (1936): *The General Theory of Employment, Interest and Money*, Londres, Royal Economic Society/Macmillan. [Ed. esp. (2006): *Teoría general de la ocupación, el interés y el dinero*, Madrid, Fondo de Cultura Económica.]
- Laibson, David (1997): «Golden eggs and hyperbolic discounting», en *Quarterly Journal of Economics*, n.º 112, pp. 443-478.
- Milgram, Stanley (1963): «Behavioral study of obedience», en *Journal of Abnormal and Social Psychology*, n.º 67, pp. 371-378.
- Mischel, Walter (2014): *The Marshmallow Test: Why Self-Control Is the Engine of Success*, Nueva York, Little, Brown and Company.
- Shiller, Robert (1995): «Conversation, information and herd behavior», en *American Economic Review*, vol. 85, n.º 2, pp. 181-185.
- Simon, Herbert (1955): «A behavioral model of rational choice», en *Quarterly Journal of Economics*, n.º 69, pp. 99-118.
- Thaler, Richard H. (2016): *Misbehaving: The Making of Behavioural Economics*, Londres, Allen Lane.
- Thaler, Richard H. y Sunstein, Cass R. (2008): *Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth and Happiness*, Londres/New Haven, Yale University Press. [Ed. esp. (2017): *Un pequeño empujón*, Madrid, Taurus.]
- Tversky, Amos y Kahneman, Daniel (1974): «Judgement under uncertainty: Heuristics and bias», en *Science*, vol. 185, n.º 4:157, pp. 1124-1121.



Nancy H. Chau
Cornell University

Nancy H. Chau es profesora de Economía en la Charles H. Dyson School of Applied Economics and Management. Sus áreas de investigación principales son tres: comercio internacional, economía regional y desarrollo económico. Ha recibido hace poco la beca de investigación Alexander von Humboldt y el primer premio W. Schultz de la Asociación Internacional de Economía Agrícola. Es miembro del Center for Development Research, investigadora del Institute for the Study of Labor (IZA Bonn) y miembro de un panel de expertos de la Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos en Naciones Unidas. La profesora Chau ha publicado numerosos artículos en revistas como *Economic Journal*, *International Economic Review*, *Journal of Development Economics*, *Journal of Economic Growth*, *Journal of Economic Theory*, *Journal of Labor Economics*, *Journal of Public Economics*, *Journal of Public Economic Theory* y *World Bank Economic Review*.



Ravi Kanbur
Cornell University

Ravi Kanbur es investigador y profesor de economía del desarrollo, políticas económicas públicas y teoría económica. Conocido por su papel en análisis de políticas y por su compromiso con el desarrollo internacional, ha ocupado cargos de responsabilidad en el Banco Mundial, incluido el de economista jefe para África. Ha publicado en las principales revistas de economía, entre ellas: *Journal of Political Economy*, *American Economic Review*, *Review of Economic Studies*, *Journal of Economic Theory* y *Economic Journal*. Entre los cargos que ha ejercido o ejerce figuran el de presidente de la Asociación sobre Desarrollo y Capacidades Humanas, presidente del Instituto Mundial de Investigaciones Económicas para el Desarrollo de la Universidad de la ONU, copresidente del consejo científico del Panel Internacional para el Progreso Social, miembro del grupo de expertos en Medición del Rendimiento Económico de la OCDE, presidente de la Sociedad para el Estudio de la Desigualdad Económica, miembro del alto Consejo Asesor del Diálogo de Justicia Climática y del grupo central de la Comisión sobre Pobreza Global.

Libro recomendado: Basu, Arnab K. y Chau, Nancy H. (2017): *Contributions to the Economics of International Labor Standards* [Contribuciones a la economía de los estándares laborales internacionales], Nueva Jersey, World Scientific Publishing Co.

Este artículo plantea una visión general del pasado, el presente y el futuro del desarrollo económico que empieza con la conceptualización, definición y medición del desarrollo económico y subraya que centrarse exclusivamente en el factor económico no sirve para explicar el desarrollo; ni siquiera, por paradójico que parezca, el de tipo económico. A continuación se exponen aspectos clave del progreso económico y humano de los últimos setenta años y se describe el panorama actual. Para terminar, se examina el futuro del desarrollo económico, con hincapié en las dificultades a que se enfrentan los países en desarrollo, sobre todo las oportunidades y los peligros derivados del reciente descenso global de la participación del trabajo en la actividad económica general.



¿Qué es el desarrollo económico y cómo ha evolucionado ese concepto a lo largo de los años? Se diría que su componente meramente económico es relativamente fácil de comprender. A buen seguro, la forma habitual de medir un crecimiento sostenido de la renta per cápita constituye una base conceptual y real sólida. Sería muy curioso describir el desarrollo económico en función de una disminución de la renta per cápita. Sin embargo, el incremento de este indicador, aunque necesario, no basta en modo alguno para hablar de desarrollo, ni siquiera de desarrollo económico.

Es lógico que la distribución de este incremento de renta entre la población se encuadre en el ámbito del desarrollo económico. Dos elementos esenciales de esta distribución son la desigualdad y la pobreza. Si la renta media se incrementa, pero también crece la desigualdad en su distribución, la perspectiva igualitaria calificará de negativo este último aspecto del desarrollo económico. Si también crece la pobreza, es decir, la cantidad de personas cuya renta se sitúa por debajo de un nivel aceptable, esto supondrá otra nota negativa, que contrastará con la creciente renta media a la hora de evaluar el desarrollo económico. Como es lógico, la verdadera repercusión que este tenga sobre la pobreza dependerá de la interacción entre renta media y desigualdad y de cuál de las dos fuerzas se imponga empíricamente.

Sin embargo, identificar el desarrollo económico solo con la renta es una concepción demasiado restrictiva. Seguramente también sean relevantes otros aspectos del bienestar. Por ejemplo, la educación y la salud son elementos que van más allá de la renta. Constituyen por sí solos importantes indicadores del bienestar, aunque influyan en la renta y se vean influidos por ella. Un elevado nivel de renta puede proporcionar una población formada y sana, pero una población formada y sana también contribuye a un elevado nivel de renta. En consecuencia, cualquier evaluación del desarrollo, e incluso del desarrollo económico, tendrá que tener en cuenta una gama más amplia de medidas del bienestar, no solo la renta y su distribución. También son importantes la educación y la salud, así como su distribución entre la población.

La distribución no solo tiene que ver con la desigualdad entre individuos. También es esencial considerar la desigualdad entre grupos definidos por ciertos rasgos generales. La desigualdad de género socava el desarrollo económico, ya que prescinde del potencial de la mitad de la población. En consecuencia, hay que tratar de mejorar los indicadores de desigualdad de género, porque son importantes en sí mismos y también por las aportaciones que hacen al crecimiento económico y a la forma de afrontar la desigualdad económica. Del mismo modo, las desigualdades entre grupos étnicos y regionales avivan la tensión social e influyen en las condiciones que rodean la inversión, con lo que también afectan al crecimiento económico. Es difícil separar estas dimensiones en apariencia no económicas de las estrictamente económicas. En consecuencia, el desarrollo económico también está relacionado con una concepción más general del desarrollo.

Si nos fijamos solo en indicadores que miden los ingresos procedentes de las rentas del trabajo y del capital perdemos de vista la utilización de recursos que el mercado no valora adecuadamente. De ellos, el más importante es el medio ambiente, sobre todo teniendo en cuenta las emisiones de efecto invernadero y el cambio climático. El incremento de la renta nacional, tal como suele medirse, no incorpora el precio que tiene la pérdida de recursos medioambientales insustituibles de índole nacional, ni, en el caso del cambio climático, medidas irreversibles que generan riesgos catastróficos para nuestro planeta.

La comunidad internacional ha adoptado una concepción más global del desarrollo, primero a través de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) de 2000, y después mediante



los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de 2015. Los ocho ODM se ampliaron y modificaron hasta quedar en 17 ODS, que incluyen medidas económicas convencionales como el crecimiento de la renta y la pobreza de ingresos, pero también indicadores como la desigualdad, las disparidades de género y la degradación medioambiental (Kanbur, Patel y Stiglitz, 2018). De hecho, la cristalización y el asentamiento de esta concepción general del desarrollo, e incluso del desarrollo económico, ha sido uno de los indudables avances intelectuales de la última década, y sin duda apunta en la dirección de una «nueva ilustración» respecto a la evaluación de las trayectorias de éxito. Pero, ¿cuáles han sido estas trayectorias en las siete décadas transcurridas desde la Segunda Guerra Mundial? De ello se ocupa el siguiente apartado.

El pasado¹

Las seis décadas posteriores al final de la Segunda Guerra Mundial, hasta la crisis de 2008, fueron una época dorada desde la estricta perspectiva del desarrollo económico, de la renta per cápita real (o el producto interior bruto, PIB). Entre 1950 y 2008 aquella se multiplicó por cuatro en el conjunto del mundo. A modo de comparación, digamos que antes de este periodo hicieron falta mil años para que el PIB per cápita mundial se multiplicara por 15. Entre los años 1000 y 1978, la renta per cápita de China se multiplicó por dos, pero en los treinta años siguientes se multiplicó por seis. La de la India se multiplicó por cinco desde su independencia en 1947, después de haberse incrementado solo el 20% en el milenio anterior. Sin duda, la crisis de 2008 supuso una grave mella para la tendencia a largo plazo, pero no fue más que eso. Aun teniendo en cuenta el acusado descenso de la producción que generó la crisis, el crecimiento económico posterior a la Segunda Guerra Mundial resulta espectacular si se compara con lo logrado en los mil años anteriores.

Pero, ¿qué podemos decir sobre la distribución de la renta y, en concreto, de las rentas de los más pobres? ¿Llegaron de verdad a participar de ese crecimiento medio? En este caso no disponemos de datos tan antiguos como los de renta media. De hecho, solo contamos con información razonablemente fiable sobre las últimas tres décadas. Sin embargo, según los cálculos de Banco Mundial, que sitúan la línea de pobreza en 1,90 dólares (en paridad del poder adquisitivo) por persona y día, en 2013 vivía en la pobreza algo más de un cuarto de la población mundial que la sufría en 1981, el 11% frente al 42% anterior. Los países más poblados del mundo —China, la India, pero también Vietnam, Bangladesh y otros— han contribuido a esta reducción sin precedentes de la pobreza mundial. De hecho, se ha apuntado que el comportamiento a este respecto de China, donde cientos de millones de personas han superado el nivel de la pobreza en las últimas tres décadas, ha constituido el proceso de reducción de la pobreza más espectacular de la historia de la humanidad.

Sin embargo, en la historia del periodo de posguerra no solo hay incrementos de rentas y reducción de la pobreza de ingresos. Los promedios mundiales de los indicadores sociales también han registrado una drástica mejora. El índice de finalización de la educación primaria ha pasado de poco más del 70% en 1970 al 90%, ahora que nos acercamos al final de la segunda década del siglo XXI. En el último cuarto de siglo, la mortalidad materna se ha reducido a la mitad, pasando de 400 a 200 muertes por cada 100.000 niños que nacen vivos. En la actualidad, la mortalidad infantil representa un cuarto de la que había hace medio siglo (30 muertes frente a 120 por cada 1.000 nacidos vivos). Estas mejoras de los índices de mortalidad han contribuido a aumentar la esperanza de vida, que ha pasado de cincuenta años en 1960 a setenta en 2010.



El porcentaje de la población mundial que vivía en la pobreza en 2013 ha caído un cuarto respecto al porcentaje de 1981: del 42% al 11%

Un barrio de pescadores de Bombay, donde los suburbios están cambiando su imagen gracias a una organización que busca mejorar las condiciones de vida de los desfavorecidos de la capital financiera de la India. Junio de 2018



**La comunidad internacional
adoptó una concepción más
global del desarrollo, a través
de los Objetivos de Desarrollo
del Milenio (ODM) de 2000**

Sesión inaugural en la sede de Naciones Unidas de Nueva York de la Cumbre del Milenio, 6 de septiembre de 2000. En la imagen, la mesa de presidencia (de izq. a dcha.): el entonces secretario general de la ONU, Kofi Annan, y los copresidentes Tarja Halonen (Finlandia) y Sam Nujoma (Namibia)



Centrarse solo en la renta, la salud y la educación oculta otra gran tendencia mundial observada desde la guerra. Esta ha sido verdaderamente una época de descolonización. La pertenencia a la ONU se disparó al irse incrementando el número de colonias que se independizaba políticamente de las potencias coloniales: se pasó de alrededor de 50 miembros en 1945 a más de 150 tres décadas después. Al mismo tiempo se produjo un aumento constante del número de democracias, y después de la caída del muro de Berlín la efusión ha sido todavía mayor, ya que casi 20 países han entrado en el redil democrático. A estas tendencias generales y bien cuantificadas podríamos añadir otras, más difíciles de constatar; por ejemplo, la relativa a la participación política de la mujer.

En vista del historial de espectaculares éxitos mundiales, ¿qué nos va a impedir proclamar victoria en materia de progreso humano? La respuesta es que no podemos declamar tal cosa, porque los buenos promedios mundiales, aun siendo positivos, pueden ocultar alarmantes tendencias adversas. Hay países de África sumidos en conflictos que ni siquiera tienen datos de crecimiento dignos, ni desde luego crecimiento económico. También en África, en los países de los que sí tenemos datos, aunque el porcentaje de población pobre ha ido disminuyendo, en términos absolutos el número de pobres ha aumentado en casi 100 millones de personas durante el último cuarto de siglo a consecuencia del crecimiento demográfico.

Un caso similar, con dos vertientes, es el que presenta la desigualdad de renta en el mundo. Se puede decir que la desigualdad entre todos los habitantes del planeta se compone de dos elementos. El primero se expresa en las rentas medias de los países y plasma el desfase entre países ricos y pobres. El segundo indica la desigualdad que hay dentro de cada país, a su vez relacionada con la media de ingresos. Si tenemos en cuenta el rápido crecimiento que han experimentado grandes países muy pobres como la India o China en comparación con países más ricos como Estados Unidos, Japón y los europeos, podemos decir que la desigualdad entre países ha disminuido. Más complejo es el panorama dentro de cada país, pero el acusado incremento de la desigualdad en Estados Unidos, Europa y China indica que, en conjunto, las desigualdades internas han aumentado. Si combinamos esos dos indicadores, se aprecia que, en términos generales, la desigualdad mundial se ha reducido (Lakner y Milanovic, 2016). La importancia de la desigualdad entre naciones ha mermado de forma drástica, ya que hace un cuarto de siglo suponía cuatro quintos de la desigualdad general. Sin embargo, su aportación sigue superando los tres cuartos del total mundial. Estos dos rasgos, la creciente desigualdad interna en los grandes países en desarrollo y el peso todavía descomunal que tiene la desigualdad entre países en la desigualdad mundial son la otra cara de esa moneda que, en las tres últimas décadas, presenta una media de crecimiento positivo en el conjunto de los países en desarrollo.

La desigualdad entre los habitantes del planeta se compone de dos elementos: el primero se expresa en las rentas medias de los países y plasma el desfase entre países ricos y pobres; el segundo indica la desigualdad que existe en cada país, relacionada con la media de ingresos

Sin embargo, el aumento de la renta, si se produce a costa del deterioro medioambiental, yerra al medir la mejora del bienestar humano. La emisión de partículas contaminantes se ha incrementado en el 10% durante el último cuarto de siglo, con todo lo que esto supone para la salud. El porcentaje de población mundial que sufre estrés hídrico prácticamente



se ha duplicado en el último medio siglo y durante ese mismo periodo se ha observado una reducción constante de la superficie forestal mundial. Las emisiones de gases de efecto invernadero globales han pasado de menos de 40 gigatoneladas a una cifra equivalente a 50 gigatoneladas en el último cuarto de siglo. De seguir las tendencias actuales, el calentamiento global se plasmaría en torno a un incremento de 4 °C al llegar 2100, muy por encima del nivel seguro que supondría un aumento de 1,5 °C. Las consecuencias del calentamiento global ya han comenzado a apreciarse en la mayor incidencia de fenómenos climáticos extremos.

Así pues, las últimas siete décadas han sido una verdadera edad de oro para el desarrollo económico en ciertos aspectos, incluso para el desarrollo medido en general. Pero no es oro todo lo que reluce. Las tendencias ocultan procesos muy preocupantes que han comenzado a mostrar sus consecuencias y que están modelando el panorama de desarrollo que tenemos por delante. En el siguiente apartado abordamos este asunto centrándonos en el desarrollo económico actual.

El presente

Por supuesto, el presente del discurso sobre desarrollo económico lo conforman las tendencias del pasado lejano y reciente. Un interesante e importante rasgo del panorama actual es el cambio registrado en la geografía global de la pobreza. Según las definiciones habituales, hace cuarenta años el 90% de los pobres del mundo vivía en países de renta baja. Hoy en día, tres cuartos de los pobres del planeta viven en países de renta media (Kanbur y Sumner, 2012). El rápido crecimiento de algunos países grandes, acompañado de una creciente desigualdad interna, supone que los incrementos de la renta media no se hayan reflejado en la misma medida en la reducción de la pobreza. De manera que, aunque esos países ya han cruzado la frontera que los separaba de la categoría de países de renta media, que depende del promedio respecto a los ingresos, en términos absolutos siguen teniendo una enorme cantidad de pobres. Los de los países de renta media compiten con los pobres de los países pobres por el interés y la atención mundiales.

Esta desconexión entre la pobreza individual y la pobreza nacional está perturbando el sistema de asistencia global al desarrollo, que se basaba en la idea de que el grueso de los pobres del mundo vivía en países pobres. Así se aprecia en los criterios de «exclusión de la categoría de países menos avanzados» que utilizan la mayoría de los organismos de ayuda, y en función de los cuales la ayuda se reduce drásticamente y se interrumpe cuando la renta media de un país supera cierto umbral, por lo común el de acceso a la categoría de país de renta media. Este enfoque suscita la pregunta planteada por Kanbur y Sumner (2012): ¿hay que hablar de «países pobres o de gente pobre?». En líneas generales, la respuesta ha sido atenerse al patrón de la renta media. Lo cual ha conducido al establecimiento de una dicotomía, que cada vez se agudizará más, entre países muy pobres, con frecuencia assolados por conflictos, y países de renta media, en los que ahora vive el grueso de los pobres de la Tierra. De manera que, si la política de créditos blandos del Banco Mundial se atiene a esos criterios, en realidad se desentenderá de la inmensa mayoría de los pobres del mundo, centrándose solo en los países más pobres. Este desentendimiento es complicado de justificar desde un punto de vista ético, pero también es difícil de comprender si tenemos en cuenta que los países de renta media también son origen de problemas medioambientales mundiales y, en algunos casos, de migraciones originadas por conflictos.

Las migraciones, tanto las resultantes de conflictos como las económicas, nos llevan a otro importante rasgo del panorama actual del desarrollo económico que emana de tendencias



Ben Bernanke, presidente de la Reserva Federal de Estados Unidos entre 2006 y 2014, en una charla con alumnos de último año de la Universidad de Harvard, Cambridge, Massachusetts, junio de 2008





históricas y que sin duda tendrá repercusiones globales en el futuro. El aumento de la desigualdad en los países ricos ha coincidido con una mayor presión migratoria desde los países pobres. A pesar del estrechamiento de la brecha entre países ricos y pobres que ha producido el rápido crecimiento de algunos de estos últimos, la brecha sigue siendo enorme, en promedio y, sobre todo, en el caso de los países más pobres que no han crecido tan rápido. A estos desfases han contribuido las presiones generadas por conflictos armados y el agravamiento del estrés medioambiental.

El vaciado de la clase media en los países ricos ha coincidido con un aumento de las migraciones, lo cual ha intoxicado los sistemas democráticos en esos países, impulsando las tendencias de extrema derecha, chovinistas y xenófobas en el cuerpo político (Kanbur, 2018). La elección de Trump, el referéndum del Brexit o la entrada de Alternativa por Alemania en el parlamento germano son solo algunas de las manifestaciones externas más evidentes del malestar político actual. Y tampoco es este un problema exclusivo de los países ricos. Las turbas antinmigrantes de Sudáfrica y el conflicto étnico en países como Myanmar forman parte de la misma pauta de tensiones generadas por la emigración que tiñen el desarrollo económico de hoy en día.

Está claro que en el panorama del desarrollo económico actual ha influido la crisis financiera de 2008. Más recientemente, la crisis global ha resultado perjudicial para las mejoras en el desarrollo, aunque se puede decir que las pérdidas se han concentrado sobre todo en los países ricos. Sin embargo, las reacciones y retrocesos que ahora se observan en estos están teniendo y tendrán también consecuencias para el desarrollo económico de los países pobres. Es más, la génesis de la crisis puso de relieve las fracturas existentes en el modelo económico aplicado por los países ricos, basado en una desregulación generalizada de los mercados y, sobre todo, de la banca y los flujos de capital.

La situación actual y los debates que suscita nos retrotraen a la evolución intelectual posterior a la caída del Muro de Berlín en 1989. Es preciso recordar que, según una famosa afirmación del momento, todos esos acontecimientos señalaban «el fin de la historia» (Fukuyama, 1989), con lo que se quería decir que la democracia liberal y el libre mercado habían ganado la batalla ideológica. Sin embargo, como señaló Kanbur (2001), «el fin de la historia duró muy poco». La crisis financiera de 1997, surgida de los mercados de capital recién liberalizados de Extremo Oriente, supuso una llamada de atención. La crisis de 2008, también financiera, y nacida en los mercados desregulados de Estados Unidos y Europa, condujo a la peor depresión mundial desde la década de 1930.

El conjunto del mundo está comenzando a recuperarse de esta catástrofe. Su efecto sobre el pensamiento económico ha sido saludable. Es bien sabido que la reina de Inglaterra preguntó a los economistas británicos por qué no la habían visto venir. La respuesta de Timothy Besley y Peter Hennessy fue la siguiente: «En resumen, Su Majestad, la incapacidad para predecir el momento, la magnitud y la gravedad de la crisis y para atajarla, aunque tuvo múltiples causas, se debió principalmente a la incapacidad de la imaginación colectiva de mucha gente brillante, tanto en este país como en otros, para comprender los peligros que corría el conjunto del sistema» (citado en Kanbur, 2016). Sin embargo, los peligros para el conjunto del sistema los agravó a comienzos del siglo XXI la posición desreguladora de unos políticos que todavía se regodeaban en el discurso del «fin de la historia» con el que había acabado el milenio anterior. Esperemos que las lecciones de la devastadora crisis de 2008 no se olviden a medida que sigamos avanzando.

En consecuencia, la crisis de 2008 descansa en los aspectos negativos de las tendencias identificadas en el apartado anterior, los agudiza, y conforma las perspectivas presentes y futuras. De estas últimas nos ocupamos en el apartado siguiente.



El pasado y el presente del desarrollo económico sientan las bases del futuro a largo plazo. No cabe duda de que la degradación medioambiental y el cambio climático empeorarán las perspectivas de desarrollo y agudizarán los conflictos y las tensiones ambientales relacionadas con la emigración. De los problemas aquí planteados ya se han ocupado adecuadamente los textos académicos (ver, por ejemplo, Kanbur y Shue, 2018). Y las acciones que se precisan están más o menos claras: el problema radica más bien en si hay voluntad política para llevarlas a cabo.

Al margen de los desafíos que plantean el cambio climático y la degradación ambiental, desde la década de 1980 ha surgido otro problema importante: la reducción en todo el mundo de la participación de las rentas del trabajo en el producto interior bruto (PIB) de las naciones, o en el total de las rentas empresariales. Esta tendencia descendente mundial queda patente tanto si observamos datos macroeconómicos (Karababounis y Neiman, 2013; Grossman *et al.*, 2017) como si tenemos en cuenta datos de las empresas (Autor *et al.*, 2017). La reducción del peso de este indicador en el PIB es un síntoma de que el conjunto del crecimiento económico está creciendo más que el monto total de las rentas del trabajo. Entre finales de 1970 y la década de 2000 la participación del trabajo en el PIB se ha reducido en casi cinco puntos, pasando del 54,7% al 49,9% en las economías avanzadas. En 2015, la cifra se recuperó ligeramente, situándose en el 50,9%. En los mercados emergentes, la participación del trabajo en el PIB también se ha reducido, pasando del 39,2% al 37,3% entre 1993 y 2015 (FMI, 2017). La incapacidad de articular respuestas políticas adecuadas y coordinadas ante estos procesos puede tener preocupantes repercusiones para el desarrollo económico futuro. De hecho, la reducción del peso de las rentas del trabajo en el PIB, a pesar del desarrollo económico generalizado, a menudo se considera el combustible que ha extendido el fuego de las reacciones antinmigración y antiglobalización en los últimos años, amenazando con invertir la tendencia de décadas de progreso basadas en la liberalización del comercio y del mercado de capitales en todo el mundo.

Es preciso señalar que la participación de las rentas del trabajo en el PIB y la desigualdad de rentas van irremisiblemente unidas. De hecho, el primer indicador se suele utilizar para medir el segundo (por ejemplo, Alesina y Rodrik, 1994). La comprensión de las fuerzas que determinan el peso de las rentas del trabajo en el PIB ha sido un aspecto de especial importancia para el panorama del desarrollo económico. De hecho, esa búsqueda ha orientado durante décadas las investigaciones sobre el comercio y la economía del desarrollo, y durante esa época se han definido las fuerzas de la globalización y sus múltiples y matizadas repercusiones sobre el peso de las rentas del trabajo en el PIB (Bardhan, 2006; Bourguignon, 2017).

Sin embargo hay buenas razones para pensar que los modelos económicos al uso no suelen ofrecer pronósticos que encajen con la pauta actual de reducción del peso de las rentas de trabajo en la economía global. Sobre todo porque detrás del velo de la reducción de la participación de ese indicador en el PIB mundial se esconde una enorme diversidad subyacente, en el sentido del cambio en la participación de las rentas del trabajo en cada nación, y en la que las economías emergentes y las avanzadas se sitúan en extremos opuestos (Karababounis y Neiman, 2013). Estas observaciones van en contra del pronóstico canónico de los modelos económicos basados en presupuestos como la evolución constante de la tecnología, la competencia perfecta y la ausencia de anomalías en el mercado. Partiendo de dichos presupuestos, el pronóstico habitual es que los trabajadores de países con una relativa abundancia de mano de obra se beneficiarán abiertamente de la participación en el comercio mundial, tanto en términos absolutos como en relación con los propietarios de otros factores productivos. Sin embargo, muy por el contrario, después de asumir el papel de principal fábrica del mundo,



China ha experimentado una de las tasas de reducción del peso de las rentas del trabajo en el PIB más apreciables de las registradas desde 1993 (FMI, 2017).

No cabe duda de que la búsqueda de nuevas fuerzas que puedan estar influyendo en estos procesos está justificada.² Para alcanzar este fin, podemos decir que la trayectoria del peso de las rentas del trabajo en el mundo se sitúa en la confluencia de tres grandes transformaciones de los rasgos que definen a las economías en desarrollo y desarrolladas. Son las siguientes: (i) la adopción de cambios tecnológicos que ahorran mano de obra, (ii) el cambio en la importancia que tiene el empleador en el mercado, y (iii) la creciente prevalencia de formas de empleo alternativas en el mercado de trabajo.

Las innovaciones tecnológicas que ahorran mano de obra constituyen un motor clave para la reciente reducción de la participación del trabajo en el PIB mundial (FMI, 2017). Son muchas las razones para que las empresas y los productores adopten esos cambios, entre ellos la disminución del precio de los bienes de inversión y de las tecnologías de la información (Karababounis y Neiman, 2013) y la llegada de la robótica a los procesos fabriles (Acemoglu y Restrepo, 2018). Las economías avanzadas ya no ostentan el monopolio de la adopción de innovaciones que ahorran mano de obra. De hecho, según los últimos cálculos, China ha introducido en las fábricas más robots que ningún otro país (Bloomberg News, 2017). Con todo, no se puede presuponer que las innovaciones tecnológicas que ahorran mano de obra incidan siempre en las rentas del trabajo, ya que tal supuesto yuxtapone el incremento general de la productividad emanado de la utilización de cambios técnicos que ahorran mano de obra a sus posibles consecuencias adversas para el desempleo. En última instancia, el hecho de que los trabajadores se beneficien de innovaciones tecnológicas que ahorran mano de obra dependerá de la rapidez con la que el incremento de la productividad se traduzca en mejoras salariales (Acemoglu y Autor, 2011; Acemoglu y Restrepo, 2018; Chau y Kanbur, 2018).

En la década de 1980 surgió un problema importante: la reducción en todo el mundo de la participación de las rentas del trabajo en el producto interior bruto (PIB) de las naciones o en el conjunto de las rentas empresariales

Aquí es donde nuevas investigaciones podrían cosechar beneficios considerables y mejorar nuestra comprensión sobre el funcionamiento de los mercados de países en desarrollo y sobre cómo responden a las sacudidas. Ya se han identificado algunos factores importantes a este respecto. Entre ellos, las distorsiones en el mercado laboral, que pueden sesgar la toma de decisiones respecto al cambio tecnológico (Acemoglu y Restrepo, 2018) y promover fricciones en el mercado de trabajo, con lo que dicho cambio podría suscitar complejas reacciones distributivas (Chau y Kanbur, 2018). Por otra parte, hay que desarrollar y poner en marcha políticas de respuesta a las innovaciones tecnológicas que ahorran mano de obra, entre ellas quizá inversiones públicas en investigación, para crear tecnologías que utilicen la fuerza de trabajo con eficiencia (Atkinson, 2016; Kanbur, 2018).

Además de las diferencias nacionales o de mercado que presenta la participación del trabajo, los últimos datos sobre las empresas han generado multitud de estudios que demuestran que el poder del empleador en el mercado puede ocasionar diferencias sistémicas en la participación del trabajo en empresas de diversos niveles de productividad (por ejemplo, Melitz y Ottaviano, 2008). A estas alturas ya es bien sabido que la globalización favorece de manera



desproporcionada a las empresas de alta productividad. En los últimos años, la aparición en Estados Unidos de empresas superestrella, claramente propensas a adoptar tecnologías que ahorran mano de obra, supone un excelente ejemplo de cómo los cambios en la organización industrial pueden repercutir en el conjunto de la participación del trabajo en el PIB (Autor *et al.*, 2017). El poder del empleador en el mercado también se ha convertido en una realidad en los mercados emergentes (por ejemplo, Brandt *et al.*, 2017). Cuando hay desarrollo económico y las grandes empresas cobran más importancia, ¿favorece esto de manera desproporcionada la adopción de tecnologías que ahorran mano de obra? (Zhang, 2013). ¿O acaso valoran esas empresas la motivación del trabajador y abonan mayores salarios? (Basu, Chau y Soundararajan, 2018). Estamos ante cuestiones esenciales que pueden promover el desarrollo de todo un abanico de posibles políticas, que van, por ejemplo, desde la conveniencia de que existan salarios mínimos que faciliten a los trabajadores la labor de alcanzar mejores acuerdos salariales hasta la utilización de medidas que favorezcan la competencia como herramientas para el desarrollo económico.

La aparición de empresas superestrella, propensas a adoptar tecnologías que ahorran mano de obra, son el ejemplo de cómo los cambios en la organización industrial pueden repercutir en el conjunto de la participación del trabajo en el PIB

Importantes procesos registrados en las instituciones que regulan el mercado de trabajo en los países emergentes han contribuido a acentuar estos cambios en las tecnologías y la organización industrial. Los contratos laborales actuales ya no responden al marco clásico, caracterizado por la dicotomía entre empleador- trabajador en la que se basan muchas posibles políticas. Por el contrario, ahora los trabajadores se enfrentan a negociaciones salariales condicionadas por contratos a plazo fijo o temporales. Por otra parte, los contratos laborales están cada vez más sujetos a las ambigüedades que generan relaciones entre empleadores múltiples y en las que los trabajadores deben responder, tanto a los encargados de sus fábricas como a infinidad de intermediarios subcontratistas. Estos procesos han creado desigualdades salariales dentro del sistema, de manera que los trabajadores a plazo fijo y subcontratados ganan bastante menos que los trabajadores corrientes, además de apenas disfrutar de prestaciones extrasalariales. Curiosamente, ahora la mejora de las oportunidades laborales puede generar incrementos salariales escasos e incluso negativos, ya que la composición contractual de los trabajadores cambia cuando aumenta el empleo. Esta situación puede generar una espiral descendente en la motivación del trabajador (Basu, Chau y Soundararajan, 2018). Estos procesos apuntan a un declive de la participación del trabajo en el PIB generado por cambios contractuales en el mercado laboral que, en última instancia, puede tener consecuencias perjudiciales para la pauta general del progreso económico. Los intentos de solución de las desigualdades salariales entre trabajadores de una misma empresa constituyen un incipiente objeto de estudio (Freeman, 2014; Basu, Chau y Soundararajan, 2018), y lo interesante de esta situación es que estamos ante una serie de circunstancias en las que las políticas de reducción de la desigualdad, al incrementar la moral de los trabajadores, podrían acabar incrementando también la eficiencia global.

Comenzamos este capítulo subrayando la importancia que tienen tanto los avances económicos generales como la desigualdad de renta a la hora de medir el desarrollo. Nuestro breve



Momentos previos al anuncio de un producto de Apple en su nueva sede de Cupertino, California, el 12 de septiembre de 2018, un año después de lanzar su iPhone X, el *smartphone* más caro del mercado





repasso al panorama futuro del desarrollo económico arroja luz sobre la importancia capital que tiene aunar múltiples perspectivas para comprender hasta qué punto hay interacción entre esas dos medidas. Ese enfoque abre la puerta a herramientas novedosas (por ejemplo, políticas de competencia y tecnológicas), nuevas razones para la (no)intervención (como en el caso de las consecuencias que tienen para la moral las desigualdades salariales) y quizá algo igual de importante: nuevos marcos políticos en los que la equidad y la eficiencia no sean mutuamente excluyentes.

Conclusión

Al volver la vista atrás a las siete décadas transcurridas desde el final de la Segunda Guerra Mundial, observamos que el desarrollo económico presenta una serie de contradicciones. Se han producido aumentos nunca vistos en la renta per cápita y muchos países grandes han cruzado el umbral entre la renta baja y la media. Esos incrementos de renta han ido acompañados de mejoras también inéditas en la pobreza de ingresos y en los indicadores de educación y sanitarios.

Sin embargo, al mismo tiempo, la mecánica del desarrollo, su sostenibilidad y sus repercusiones para la economía global suscitan una inquietud patente. A pesar del rápido aumento de la renta en los países más pobres, sigue habiendo grandes desfases entre estos países y los ricos. Esto, unido a los conflictos y las tensiones medioambientales, ha producido presiones migratorias, sobre todo en los países más ricos, pero también en los países en desarrollo más acomodados. La conjunción de las presiones migratorias y la creciente desigualdad ha generado un tóxico incremento del populismo antiliberal que está poniendo en peligro los avances democráticos posteriores a la Segunda Guerra Mundial.

Aunque aquí nos hayamos referido con frecuencia al cambio medioambiental y climático, y también al crecimiento de la desigualdad en general, hemos subrayado la especial relevancia que, como amenaza constante para el desarrollo económico, tiene un factor en concreto. La decreciente participación del trabajo en la economía no dejará de acentuarse y, a menos que se contrarreste con políticas muy decididas, en las próximas décadas pondrá en peligro el desarrollo inclusivo.

También hemos subrayado cómo ha respondido el pensamiento económico a las fuerzas de cambio subyacentes. El concepto de desarrollo se ha ampliado hasta desbordar lo meramente económico. También se han analizado las raíces de la gran crisis financiera de finales de la primera década del nuevo milenio, de la que cabe esperar que se hayan aprendido algunas lecciones. Y la atención se está desplazando hacia la interpretación de la inexorable decadencia de la participación del trabajo en la economía. Solo el desarrollo que se registre en las próximas décadas nos dirá si todo esto equivale a una Nueva Ilustración para el pensamiento económico.

Notas

1. Este apartado se basa en gran medida en los datos y las fuentes que figuran en el capítulo 1 de Fleurbaey *et al.*, 2018.
2. En el presente artículo nuestro análisis de la bibliografía sobre el peso mundial de las rentas del trabajo en el PIB ha de ser necesariamente selectiva. Ver Grossman *et al.*, 2017 para conocer un notable contrapunto en el que una ralentización de la producción mundial, en un contexto caracterizado por la complementariedad entre el capital y las capacidades y la acumulación del capital humano endógeno, también puede dar lugar a un descenso global de la participación de las rentas del trabajo en el PIB.

Bibliografía

- Acemoglu, Daron y Restrepo, Pascual (2018): «The race between man and machine: implications of technology for growth, factor shares and employment», en *American Economic Review*, vol. 108, n.º 6, pp. 1488-1542.
- Acemoglu, Daron y Autor, David (2011): «Skills, tasks and technologies: implications for employment and earnings», en Orley Ashenfelter y David Card (eds.), *Handbook of Labor Economics*, vol. 4, Ámsterdam, Elsevier-North, pp. 1043-1171.
- Alesina, Alberto y Rodrik, Dani (1994): «Distributive politics and economic growth», en *Quarterly Journal of Economics*, n.º 109, pp. 465-490.
- Atkinson, Anthony B. (2016): *Inequality: What Can be Done?*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Autor, David; Dorn, David; Katz, Lawrence; Patterson, Christina y Van Reenen, John (2017): «The fall of the labor share and the rise of superstar firms», *NBER Working Paper*, n.º 23396.
- Bardhan, Pranab (2006): «Does Globalization help or hurt the world's poor?», en *Scientific American*, marzo.
- Basu, Arnab K.; Chau, Nancy H. y Soundararajan, Vidhya (2018): «Contract employment as a worker discipline device», *IZA Discussion Paper*, n.º 11579.
- Bloomberg News (2017): «China's robot revolution may affect the global economy—automation impact on wages isn't showing in the data—yet». Disponible en <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-08-22/china-s-robotrevolution-may-weigh-on-globalrebalancing> [consultado el 19/09/2018].
- Brandt, Loren; Van Beisebroeck, Johannes; Wang, Luhang y Zhang, Yifan (2017): «WTO Accession and performance of chinese manufacturing firms», en *American Economic Review*, n.º 107, pp. 2.784-2.820.
- Bourguignon, François (2017): *The Globalization of Inequality*, Nueva Jersey, Princeton University Press.
- Chau, Nancy y Kanbur, Ravi (2018): «Employer power, labor saving technical change, and inequality», *Dyson Working Paper*, Cornell University, abril.
- Fleurbaey, Marc; Bouin, Olivier; Salles-Djelic, Marie-Laure; Kanbur, Ravi; Nowotny, Helga y Reis, Elisa (2018): *A Manifesto for Social Progress*, Cambridge, Cambridge University Press.
- FMI (2017): *World Economic Outlook 2017*, Fondo Monetario Internacional, Washington D.C.
- Freeman, Richard B. (2014): «The subcontracted labor market», en *Perspectives on Work*, n.º 18, pp. 38-41.
- Fukuyama, Francis (1989): «The end of history?», en *The National Interest*, n.º 16, pp. 3-18. [consultado el 19/09/2018].
- Grossman, Gene M.; Helpman, Elhanan; Oberfield, Ezra y Sampson, Thomas (2017): «The productivity slowdown and the declining labor share: a neoclassical exploration», *NBER Working Paper*, n.º 23853.
- Kanbur, Ravi (2001): «Economic policy, distribution and poverty: the nature of disagreements», en *World Development*, vol. 29, n.º 6, pp. 1083-1094.
- (2016): «The end of laissez faire, the end of history and the structure of scientific revolutions», en *Challenge*, vol. 59, n.º 1, pp. 35-46.
- (2018): «Inequality and the openness of borders», *Dyson Working Paper*, Cornell University, octubre.
- Kanbur, Ravi; Patel, Ebrahimy Stiglitz, Joseph (2018): «Sustainable development goals and measurement of economic and social progress», *Dyson Working Paper*, Cornell University, diciembre.
- Kanbur, Ravi y Shue, Henry (eds.) (2018): *Climate Justice: Integrating Economics and Philosophy*, Oxford, Oxford University Press.
- Kanbur, Ravi y Sumner, Andy (2012): «Poor countries or poor people? Development assistance and the new geography of global poverty», en *Journal of International Development*, vol. 24, n.º 6, pp. 686-695.
- Karabarbounis, Loukas y Neiman, Brent (2013): «The global decline of the labor share», en *Quarterly Journal of Economics*, n.º 129, pp. 61-103.
- Lakner, Christoph y Milanovic, Branko (2016): «Global income distribution: from the fall of the Berlin Wall to the great recession», en *The World Bank Economic Review*, vol. 30, n.º 2, 1 de enero de 2016, pp. 203-232. Disponible en <https://doi.org/10.1093/wber/lhw039> [consultado el 19/09/2018].
- Melitz, Marc J., y Ottaviano, Gianmarco I. P. (2008): «Market size, trade and productivity», en *Review of Economic Studies*, n.º 75, pp. 295-316.
- Zhang, Hongsong (2013): «Biased technology and contribution of technological change to economic growth: firm-level evidence», reunión anual 4-6 de agosto de 2013, Washington, D.C., 150225, Agricultural and Applied Economics Association.



Vivien A. Schmidt
Boston University

Vivien A. Schmidt es profesora Jean Monnet Professor de Integración Europea y de Relaciones Internacionales y Ciencias Políticas en la Pardee School de la Universidad de Boston, donde, hasta 2017, fue directora y fundadora de su Centro para el Estudio de Europa. Los últimos reconocimientos a su trabajo incluyen ser nombrada caballero de la Legión d'honneur y una beca de la Guggenheim Foundation Fellowship para la investigación trasatlántica de la «retórica del descontento» populista. Ha sido profesora e investigadora visitante en gran número de instituciones europeas, incluidas la universidad romana LUISS, la Universidad Libre de Bruselas, el Copenhagen Business School, la Universidad Libre de Berlín, la Sciences Po de París, el European University Institute de Florencia y la Universidad de Oxford University. Entre sus últimos libro figuran *Resilient Liberalism in Europe's Political Economy* (Cambridge, coeditado con M. Thatcher, 2013), *Democracy in Europe* (Oxford, 2006) —elegido por el Parlamento Europeo como uno de los «100 libros sobre Europa a recordar»— y *The Futures of European Capitalism* (Oxford, 2002).

Libro recomendado: Levitsky, Steven y Ziblatt, Daniel (2018): *Cómo mueren las democracias*, Barcelona, Ariel.

No todo en esta «década trascendental» nos conduce hacia una nueva Ilustración. La gobernanza y la democracia en concreto se enfrentan a una serie de desafíos procedentes de la elección de líderes populistas. Estas voces de disensión pueden hablar en idiomas distintos, pero transmiten el mismo conjunto de mensajes y canalizan su indignación de maneras similares, usando estrategias retóricas que rechazan el conocimiento experto, vituperan a los medios de comunicación y satanizan a los políticos y los partidos convencionales. Estas voces de disensión, durante mucho tiempo aisladas en los márgenes, constituyen hoy una amenaza existencial al consenso tradicional sobre cómo hacer política y gestionar la economía en las democracias liberales. Ponen en peligro los compromisos institucionales y una gobernanza tolerante, equilibrada, así como las preferencias ideológicas del neoliberalismo económico por las fronteras abiertas y el libre comercio



No todo en esta «década trascendental» nos lleva a una nueva Ilustración. La gobernanza y la democracia se enfrentan a especiales desafíos. El auge de lo que a menudo se llama «populismo» constituye la máxima amenaza a la estabilidad política y la democracia desde las décadas de 1920 o 1930 (Müller, 2016; Judis, 2016; Levitsky y Ziblatt, 2018; Eichengreen, 2018).

El voto británico a la salida de la Unión Europea, seguido de la elección de Donald Trump como presidente de Estados Unidos cogió por sorpresa al mundo de la política (y a los expertos en la misma). Y aquello fue solo el principio del *tsunami* que desde entonces azota Europa continental. La victoria de Emmanuel Macron en las elecciones presidenciales francesas resultó no ser más que una tregua momentánea, después de la cual los extremismos populistas se convirtieron en mayoría en los gobiernos de Europa Central y del Este, Austria e Italia, y ganaron terreno en el resto. En algunos países, con Hungría y Polonia como casos más notables, los gobiernos populistas están socavando las instituciones fundacionales de la democracia liberal. Y con ello buscan emular el giro antidemocrático y autoritario de sus vecinos del Este, incluidos Turquía y Rusia.

Las voces de disconformidad populista hablan en muchas lenguas distintas, pero transmiten el mismo conjunto de mensajes: mensajes contra la inmigración y las fronteras abiertas, la globalización y el libre comercio, la europeización y el euro. Se nutren de las mismas fuentes: la situación económica de quienes se sienten «olvidados», la sociología de quienes preocupa «el rostro cambiante de la nación» o la política de los que buscan «recuperar el control». La mayoría también expresa su indignación de maneras similares, usando estrategias retóricas que hacen uso de lenguaje «incívico» y de las «noticias falsas» para crear contextos de «pos-verdad» que rechazan a los expertos, vituperan a los medios de comunicación establecidos y satanizan a las elites y partidos políticos convencionales. Estas voces disconformes, durante mucho tiempo aisladas en los márgenes, constituyen hoy una amenaza existencial al consenso establecido sobre cómo hacer política y gestionar la economía en las democracias liberales. Ponen en peligro los compromisos institucionales y una gobernanza tolerante, equilibrada y también las preferencias ideológicas del neoliberalismo económico por las fronteras abiertas y el libre comercio.

En resumen, durante la última década, los que durante mucho tiempo habían parecido grupos dispares de ciudadanos insatisfechos marginados de la vida política mayoritaria que apoyaban a líderes antisistema variopintos y a pequeños partidos extremistas se han unido y tomado por asalto la democracia liberal y el capitalismo democrático. La pregunta más importante, en consecuencia, es: ¿Por qué y cómo han conseguido hoy los populistas canalizar el miedo y la ira de los ciudadanos hasta acumular una influencia sin precedentes e incluso catapultar al poder a algunos de sus partidos antisistema?

El voto británico a la salida de la Unión Europea, seguido de la elección de Donald Trump como presidente de Estados Unidos cogió por sorpresa al mundo de la política. Y aquello fue solo el principio del *tsunami* que desde entonces azota Europa continental

Son muchas las respuestas potenciales. Para algunos «es por la economía, tonto», en especial después de la crisis financiera estadounidense de 2008 y de la crisis de deuda soberana de la Unión Europea en 2010. Para otros, se trata de «clamor popular» de ciudadanos que temen perder su estatus social y a quienes preocupa la inmigración. Y también hay quien considera



el auge de los populismos como consecuencia de la ineficacia de las instituciones políticas y partidos políticos convencionales, unida a la frustración política de ciudadanos que tienen la sensación de que los políticos de sus países y los tecnócratas supranacionales ni les escuchan ni atienden sus reclamaciones. Entonces ¿quién tiene razón?

Todas estas explicaciones dan pie, de hecho, a interesantes reflexiones sobre las múltiples y variadas razones del *tsunami* populista. Pero, si bien estos análisis ayudan a comprender el origen de la indignación de los ciudadanos, no explican por qué el populismo ha resurgido hoy con tanta intensidad y con formas tan distintas en tantos contextos nacionales diferentes. Para responder a por qué ahora, así y de esta manera, necesitamos escarbar más profundo en la naturaleza y el alcance del fenómeno. Esto significa tomarse en serio el contenido de las ideas y discursos populistas que defienden al «pueblo» frente a las elites, al tiempo que cuestionan la experiencia institucionalizada. Exige desentrañar los procesos discursivos de interacción populista, tales como sus estrategias de comunicación que usan los nuevos medios para consolidar movimientos de activismo social y redes de partido, así como los canales tradicionales para divulgar más ampliamente sus mensajes. Pero una explicación del triunfo populista exige también considerar las promesas electorales por lo común llenas de protestas antisistema, pero vagas en cuanto a políticas concretas (al menos cuando no están en el poder), investigar cómo pueden afectar las campañas electorales populistas a la política mayoritaria y, por supuesto, examinar qué sucede cuando los populistas llegan al gobierno.

Este capítulo empieza con una reflexión sobre las causas económicas, socioculturales y políticas del descontento populista, así como el papel desencadenante de las recientes crisis. Continúa con un análisis de los rasgos que definen el populismo hoy y los peligros existenciales que han supuesto para la democracia liberal. Estos rasgos incluyen el estilo de los discursos de los líderes populistas, el contenido de las posverdades, los procesos de comunicación populistas y la relación entre las promesas de los populistas y sus acciones. A modo de conclusión, se pregunta si el populismo es un fenómeno pasajero o un nuevo capítulo de la historia e indaga sobre cuáles son las fuerzas que determinan sus posibilidades futuras.

Los orígenes del populismo

¿Cómo explicar el ascenso meteórico del populismo en la última década? Para ello necesitamos primero considerar las razones del descontento. Hay razones económicas, resultantes del aumento de la desigualdad y de las privaciones socioeconómicas desde la década de 1980; sociológicas, relacionadas con preocupaciones por el estatus, la identidad y la identidad nacional en un contexto de tasas de inmigración cada vez más elevadas, y políticas, generadas por la creciente insatisfacción de los ciudadanos con los partidos y políticas mayoritarias y con la pérdida de confianza en los gobiernos y en las elites políticas.

Razones económicas del descontento Las razones económicas del populismo son muy variadas. Incluyen el aumento de la desigualdad debido a la acumulación de capital por parte del famoso «uno por ciento» investigado por Tomas Picketty (2014), acompañado del aumento de la pobreza resultado de planes fiscales regresivos y recortes de gastos que han transformado el estado del bienestar posterior a las guerras mundiales en un sistema menos generoso, con pensiones más bajas y menos seguridad (Hacker, 2006; Hemerijck, 2013). Además, la globalización ha creado un amplio espectro de «perdedores» en áreas desindustrializadas y generado una sensación de inseguridad en las clases medias, a las que les preocupa perder sus empleos y su estatus (Prosser, 2016) o unirse al «precariado» (Standing, 2011). Las disrupciones



económicas de la globalización, en particular el cambio industrial en países avanzados y en desarrollo, ha conducido a que más personas se sientan «olvidadas» (Hay y Wincott, 2012) y dado lugar a una «carrera por los puestos más bajos» de la escala laboral de grupos de escasas cualificaciones, en especial hombres jóvenes (Eberstadt, 2016).

En la base de estos problemas socioeconómicos está la resiliencia de las ideas neoliberales (Schmidt y Thatcher, 2013). Estas empezaron promoviendo el libre comercio global y la liberalización de los mercados en la década de 1980 y terminaron con el triunfo del capitalismo financiero y la «hiperglobalización» (Stiglitz, 2002; Rodrik, 2011). La crisis financiera que empezó en 2008 hizo poco por moderar estas ideas, mientras que, en la crisis de la eurozona, las ideas «ordoliberales» que promovían medidas de austeridad han tenido consecuencias especialmente dañinas, incluidas tasas de crecimiento lento, desempleo elevado (sobre todo en el sur de Europa) y desigualdad y pobreza crecientes (Scharpf, 2014).

Las razones económicas del descontento populista son, pues, múltiples. Pero dejan sin responder una serie de preguntas. Por ejemplo, ¿por qué creció el populismo en Europa del Este a pesar de un auge económico sin precedentes impulsado por la globalización y la integración en Europa? ¿Por qué en Suecia no surgieron los populistas después de la drástica crisis de 1992, pero sí en el curso de una de las recuperaciones económicas más notables de Europa? También Italia ha vivido crisis económicas peores antes, entonces ¿por qué ahora? Por último, los «perdedores» de la globalización llevan indignados por su pérdida de renta y estatus consecuencia del triunfo del neoliberalismo desde la década de 1980, ¿por qué han trasladado hoy su insatisfacción a este conjunto de actitudes y/o acciones políticas? ¿Por qué, a la vista de todo esto, no se produjo antes la amenaza populista?

Razones socioculturales del descontento Las razones del populismo no son solo económicas; también son socioculturales. El resentimiento populista se ha visto impulsado por otro aspecto de la globalización neoliberal: la movilidad transfronteriza y el aumento de la inmigración. La nostalgia del pasado junto con el miedo al «otro» han resultado en la culpabilización de grupos de inmigrantes (Hochschild y Mollenkopt, 2009). Ciertos grupos consideran que su identidad nacional o su soberanía están amenazadas por el flujo creciente de inmigrantes (Berezin, 2009; McClaren, 2012). Y esto a menudo llega acompañado de crecientes resentimientos vinculados a percepciones del tipo: «los otros» —inmigrantes, no blancos, mujeres— están «saltándose las colas» y quedándose con las prestaciones sociales que solo ellos merecen (Hochschild, 2016). El «patriotismo» o «chovinismo» de las prestaciones sociales lleva asomando la cabeza no solo en la derecha del espectro político de Estados Unidos, Reino Unido o Francia, también en la izquierda del mismo en países nórdicos, sobre todo Dinamarca.

Las voces de disconformidad populista hablan en muchas lenguas distintas, pero transmiten los mismos mensajes contra la inmigración y las fronteras abiertas, la globalización y el libre comercio, la europeización y el euro

El descontento frente a la inmigración puede deberse también sin duda a los problemas socioeconómicos de los «olvidados», a quienes preocupa que los inmigrantes les arrebatan sus puestos de trabajo y no aprueban que sean beneficiarios de prestaciones sociales. Son las personas —mayores, con bajo nivel de estudios, blancas, del género masculino— cuya visión del mundo se ve amenazada por una demografía cambiante que resulta en poblaciones



Miles de emigrantes son escoltados por la policía en su marcha a lo largo de la frontera entre Eslovenia y Croacia mientras se dirigen al campo de tránsito de la localidad eslovena de Dobova, en octubre de 2015. Ese año Europa vivió la mayor crisis de refugiados desde la Segunda Guerra Mundial





inmigrantes más numerosas. A menudo son las mismas personas a las que también preocupan los cambios intergeneracionales hacia valores posmaterialistas como el cosmopolitismo y el multiculturalismo (Inglehart y Norris, 2016). Pueden ser individuos que gozan de buena posición económica, pero que suscriben filosofías socialmente conservadoras y/o se oponen a un programa de políticas sociales liberales. Individuos que, aunque puedan estar a favor del liberalismo económico en lo relativo a la responsabilidad individual en el ámbito económico, rechazan el liberalismo social.

El liberalismo social subyace en las ideas sobre el derecho del individuo a la autodeterminación, que incluyen estándares de respeto a las diferencias no solo de raza y etnia sino también de género, y que han venido acompañadas de estándares de «corrección política» en el lenguaje. Particularmente polémicas han sido las cuestiones relativas a los derechos de la mujer en lo referido al derecho al aborto y a los derechos LGTB referentes al matrimonio homosexual y a la adopción. Estas cuestiones han tenido mucho recorrido en Estados Unidos, con las «guerras de cuartos de baño» en institutos (el debate sobre qué baño pueden usar los transexuales y las personas de género no binario). En ocasiones se ha culpado a estas «políticas identitarias» la deriva populista hacia la izquierda y hacia extrema derecha de los conservadores de derechas (por ejemplo, Lilla, 2017).

La distintas contrapolíticas de identidad sociocultural son otra explicación plausible del auge del populismo. Pero aquí también la pregunta de ¿por qué ahora? queda sin respuesta. Esta postura existe desde hace mucho tiempo, alimentada por definiciones etnocéntricas de «nosotros» frente a «ellos», teorizadas sobre todo por Carl Schmitt. Después de todo, los miedos concretos y las percepciones negativas ligados a la inmigración existen desde hace décadas, por lo menos desde el comienzo del declive demográfico, el auge del terrorismo y la migración en masa de millones de europeos del Este pobres (incluidos casi un millón de musulmanes procedentes de Bosnia y Albania). Pero además, ¿por qué es tan marcada la demanda social de populismo en algunos países afectados por la migración en masa (por ejemplo, Alemania, Suecia, Dinamarca, Francia), pero no en otros (por ejemplo, España)?

Razones políticas del descontento Por último, el descontento es también político, porque las personas tienen la sensación de que sus opiniones ya no cuentan en el proceso político. En algunos casos, los ciudadanos sienten que han perdido el control como resultado de la globalización y/o la europeización; piensan que hay unas personas poderosas que, en la distancia, toman decisiones que afectan a su vida diaria que ellos ni comprenden ni aprueban (Schmidt, 2006, 2017). Estas personas están no solo en organismos de decisiones globales o regionales, también en grandes negocios con capacidad para manipular el sistema político en beneficio propio, ya sea no pagando impuestos (por ejemplo, Apple) u obteniendo legislación a su medida, con independencia de los efectos que tenga después en las políticas sociales y ambientales (Hacker y Pierson, 2010).

La insatisfacción popular también se genera a nivel local y está dirigida a sistemas políticos nacionales. Algunas cuestiones tienen que ver con políticas. Los partidos parecen cada vez más indiferentes a las preocupaciones de sus votantes, aprobando medidas que dan la impresión de favorecer a las elites en lugar de al ciudadano ordinario (Berman, 2018). Otras surgen de cambios estructurales en las instituciones políticas. La capacidad de los ciudadanos de expresar su desencanto se ha visto, por contradictorio que parezca, amplificada por la «democratización» de las reglas electorales. Al ampliar el acceso mediante elecciones primarias y referendos, donde los más insatisfechos tienden a estar más motivados para votar, las disputas por el liderazgo dentro de los partidos políticos a menudo han dado la victoria a los representantes de las posturas más extremas. Esto a su vez ha debilitado los partidos



políticos como instituciones representativas, al tiempo que ha hecho más difícil formar alianzas bipartidistas (Rosenbluth y Shapiro, 2018). Además, la supranacionalización de toma de decisiones en las instituciones globales y/o europeas ha hecho mella en la política de partidos mayoritarios, socavándola. Los líderes políticos se encuentran con que tienen que elegir entre escuchar a los ciudadanos que los han elegido democráticamente representantes suyos o actuar de manera responsable cumpliendo con compromisos supranacionales (Mair, 2013).

La política pura y dura también importa, claro. Los partidos políticos mayoritarios han dado la impresión de no saber responder a las amenazas populistas de derechas y de izquierdas. La estrategia política de centro derecha se ha traducido, hasta fechas relativamente recientes, en una negativa a gobernar con la extrema derecha al tiempo que ha copiado a menudo los discursos de esta en un intento por recuperar apoyos electorales, sobre todo en materia de inmigración. De manera que mientras el centro derecha ha dado la impresión de querer acercarse a la extrema derecha en las cuestiones candentes, el centro izquierda ha dado a menudo la impresión de querer acercarse al centro derecha en esas mismas cuestiones.

La Unión Europea se enfrenta a la complicación añadida de la naturaleza supranacional de su toma de decisiones y cómo afecta esta a la política de los distintos países. Los nuevos mapas electorales han cambiado la estructura de las políticas nacionales de toda Europa. Se dan, por un lado, divisiones transversales ente posturas políticas tradicionales basadas en la adherencia a partidos de izquierda o de derecha y divisiones nuevas de tipo identitario basadas en la adherencia a valores más cerrados, xenófobos y autoritarios frente a valores más abiertos, cosmopolitas y liberales (Hooghe y Marks, 2009; Kriesi *et al.*, 2012) El primer desencadenante del lado xenófobo y autoritario de esta división fue la inmigración (Hooghe y Marks, 2009). Pero, con los años, la Unión Europea se ha ido convirtiendo en una cuestión igualmente politizada, a medida que los ciudadanos han pasado del «consenso permisivo» del pasado a las actuales «disensiones limitadoras» (encuestas Pew y del Eurobarómetro, 2008-2018). Las encuestas de opinión pública y las urnas reflejan claramente la pérdida de confianza en las elites políticas y de fe en sus democracias nacionales, y aún mucho más en la Unión Europea (Schmidt, 2006).

La capacidad de los ciudadanos de expresar su desencanto, por contradictorio que parezca, se ha visto amplificada por la «democratización» de las reglas electorales. Elecciones primarias y referendos, donde los más insatisfechos tienden a estar más motivados para votar, a menudo han dado la victoria a los representantes de las posturas más extremas

En la Unión Europea, la gobernanza multinivel supone gran presión para las democracias de los Estados miembros, aunque por razones históricas, culturales y políticas distintas (Schmidt, 2006). Nótese, sin embargo, que los sentimientos (y las realidades) de pérdida de derechos no se deben solo al sistema político multinivel de la Unión Europea. Aunque el Brexit fue probablemente el *summum* de la agitación populista de la Unión Europea (hasta las elecciones italianas de marzo de 2018, que llevaron al gobierno a los partidos euroescépticos), la elección de Trump en Estados Unidos estuvo impulsada por sentimientos muy parecidos. En gran medida son consecuencia de la creciente supranacionalización de la toma de decisiones en una era de globalización en la que los gobiernos han renunciado a la autonomía nacional a favor de una autoridad supranacional compartida con el fin de recuperar el control de las fuerzas que ellos



Todas las formas de populismo son una expresión de descontento de quienes se sienten desposeídos, manifestada por unos líderes cuyos discursos disidentes coinciden con la indignación de esas personas respecto al *statu quo*

Carteles rasgados y superpuestos de los dos candidatos a las elecciones presidenciales de Francia en 2017: Marine Le Pen, del Frente Nacional, y Emmanuel Macron, de En Marche!





mismos desataron mediante políticas nacionales de liberalización y desregulación (ver, por ejemplo, Schmidt, 2002). Y con la liberalización y la desregulación, espoleadas por filosofías neoliberales (Schmidt y Thatcher, 2013) llegó también la toma de decisiones tecnocrática, que promovió la despolitización de regulaciones y de procesos, así como el desprestigio de la política en general (De Wilde y Zürn, 2012; Fawcett y Marsh, 2014). Como resultado, el sistema político tradicional se ha visto atacado por dos frentes: por un lado, el auge de los partidos populistas y el auge de la tecnocracia, por otro (Caramani, 2017). Lo único que tienen en común estas dos fuerzas es su rechazo de la política de partidos convencional, su creciente impacto negativo en dicha política y sus efectos dañinos en la democracia liberal (Hobolt, 2015; Kriesi, 2016; Hooghe y Marks, 2009). El peligro, tal y como argumenta Yascha Mounk, es que las democracias liberales terminen convertidas en democracias iliberales gobernadas por demagogos populistas o en liberalismos no democráticos gobernados por élites tecnócratas (Mounk, 2018).

En suma, los efectos despolitizadores de la supranacionalización de la toma de decisiones y la debilitación de los partidos con representación institucional constituyen explicaciones igualmente poderosas de por qué se ha convertido el populismo en una amenaza de primer orden para la política y los partidos mayoritarios. Pero, de nuevo, la pregunta aquí es por qué, dado que se trata de un proceso iniciado hace tiempo, los ciudadanos agraviados no votaron antes a partidos populistas de extrema derecha. Cas Mudde sugiere que puede tratarse de un problema de escasez de oferta, es decir, de ausencia de líderes carismáticos atractivos para el votante (Mudde, 2017, p. 615), a pesar del «carisma de camarilla» que activistas de núcleo duro atribuyen a algunos líderes (Earwell, 2017). De ser así, entonces la segunda pregunta es por qué estos líderes populistas —y los hay nuevos, pero bastantes llevan en la política muchos años— no han arrasado hasta ahora.

Los líderes populistas articulan muchas más quejas antisistema sobre lo que está mal que propuestas sobre cómo arreglarlo, al menos hasta que acceden al poder, momento en el cual, o bien dan marcha atrás, o bien aceleran la implementación de políticas antiliberales

Para encontrar la respuesta, tenemos que centrarnos primero en el populismo en sí. Hasta el momento hemos analizado los orígenes del descontento populista hurgando en las causas del descontento ciudadano en tres áreas distintas: la económica, la social y la política. Al centrarse en las fuentes del problema, el debate tiende a pasar por alto la naturaleza del populismo. Pero solo tomándonos en serio las ideas y el discurso de los movimientos y líderes populistas podemos empezar a comprender por qué han sido capaces de explotar el creciente malestar ciudadano en beneficio propio.

Una conceptualización del populismo y sus efectos

El interés público y académico en el desarrollo del populismo ha dado lugar a una verdadera subindustria de libros y artículos sobre el tema. Desde el punto de vista conceptual, los estudiosos han proporcionado importantes reflexiones sobre la naturaleza y alcance del populismo en Europa y Estados Unidos (por ejemplo, Mudde y Kalwasser, 2012; Müller, 2016;



Judis, 2016; Mudde, 2017). Desde el punto de vista empírico, los analistas han documentado el auge del populismo en las extremas derecha e izquierda, aunque la gran mayoría se centran en los partidos antinmigración, euroescépticos, antieuro y anti Unión Europea de extrema derecha (por ejemplo, Kriesi, 2014, 2016; Mudde, 2017). Los observadores también han puesto de relieve que los problemas generados por el populismo son patentes no solo en las propuestas políticas que van en contra de principios consensuados hace tiempo sobre derechos humanos, procesos democráticos y el orden mundial liberal, también en el nuevo lenguaje político «incívico» (Mutz, 2015; Thompson, 2016), la política de las «patrañas» y los peligros de las «noticias falsas» que circulan por los medios sociales para crear un mundo hecho de «posverdades» (Frankfurt, 2005; Ball, 2017; D'Ancona, 2017).

Lo numeroso y variado de las publicaciones sugiere que no existe una manera consensuada de explicar el populismo, sino muchas, la mayoría con connotaciones negativas. Algunas incluso se remontan a la descripción de Richard Hofstädter en la década de 1960, que definía a lo populistas como «agitadores de tendencias paranoicas» (Hofstädter, 1964). Aunque esa visión estrictamente negativa del populismo puede ser criticada, en concreto porque no diferencia entre las versiones de izquierda y de derecha, todas las formas de populismo tienen algo en común: son una expresión de descontento por parte de quienes se sienten desposeídos, manifestada por unos líderes cuyos discursos de disidencia coinciden con la indignación de esas personas respecto al *statu quo*. Pero, más allá de esto, el populismo puede seguir muchas sendas distintas, dependiendo del contexto político, social, histórico, institucional y cultural.

Teniendo en cuenta esta complejidad, podemos identificar cuatro características clave del populismo. En primer lugar, los líderes populistas se consideran representantes únicos del «pueblo» frente a las elites y otras «amenazas». En segundo, se embarcan en una lucha sin cuartel contra los «hechos» informados y objetivos y contra la verdad, usando un lenguaje y un comportamiento «incívicos» que constituyen una amenaza a la tolerancia liberal y al compromiso con la información imparcial y el conocimiento científico. En tercer lugar, difunden sus mensajes mediante nuevas estrategias de comunicación hechas posible por nuevos medios sociales como Twitter o Facebook, así como en la prensa hablada y escrita tradicional. Y en cuarto y último, articulan muchas más quejas antisistema sobre lo que está mal que propuestas sobre cómo arreglarlo, al menos hasta que acceden al poder, momento en el cual, o bien dan marcha atrás, o bien aceleran la implementación de políticas antiliberales.

Estilo discursivo de los líderes populistas Gran parte de la literatura sobre populismo se centra en el primer rasgo antes descrito, la atracción que siente «el pueblo» por líderes cuyos discursos culpan a las elites «corruptas» y a las instituciones injustas de todos sus problemas, a la vez que enumeran una amplia gama de amenazas al bienestar nacional, con independencia de lo que se entienda por este (Canovan, 1999; Weyland, 2001; Albertazzi y Mudde, 2005, 2017). Los análisis del populismo más recientes describen este tipo de liderazgo discursivo como una amenaza para la democracia liberal. Jan-Werner Müller, por ejemplo, da una definición bastante restrictiva del populismo como una peligrosa filosofía política antielitista, antidemocrática y antipluralista en la que los líderes se arrojan la representación exclusiva del «pueblo», pero solo algunas personas cuentan como «auténtico pueblo» al que afirman dirigirse los líderes populistas en nombre del pueblo entero (Müller, 2016). Esta definición se acerca a la de Pierre André Taguieff, en su estudio clásico del Frente Nacional como «partido nacional-populista», en el que el discurso del líder demagógico está marcado por una retórica que se identifica con «el pueblo», afirmando que las ideas de este son las suyas y sus ideas son las de este, sin interés ninguno por la verdad y con el único objetivo de persuadir mediante fórmulas propagandísticas (Taguieff, 1984; ver también el análisis en Jäger, 2018).



Wink Watson, de cincuenta y dos años, vecino de Lincoln, Inglaterra, celebra en el pub Britannia el resultado del referéndum sobre el Brexit el 25 de junio de 2016





Similar a este enfoque, pero de otra tradición filosófica, es el de Ernesto Laclau (Laclau, 2005, p. 39). Según Laclau, el populismo se define no tanto por sus contenidos o por la identificación de un enemigo, como por su anclaje conceptual («significante vacío»), que se convierte en representación universal de todas las reivindicaciones de las que es visto como equivalente (ver también Paniza, 2005). Ejemplos de esto pueden ser alusiones a algo tan general como la «globalización», frases o eslóganes como «recuperar el control» de los partidarios del Brexit, «Que América vuelva a ser grande» de Donald Trump (Schmidt, 2017). Sin embargo, podría también consistir en una retahíla de palabras que indican un conjunto de valores concreto, como en el discurso del ministro del Interior italiano y líder de la Liga Matteo Salvini cuando declaró, en un mitin en Pontida: «Las elecciones (al parlamento europeo) del año que viene serán un referéndum entre la Europa de las élites, los bancos, las finanzas, las migraciones en masa y la precariedad contra la Europa del pueblo, del trabajo, la tranquilidad, la familia y el futuro» (*Politico*, 19 de julio de 2018).

Para muchos, el populismo es un fenómeno inconfundiblemente negativo: antidemocrático, antipluralista y moralista de maneras muy peligrosas. Sobre todo en los casos de auge de «nuevos populismos» de partidos de extrema derecha y sus vínculos con ideas nacionalistas xenófobas (por ejemplo, Taggart, 2017). Estos incluyen partidos de extrema derecha bastante longevos, como el Frente Nacional francés (hoy Agrupación Nacional), el Partido de la Libertad de Austria, el Partido Popular danés y el Partido por la Libertad holandés (Elinas, 2010; Mudde, 2017); relativamente recién llegados como los Verdaderos Finlandeses, los Demócratas de Suecia y la Alternativa para Alemania (AfD) en el norte del Europa, así como la variedad de partidos populistas, nuevos y viejos, repartidos por Europa central y oriental, incluyendo la República Checa y Eslovaquia (Minkenberg, 2002; Mudde, 2005), sin olvidar, por supuesto, a los gobiernos iliberales de Hungría y Polonia (Kelemen, 2017).

Según Laclau, el populismo se define por su anclaje conceptual, que se convierte en representación universal de todas las reivindicaciones de las que es visto como equivalente. Ejemplos de esto pueden ser eslóganes como «recuperar el control» de los partidarios del Brexit

Para otros, el populismo puede tener un lado positivo. Esto incluye a los gobiernos populistas de Latinoamérica (en especial en la década de 1990 y principios de la de 2000) y los populismos inclusivos del sur de Europa, sobre todo los de España y Grecia (Weyland, 2001; Panizza, 2005; Mudde y Kaltwasser, 2012). Tal y como han argumentado filósofos de izquierdas como Chantal Mouffe (Mouffe, 2018) y como han subrayado numerosos miembros de las propias formaciones políticas de izquierda radical (por ejemplo, Podemos en España y France Insoumise en Francia), algunos partidos políticos radicales de izquierdas abrazan el populismo como técnica de adquirir poder. La consideran la única alternativa eficaz que tiene la izquierda a la «capitulación por consenso» implementada por una socialdemocracia desacreditada por la Tercera Vía.

Los efectos positivos del populismo incluyen dar voz a grupos poco representados, movilizar y representar a sectores marginados de la sociedad y aumentar la transparencia democrática al poner sobre la mesa cuestiones ignoradas o arrinconadas por los partidos mayoritarios. Los extremistas de izquierda en particular, al promover las movilizaciones basadas en la justicia social y los derechos humanos, y además en contra de la desigualdad como conse-



cuencia de la creciente predominancia del capitalismo financiero con sus correspondientes auges y caídas o por la ausencia de fiscalidad progresiva, pueden actuar de contrapeso para los partidos mayoritarios tanto de derechas como de izquierdas. Un ejemplo es el caso del movimiento Occupy Wall Street. Sin embargo, hay muchos menos partidos de extrema izquierda con un seguimiento popular significativo que de extrema derecha, y a menudo están en países de la Unión Europea con una influencia política o económica menor, en concreto aquellos que estuvieron sujetos a una condicionalidad formal vinculada al rescate financiero durante la crisis del euro (Grecia) (Vasilopoulou, 2018) o a una condicionalidad informal (España es el ejemplo más claro). De media, los partidos de extrema derecha son los que parecen haber ejercido mayor influencia en los debates y la agenda política hasta el momento, al atraer a los partidos mayoritarios de centro derecha a sus posturas extremas, en especial en lo referido a la oposición a la inmigración, a la libre movilidad o a los derechos de las minorías.

Los efectos positivos del populismo incluyen dar voz a grupos poco representados, movilizar y representar a sectores marginados de la sociedad y aumentar la transparencia democrática al poner sobre la mesa cuestiones ignoradas o arrinconadas por los partidos mayoritarios

La existencia de distintos tipos de movimientos populistas en un espectro que va de izquierda a derecha al margen de su fortaleza sugiere, por tanto, que el populismo es algo más que un estilo de discurso con un mensaje antilites. Aunque los populistas puedan presentar estilos similares —como hablar en nombre del pueblo frente a las élites—, el contenido importa. Si es más progresista e inclusivo, puede ejercer una influencia positiva en partidos mayoritarios que, en última instancia, sirva de refuerzo a la democracia liberal. Si es más regresivo y xenófobo, puede ejercer una influencia negativa. No todos los populistas son iguales, aunque sus estilos puedan parecerse. Las diferencias ideológicas entre izquierda y derecha siguen siendo de gran importancia, tal y como concluye un estudio Pew reciente sobre el apoyo ciudadano al populismo frente al apoyo a partidos mayoritarios de izquierda, derecha y centro (Simmons *et al.*, 2018).

Posverdad populista El siguiente rasgo del populismo tiene que ver con valorar las experiencias personales por encima del conocimiento y las habilidades expertas. Los populistas tienden a desacreditar a los expertos, intelectuales y aquellos que tradicionalmente afirman basarse en los «hechos» y en la verdad. Esta lucha contra los expertos también está en la raíz de muchos debates sobre posverdades y noticias falsas, tanto las acusaciones de los populistas a los canales de noticias que generan noticias falsas cada vez que la verdad es un obstáculo para sus propósitos, como la diseminación de noticias falseadas por parte de los populistas mismos tanto en los medios sociales como en los tradicionales (Ball, 2017; D’Ancona, 2017). Nótese, sin embargo, que este enfoque parece ser mucho más cierto en el caso de los populistas de derechas contemporáneos que en los de izquierdas.

El cuestionamiento populista de los expertos se refiere al hecho de que tienden a negar conocimientos científicos o académicos usados por los partidos políticos tradicionales y a generar sus propios datos y fuentes de conocimiento «alternativos», a menudo valorando la experiencia personal por encima de la pericia «tecnocrática». Por poner solo un ejemplo, el húngaro Jobbik cuenta con sus propios «institutos», en los que se hibridan datos estadísticos



sobre inmigración sin contrastar con mitos políticos sacados de teorías de la conspiración que después cuelgan en YouTube productores anónimos.

El problema de que se desdibujan así las fronteras entre la realidad y la ficción, tal y como han señalado los psicólogos, es que se socavan las nociones mismas de verdad o falsedad de las personas, ya que las mentiras que se repiten muchas veces se consideran «ciertas» incluso cuando se sabe que no lo son. Aquí podemos aprender mucho del trabajo de psicólogos que se centran en las maneras en que el encuadre y la heurística pueden afectar las percepciones de las personas (por ejemplo, Kahneman, 2011; Lackoff, 2014), incluido cuando la exageración o la hipérbole sobre, pongamos, el número de inmigrantes que entran en la Unión Europea o lo que le cuesta diariamente la Unión Europea al Reino Unido da a los oyentes la sensación de que se trata de cifras muy altas, aunque no lo sean tanto. Incluso los patrones del habla, tales como las frases sin terminar y las repeticiones pueden ser mecanismos discursivos eficaces para recalcar un mensaje, ya sea creando una sensación de intimidación cuando el público tiene que completar la frase mentalmente o apelando a mecanismos cognitivos inconscientes que sirven para reforzar la aceptación por parte del público de lo que se dice incluso (o sobre todo) cuando se trata de mentiras o de exageraciones (Lackoff, 2016; ver análisis en Schmidt, 2017).

Este tipo de enfoque del mundo basado en la posverdad es parte integrante del lenguaje «incívico» combativo y del estilo de una interacción discursiva en la que apabullar, gritar y violar abiertamente las reglas de «corrección política» mediante un lenguaje intolerante contribuye a dar la sensación de que lo que importa no es lo que se dice, sino la agresividad con la que se dice, con independencia de la validez de las reivindicaciones. El peligro aquí es que se socavan los valores mismos —de tolerancia, justicia e incluso de información imparcial— que han sido la base de la democracia liberal desde la Segunda Guerra Mundial. Tal y como argumenta Diane Mutz, el incivismo en los medios de comunicación, en particular en programas de confrontación directa, deteriora especialmente el respeto a los puntos de vista políticos opuestos y también los niveles de confianza de los ciudadanos en los políticos y en el proceso político (Mutz, 2015).

Coordinación política a través de los nuevos medios sociales El populismo contemporáneo viene también acompañado de nuevas maneras de usar los nuevos medios sociales para hacer circular sus mensajes y ampliar sus redes de apoyo y sus recursos. De hecho, los nuevos medios han sido fundamentales para la creación de redes populistas de disconformidad. Solo las publicaciones en Facebook, por ejemplo, crean cámaras de resonancia de apoyo, sobre todo porque muchas personas acceden a las noticias (tanto reales como falsas) a través de lo que comparten sus «amigos». Los populistas usan más los nuevos medios (por ejemplo, YouTube y blogs) y los medios sociales (por ejemplo, Twitter y Facebook) que los partidos tradicionales. Por ejemplo, en España, Podemos contrarrestó la hostilidad de los periódicos y la televisión con un uso intensivo de Facebook y de canales de YouTube. Los medios sociales facilitan el descubrimiento de personas de ideas similares en todo el país y el mundo, permitiendo que los activistas y partidos populistas aumenten exponencialmente su número de «seguidores» y partidarios potenciales. Las redes transnacionales de comunicación fomentan la diseminación de ideas populistas, reforzando el sentimiento de indignación y *antiestablishment*. Pero lo más importante es que esto ocurre no solo de manera virtual, también «en carne y hueso», por ejemplo, cuando líderes de extrema derecha se reúnen en Europa para trazar estrategias para elecciones al Parlamento Europeo o para agrupaciones parlamentarias. Así, el «intelectual orgánico» del presidente Trump, Steve Bannon, viajó por Europa para reunirse con y apoyar a otros líderes populistas, como Nigel Farage y Marine Le Pen en sus batallas electorales y planea crear una fundación que proporcione asesoramiento y ayuda económica.



El populismo encuentra apoyo de activistas y movimientos sociales tanto de derechas como de izquierdas. Aunque suele asumirse que las redes activistas defienden causas sobre todo izquierdistas, las redes de derecha también son activas. En Estados Unidos, el Tea Party es el ejemplo más claro, que ha conseguido desplazar a bastantes congresistas en las primarias y ganar elecciones hasta transformar el Partido Republicano (Skocpol y Williamson, 2012). En Gran Bretaña, el Partido de la Independencia de Reino Unido (UKIP) consiguió imponer su programa en el Partido Conservador y, en última instancia, en el país entero mediante el referéndum sobre la salida de la Unión Europea. En algunos países europeos, como Dinamarca (Rydgren, 2004) y Alemania (Berbair *et al.*, 2015), los movimientos sociales han sido cruciales a la hora de impulsar y normalizar el populismo de extrema derecha (ver también Bale *et al.*, 2010). Dicho esto, el populismo también ha sido útil a los activistas de extrema izquierda que buscan revitalizar sus bases (March y Mudde, 2005). En las primarias del Partido Demócrata de 2016, en ocasiones se llamó populista a Bernie Sanders por su habilidad a la hora de movilizar a los jóvenes a través de los medios sociales a pesar de, o quizá debido a promesas que, en opinión de los demócratas mayoritarios, ni siquiera eran realistas.

Comunicación política a través de los medios tradicionales La diseminación de las ideas populistas no se produce solo a través de los medios sociales, que crean nuevos canales de coordinación para las redes activistas. Los populistas también han explotado los medios tradicionales para hacer llegar sus mensajes, más allá de sus «incondicionales», al público más general. Si Twitter es una vía posmoderna que pueden usar los líderes populistas para hablar directamente al «pueblo», los medios tradicionales también sirven para divulgar sus mensajes de desconfianza hacia los partidos mayoritarios y la política, así como hacia los medios mismos. Tal y como demuestra la lingüista Ruth Wodak, con las «políticas del miedo» los populistas de derechas han pasado de ser voces marginales a persuasivos actores políticos que dictan el programa y definen los debates en los medios de comunicación mediante una normalización de una retórica nacionalista, xenófoba, racista y antisemita (Wodak, 2015). Dicho esto, la diseminación del discurso populista tiene sus limitaciones, puesto que determinados contenidos se pierden por el camino, como cuando activistas de la derecha alternativa estadounidense quisieron usar la rana Freddy para reforzar el sentimiento de extrema derecha en Francia antes de las elecciones presidenciales sin darse cuenta de que la «rana» es desde hace tiempo un estereotipo negativo aplicado a los franceses en Estados Unidos y por tanto no llamaría la atención.

En muchos países, los medios de comunicación tradicionales están tan fragmentados que las personas oyen informativos distintos con sesgos también distintos. Y aquí de nuevo la extrema derecha suele superar con mucho a la izquierda en presencia en los medios, ya sea en tertulias en la radio o en la televisión por cable, como Radio María en Polonia o Fox News en Estados Unidos. Es más, incluso la prensa tradicional y la televisión conspiran a favor de los extremos en la derecha, aunque sea de manera involuntaria. Magnifican la audiencia de líderes populistas convirtiendo sus tuits políticamente «incorrectos» en noticia del día o refuerzan mensajes derechistas cuando, en un intento por parecer «imparciales», invitan a un político de la extrema derecha y a uno de centro, sin espacio para la izquierda (Baldwin, 2018). Naturalmente, allí donde los populistas gobiernan y controlan los medios de comunicación públicos, el mensaje populista es el que más se oye, como ocurre en Hungría, pero también, podría decirse, en Italia, con la versión, algo más benigna, de populismo de Berlusconi.

Los medios también han cambiado de maneras que benefician los mensajes populistas. Los ciclos cortos de noticias, combinados con la presión por hablar en intervenciones de treinta segundos, favorecen los mensajes sencillos, que «venden», lo que a su vez beneficia al discurso populista con sus «soluciones» simples al problema de la inmigración, el freno al



Seguidores de Occupy Wall Street en un concierto callejero del grupo Rage Against the Machine en Foley Square, Nueva York, durante la celebración del primer aniversario de este movimiento ciudadano, que nació el 17 de septiembre de 2011



libre comercio para proteger el empleo dentro de las fronteras, etcétera. A los líderes políticos mayoritarios les lleva mucho más tiempo explicar por qué han aprobado determinadas medidas y a menudo se trata de explicaciones complejas y aburridas, sobre todo comparadas con los eslóganes concisos de los populistas.



El discurso populista tiende más a enumerar agravios e injusticias que a proponer soluciones legislativas o a detallar programas políticos. Por ese motivo suele dar mejor resultado cuando los populistas están en la oposición

Esta «mediatización» de la comunicación política plantea, por lo general, problemas significativos a los partidos políticos mayoritarios y a los gobiernos, sobre todo porque socava el control de estos de la esfera pública y también su capacidad de fijar la agenda política. Más allá del hecho de que ahora se oyen en una multiplicidad de canales muchas otras voces de aquellos que no pertenecen al *establishment* y también que se oponen a él, los líderes mayoritarios han creado sus propios problemas, al adoptar estilos de comunicación más populista, y los medios no han hecho más que empeorar las cosas con su tendencia a centrarse en rasgos de la personalidad de los líderes y convirtiendo las noticias en entretenimiento. Más allá de esto, los medios sociales, los movimientos sociales y los exogrupos han subvertido cada vez más la función de los partidos de fijar la agenda política (Caramani, 2017). La comunicación política, por tanto, en la diseminación de ideas y discursos populistas a través de las «patrañas» de las noticias falsas y las posverdades en un paisaje mediático fragmentado, es otro elemento clave del populismo actual.

Relación entre discursos populistas y actuaciones La última faceta del populismo que trataremos es la tendencia de sus líderes a centrarse más en denunciar el *statu quo* que a proponer soluciones, hasta que obtienen poder político. El populismo a menudo implica, tal y como hemos dicho, un discurso ideológicamente débil caracterizado más por la ardiente expresión de resentimiento que por la consistencia de los programas (también se habla de «ideología de núcleo débil»; Mudde y Kaltwasser, 2012, p. 8, 2013). El discurso populista tiende más, por lo tanto, a enumerar agravios e injusticias que a proponer soluciones legislativas o a detallar programas políticos. Por ese motivo suele dar mejor resultado cuando los populistas están en la oposición. Estar en el gobierno ha implicado tradicionalmente rebajar o incluso echarse atrás en políticas antes defendidas (Mudde, 2017), como ocurrió con el partido de izquierdas Syriza en Grecia. Pero en los últimos tiempos estos cambios de estrategia política se han vuelto menos frecuentes.

A medida que aumenta el número de partidos populistas en coalición con partidos mayoritarios (por ejemplo, en Austria), o incluso en el gobierno (Italia, Hungría y Polonia), han empezado a diseñar e implementar hojas de ruta políticas que son la plasmación práctica de sus ideas antiliberales, a menudo con los tribunales como única salvaguarda del estado de derecho. Es más, a medida que las oportunidades de gobernar aumentan para los populistas de toda Europa, sus partidos se han vuelto más específicos en cuanto a políticas y programas. Y lo hacen incluso (o especialmente) cuando dichas políticas no son de fácil implementación en el orden político existente porque contravienen requisitos para una economía sólida (por ejemplo, prometer una subida de la renta básica y un sistema tributario sin tramos, como en



el programa de la nueva coalición populista que gobierna Italia) o para una política liberal (por ejemplo, expulsar a los refugiados, algo a lo que se comprometen todos los partidos populistas de derecha).

Así pues, ¿cuáles son exactamente los peligros potenciales de que los populistas accedan al poder? David Art ha argumentado que la estrategia política de «domesticar el poder», incorporando a los populistas a los gobiernos para forzarlos a asumir responsabilidades cediendo en sus posturas, puede tener el efecto contraproducente de «normalizar» sus propuestas, allanando así el camino para que ideas iliberales ganen influencia en democracias liberales (Art, 2006; ver también Mudde, 2017). Müller va más allá y aduce que antes que fomentar una democracia más participativa, los populistas en el poder «se apoderarán del Estado, cultivarán el clientelismo y la corrupción y suprimirán todo lo que se parezca a una sociedad civil crítica» (Müller, 2016, p. 102). Steve Levitsky y Daniel Ziblatt secundan este análisis e insisten en que las «democracias mueren» en manos de líderes populistas electos que, una vez en el gobierno, se dedican a subvertir los procesos democráticos mismos que los llevaron al poder» (Levitsky y Ziblatt, 2018). Pero incluso antes de la victoria populista, cuando los populistas *todavía* no gobiernan, existe el peligro de contagio. Los líderes mayoritarios son cada vez más culpables de introducir elementos populistas en la política normal, practicando un «electoralismo» que los lleva a centrarse en objetivos cortoplacistas en respuesta al estado de ánimo del público que reflejan las encuestas (Caramani, 2017). Esto sugiere que no basta con seguir los discursos de los líderes y las maneras en que circulan sus ideas. También necesitamos ver si o cómo influyen en las democracias liberales.

Conclusión

Tenemos varias preguntas sin respuesta. ¿Estamos viviendo un momento de profunda transformación en el que un nuevo paradigma surgirá de las cenizas del orden liberal, en el que la economía neoliberal, al liberalismo social y político sucumbirán al cierre de fronteras a los inmigrantes, al proteccionismo creciente, al conservadurismo social y a la democracia iliberal (expresión que es, en sí, un oxímoron)? ¿Prevalecerán los compromisos institucionales más equilibrados y tolerantes del liberalismo político junto con, quizá, un liberalismo económico modificado en el que las fronteras abiertas y el libre comercio se moderen con una mayor atención a los desfavorecidos? De momento no podemos saberlo. Lo que sí sabemos es que, cuando los líderes populistas acceden al poder, tratan de cumplir sus promesas electorales en detrimento del consenso liberal democrático.

Así pues, ¿cuál es la alternativa? La gran pregunta para los progresistas que buscan la supervivencia de las democracias liberales es cómo contrarrestar el auge populista con ideas innovadoras que vayan más allá de una economía neoliberal, a la vez que promueven la renovación de la democracia y una sociedad más igualitaria. Pero esto requiere no solo ideas factibles capaces de dar solución a una amplia gama de problemas económicos, políticos y sociales. También exige líderes políticos con discursos convincentes que lleguen a un electorado cada vez más descontento y vulnerable a los cantos de sirena del populismo. Por el momento seguimos esperando no tanto ideas —en muchos sentidos ya sabemos cuáles son—, como un discurso de líderes políticos nuevos que transmitan ideas progresistas de maneras inspiradoras y que ofrezcan visiones de futuro con capacidad de cerrar las brechas que hacen prosperar los populismos. Sin esto, las esperanzas de una «nueva Ilustración» se estrellarán contra las rocas del iliberalismo.

Bibliografía

- Albertazzi, Daniele y Mueller, Sean (2017): «Populism and liberal democracy», en Cas Mudde (ed.), *The Populist Radical Right: A Reader*, Londres, Routledge.
- Art, David (2006): *The Politics of the Nazi Past in Germany and Austria*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Baldwin, Tom (2018): *Ctrl Alt Delete: How Politics and the Media Crashed our Democracy*, Londres, Hurst and Compan.
- Bale, Tim; Green-Pedersen, Christoffer; Krouwel, Andrea; Luther, Kurt Richard y Sitter, Nick (2010): «If you can't beat them, join them? Explaining social democratic responses to the challenge from the populist radical right in Western Europe», en *Political Studies*, vol. 58, n.º 3, pp. 410-426.
- Ball, James (2017): *Post-Truth: How Bullshit Conquered the World*, Londres, Biteback Publishing.
- Berbuir, Nicole; Lewandowsky, Marcel y Siri, Jasmin (2015): «The AfD and its sympathisers: finally a right-wing populist movement in Germany?», en *German Politics*, vol. 24, n.º 2, pp. 154-178.
- Berezin, Mabel (2009): *Illiberal Politics in Neoliberal Times*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Berman, Sheri (2018): «Populism and the future of liberal democracy in the West». Presentación en el Center for the Study of Europe, Universidad de Boston, 20 de septiembre de 2018.
- Canovan, Margaret (1999): «Trust the people! Populism and the two faces of democracy», en *Political Studies*, vol. 47, n.º 1, pp. 2-16.
- Caramani, Daniele (2017): «Will Vs. Reason: populist and technocratic challenges to representative democracy», en *American Political Science Review*, vol. 111, n.º 1, pp. 54-67.
- D'Ancona, Matthew (2017): *Post Truth: The New War on Truth and How to Fight Back*, Londres, Ebury Press.
- De Wilde, Pieter y Zürn, Michael (2012): «Can the politicisation of European integration be reversed?», en *Journal of Common Market Studies*, vol. 50, n.º 1, pp. 137-153.
- Eatwell, Roger (2017): «The rebirth of right-wing charisma?», en Cas Mudde (ed.), *The Populist Radical Right: A Reader*, Londres, Routledge.
- Eberstadt, Nicholas (2016): *Men Without Work*, West Conshohocken, Templeton Press.
- Eichengreen, Barry (2018): *The Populist Temptation: Economic Grievance and Political Reaction in the Modern Era*, Nueva York, Oxford University Press.
- Elinas, Antonis (2010): *The Media and The Far Right in Western Europe: Playing the Nationalist Card*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Fawcett, P. y Marsh, D. (2014): «Depoliticisation, governance and political participation», en *Policy & Politics*, vol. 42, n.º 2, pp. 171-188.
- Frankfurt, Harry (2005): *On Bullshit*, Princeton, Princeton University Press.
- Gidron, Noam y Hall, Peter A. (2017): «The politics of social status: economic and cultural roots of the populist right», en *The British Journal of Sociology*, vol. 68, n.º 1, pp. 57-68.
- Hacker, Jacob (2006): *The Great Risk Shift: The Assault on American Jobs, Families, Health Care, and Retirement, and How You Can Fight Back*, Nueva York, Oxford.
- Hacker, Jacob S. y Pierson, Paul (2010): *Winner-Take-All Politics: How Washington made the Rich Richer—And Turned its Back on the Middle Class*, Nueva York, Simon and Schuster.
- Hay, Colin y Wincott, Daniel (2012): *The Political Economy of European Welfare Capitalism*, Basingstoke, Palgrave Macmillan.
- Hemerijck, Anton (2013): *Changing Welfare States*, Oxford, Oxford University Press.
- Hobolt, Sara (2015): «Public attitudes toward the eurozone crisis», en O. Cramme y S. Hobolt (eds.), *Democratic Politics in a European Union under Stress*, Oxford, Oxford University Press.
- Hochschild, Arlie Russell (2016): *Strangers in Their Own Land*, Nueva York, New Press.
- Hochschild, Jennifer y Mollenkopt, John H. (2009): *Bringing Outsiders In: Transatlantic Perspectives on Immigrant Political Incorporation*, Ithaca, Cornell.
- Hofstädter, Richard (1964): *The Paranoid Style in American Politics and Other Essays*, Nueva York, Alfred A. Knopf.
- Hooghe, L. y Marks, G. (2009): «A postfunctionalist theory of European integration: from permissive consensus to constraining dissensus», en *British Journal of Political Science*, vol. 39, n.º 1, pp. 1-23.
- Inglehart, Ronald y Norris, Pippa (2016): «Trump, Brexit and the rise of populism: economic have-nots and cultural backlash». Ponencia para el congreso anual de la American Political Science Association, Filadelfia, del 1 al 4 de septiembre.
- Jäger, Anton (2018): «The myth of "populism"», en *Jacobin*, 3 de enero. Disponible en <https://www.jacobinmag.com/2018/01/populism-douglas-hofstadterdonald-trump-democracy>
- Judis, John B. (2016): *The Populist Explosion: How the Great Recession Transformed American and European Politics*, Nueva York, Columbia Global Reports.
- Kahneman, Daniel (2011): *Thinking Fast and Slow*, Nueva York, Farrar, Straus and Giroux.
- Kelemen, Daniel (2017): «Europe's authoritarian equilibrium», en *Foreign Affairs*. Disponible en <https://www.foreignaffairs.com/print/1121678>
- Kriesi, Hans-Peter (2014): «The populist challenge», en *West European Politics*, vol. 37, n.º 2, pp. 379-399.
- (2016): «The politicization of European integration», en *Journal of Common Market Studies*, n.º 54 (informe anual), pp. 32-47.
- Kriesi, H., E. Grande; Dolezal, M.; Helbling, M.; Höglinger, D.; Hutter S. y Wueest, B. (2012): *Political Conflict in Western Europe*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Lackoff, George (2014): *Don't Think of an Elephant? Know your Values and Frame the Debate*, White River Junction, VT, Chelsea Green Publishing.
- (2016): «Understanding Trump's use of language», en *Social Europe*, 23 de agosto.
- Laclau, Ernesto (2005): *On Populist Reason*, Londres, Verso. [Ed. esp. (2005): *La razón populista*, Madrid, Fondo de Cultura Económica.]
- Levitsky, Steven y Ziblatt, Daniel (2018): *How Democracies Die*, Nueva York, Viking.
- Lilla, Mark (2017): *The Once and Future Liberal*, Nueva York, Harper.
- Mair, Peter (2013): *Ruling the Void: The Hollowing of Western Democracy*, Londres, Verso.
- March, Luke y Cas Mudde (2005): «What's left of the radical left? The European radical left after 1989: Decline and mutation», en *Comparative European Politics*, vol. 3, n.º 1, pp. 23-49.
- McClaren, Lauren (2012): «The cultural divide in Europe: migration, multiculturalism, political trust», en *World Politics*, vol. 64, n.º 2, pp. 199-241.
- Minkenberg, Michael (2002): «The radical right in postsocialist Central and Eastern Europe: comparative observations and interpretations», en *East European Politics and Societies*, vol. 16, n.º 2, pp. 335-362.
- Mouffe, Chantal (2018): *For a Left Populism*, Londres, Verso Books.
- Mounk, Yascha (2018): *The People vs. Democracy: Why our Freedom is in Danger & How to Save It*, Cambridge, Harvard University Press.
- Mudde, Cas (2005): *Racist Extremism in Central and Eastern Europe*, Londres, Routledge.
- (2017): *The Populist Radical Right: A Reader*, Londres, Routledge.
- Mudde, Cas y Rovira Kaltwasser, Cristóbal (2012): *Populism in Europe and the Americas: Threat or Corrective to Democracy*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Müller, Jan-Werner (2016): *What is Populism?*, Filadelfia, University of Pennsylvania Press.
- Mutz, Diane (2015): *In-Your-Face Politics: The Consequences of Uncivil Media*, Princeton, Princeton University Press.
- Panizza, Francisco (2005): «Introduction: populism and the mirror of democracy», en *Populism and the Mirror of Democracy*, Londres, Verso.
- Piketty, Thomas (2014): *Capital in the Twenty-First Century*, Cambridge, Belknap Press of Harvard University.
- Prosser, Thomas (2016): «Insiders and outsiders on a European scale», en *European Journal of Industrial Relations*. Disponible en <https://doi.org/10.1177/0959680116668026>
- Rodrik, Dani (2011): *The Globalization Paradox*, Nueva York, Norton.
- Rosenbluth, Frances McCall y Shapiro, Ian (2018): *Responsible Parties: Saving Democracy from Itself*, New Haven, Yale University Press.

- Rydgren, Jens (2004): «Explaining the emergence of radical right-wing populist parties: the case of Denmark», en *West European Politics*, vol. 27, n.º 3, pp. 474-502.
- Scharpf, Fritz W. (2014): «Political legitimacy in a non-optimal currency area», en Olaf Cramme y Sara B. Hobolt (eds.), *Democratic Politics in a European Union under Stress*, Oxford, Oxford University Press.
- Schmidt, Vivien A. (2002): *The Futures of European Capitalism*, Oxford, Oxford University Press.
- (2006): *Democracy in Europe: The EU and National Politics*, Oxford, Oxford University Press.
- (2017): «Britain-out and Trump-in: a discursive institutionalist analysis of the British referendum on the EU and the US presidential election», en *Review of International Political Economy*, vol. 24, n.º 2, pp. 248-269.
- Schmidt, Vivien A. y Thatcher, Mark (2013): «Introduction: The resilience of neo-liberal ideas», en V. Schmidt y M. Thatcher (eds.), *Resilient Liberalism in Europe's Political Economy*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Simmons, Katie; Silver, Laura Johnson, Courtney; Taylor, Kyle y Wike, Richard (2018): «In Western Europe, populist parties tap anti-establishment frustration but have little appeal across ideological divide», Pew Research Center, 12 de julio. Disponible en http://assets.pewresearch.org/wp-content/uploads/sites/2/2018/07/12092128/Pew-Research-Center-Western-Europe-Political-Ideology-Report_2018-07-12.pdf
- Skocpol, Theda y Williamson, Vanessa (2012): *The Tea Party and the Remaking of American Conservatism*, Nueva York, Oxford University Press.
- Standing, Guy (2011): *The Precariat: The New Dangerous Class*, Londres, Bloomsbury.
- Stiglitz, Joseph (2002): *Globalization and its Discontents*, Nueva York, Norton. [Ed. esp. (2007): *El malestar de la globalización*. Madrid, Punto de Lectura.]
- Taggart, Paul (2000): *Populism*, Buckingham, Reino Unido, Open University Press.
- (2017): «New populist parties in Western Europe», en Cas Mudde (ed.), *The Populist Radical Right: A Reader*, Londres, Routledge.
- Taguieff, Pierre André (1984): «La rhétorique du national-populisme», en *Mots*, n.º 9, pp. 113-138.
- Thompson, Mark (2016): *Enough Said: What's Gone Wrong with the Language of Politics?*, Nueva York, St. Martin's Press.
- Vasilopoulou, Sofia (2018): «The party politics of Euroscepticism in times of crisis: the case of Greece», en *Politics*. Disponible en <http://eprints.whiterose.ac.uk/128036/>
- Weyland, Kurt (2001): «Clarifying a contested concept: populism in the study of Latin American politics», en *Comparative Politics*, vol. 39, n.º 1, pp. 1-34.
- Wodak, Ruth (2015): *The Politics of Fear: What Right Wing Populist Discourses Mean*, Londres, Sage.



Diana Owen
Georgetown University

Diana Owen es profesora de Comunicación, Cultura y Tecnología y exdirectora de Estudios Estadounidenses en la Universidad de Georgetown. Experta en ciencias políticas, sus investigaciones se centran en explorar los nuevos medios políticos y la educación ciudadana en la era digital. Es autora de *Media Messages in American Presidential Elections* (Nueva York, 1991), *New Media and American Politics* (New York, 1998; en colaboración con Richard Davis) y *American Government and Politics in the Information Age* (con David Paletz y Timothy Cook). Es coeditora de *The Internet and Politics: Citizens, Voters, and Activists* (Londres, 2006); de *Making a Difference: The Internet and Elections in Comparative Perspective* (Plymouth, 2008) y de *Internet Election Campaigns in the United States, Japan, Korea, and Taiwan* (Cham, 2018). Ha recibido becas de Pew Charitable Trusts, el Center for Civic Education, Storyful/News Corp, Google y el Departamento de Educación de Estados Unidos. La profesora Owen ha sido becaria de investigación del Congressional Fellowship Program en la American Political Science Association y receptora del Daniel Roselle Award del Middle States Council for the Social Studies.

Libro recomendado: Paletz, David; Owen, Diana y Cook, Timothy (2018): *American Government and Politics in the Information Age* [Gobierno americano y política en la era de la información], Boston, FlatWorld KnowledgePress.

El sistema de medios de comunicación estadounidense ha experimentado transformaciones profundas desde la aparición de los nuevos medios a finales de la década de 1980. En los últimos diez años, las redes sociales se han convertido en potentes herramientas políticas para campañas y gobiernos. Este capítulo explora tres grandes tendencias relacionadas con el auge de las redes sociales que afectan a la democracia en Estados Unidos. Para empezar, se ha producido un cambio radical en cómo y dónde se obtiene la información política, a medida que las personas recurren a fuentes digitales y abandonan las noticias por televisión. En segundo lugar está la aparición del *Twitterverso* político, que se ha convertido en foro de comunicación entre políticos, ciudadanos y la prensa, impulsando una época «regida por el tuit» y fomentando la desinformación. Por último, la desaparición de proveedores de información local y el consiguiente aumento de «desiertos informativos» han permitido que los mensajes en las redes sociales se conviertan en la fuente primaria de información en aquellos lugares donde Donald Trump goza de especial apoyo.



El panorama de los medios de comunicación políticos estadounidenses ha experimentado enormes transformaciones en las tres últimas décadas. La evolución de estos nuevos medios ha tenido un enorme alcance y afecta tanto a fuentes preexistentes como a plataformas de comunicación absolutamente inéditas, posibilitadas por las nuevas tecnologías. La era de los nuevos medios comenzó en la década de 1980 con la tendencia a fundir información y espectáculo, cuando los programas de entrevistas televisivos y radiofónicos y los tabloides fueron asumiendo un papel político más relevante. Los cambios se tornaron más radicales cuando, en la década siguiente, internet se convirtió en difusor de contenidos políticos. Al principio, la tecnología digital posibilitaba plataformas en las que se podía acceder a documentos y folletos sin modificarlos, pero no tardó en ofrecer portales con elementos interactivos. El público aumentó su capacidad de participación política mediante dispositivos tecnológicos que le permitían reaccionar ante acontecimientos o problemas políticos, comunicarse directamente con candidatos y líderes, aportar sus propias noticias, imágenes, vídeos y contenidos y participar en actividades como el apoyo a candidatos, la recaudación de fondos y la organización de protestas. Al mismo tiempo, los periodistas se dotaron de mecanismos innovadores para informar y llegar al público. Los políticos incorporaron nuevas formas de transmitir mensajes a la población, a otras elites y a la prensa, y de influir en las opiniones de sus circunscripciones electorales, reclutar voluntarios y donantes y movilizar a los votantes (Davis y Owen, 1998; Owen, 2017a).

De especial trascendencia ha sido la evolución de redes sociales como Facebook, Twitter y YouTube, que han dejado de ser redes que facilitan el contacto entre amigos para convertirse en poderosas herramientas políticas. El papel político de las redes sociales en Estados Unidos se consolidó durante las elecciones presidenciales de 2008. La estrategia en las redes sociales del candidato demócrata Barack Obama revolucionó las campañas, al alterar la estructura de la organización política. La campaña de Obama adoptó trazas de movimiento social con un fuerte componente de movilización digital de base (Bimber, 2014). La campaña explotó el potencial de las redes sociales para la creación de redes, la colaboración y el desarrollo de comunidades. Los utilizó para hacer llamamientos personalizados a los votantes, basándose en análisis de datos y en mensajes adaptados a sectores concretos. Los votantes creaban y amplificaban los mensajes sobre los candidatos sin pasar ni por la propia organización de la campaña ni por los partidos políticos (Stromer-Galley, 2016). Los vídeos más virales de la campaña de 2008, «Obama Girl», de BarelyPolitical.com, y «Yes, We Can», de will.i.am, fueron de producción independiente y tuvieron millones de espectadores (Wallsten, 2010). En estas elecciones tan singulares, las innovaciones espontáneas de los propios votantes contribuyeron a las calculadas estrategias de los organizadores de la campaña oficial de Obama. Con posterioridad, las campañas, también el equipo que organizó la de Obama en 2012, pondrían gran empeño en restringir las iniciativas externas y en ejercer más control sobre la relación entre campaña y medios de comunicación (Stromer-Galley, 2016).

A partir de ese momento, la función política de las redes sociales en las campañas, el gobierno y los movimientos políticos, así como su papel en el ecosistema de la información mediática han ampliado con rapidez su alcance, su relevancia y su complejidad. Como señala el politólogo Bruce Bimber: «El ejercicio del poder y la configuración de la ventaja y el dominio en la democracia van unidos al cambio tecnológico» (2014, p. 130). En gran medida, lo que determina quién controla, consume y distribuye información es quién se maneja mejor con la tecnología digital. Las redes sociales se han convertido en intermediarios esenciales que los actores políticos y mediáticos utilizan para garantizar su influencia. Los dirigentes políticos se han apropiado de esos medios para alcanzar sus fines y cada vez fuerzan más, hasta el extremo, los límites del discurso. La utilización que hace Donald Trump de Twitter,



chabacana y con frecuencia imprudente, le ha permitido comunicarse directamente con el público, dirigir a sus aliados y detractores políticos y controlar la agenda informativa. Con la ayuda de las redes sociales, ha superado la capacidad que tenían sus antecesores más inmediatos en la presidencia para alcanzar esos fines. Las plataformas de las redes sociales facilitan la creación y el mantenimiento de grupos creados *ad hoc*, entre ellos los de la derecha alternativa y los de extrema izquierda. Esos factores han fomentado la ingente proliferación de noticias falsas, que amenazan con minar un sistema democrático basado en el acceso de los ciudadanos a una información de calidad que posibilite la toma de decisiones.

Las redes sociales apenas filtran a sus miembros y ofrecen múltiples oportunidades para la acción política masiva. Tienen un acceso centralizado a la información y han facilitado que la población conectada a internet siga los acontecimientos políticos. Está aumentando el número de personas que las utiliza para participar en debates y difundir mensajes en sus propias redes sociales (Owen, 2017b). El uso eficaz de las redes sociales ha contribuido al éxito de los movimientos sociales y de las protestas políticas, al fomentar mensajes unificadores y facilitar la logística (Jost *et al.*, 2018). El movimiento #MeToo se convirtió en un fenómeno global gracias a que las redes sociales corrieron la voz. La actriz Alyssa Milano envió un tuit animando a las mujeres que hubieran sido víctimas de acoso o agresión sexual a utilizar la etiqueta #MeToo en sus cuentas. Solo veinticuatro horas después, 4,7 millones de personas en Facebook y casi un millón en Twitter habían utilizado la etiqueta. Cuarenta y cinco días después la cifra había superado los 85 millones de usuarios en 85 países (Sayej, 2017).

En cualquier caso, hay indicios de que la elite política intenta cada vez más modelar, e incluso restringir, la influencia digital del público en la esfera política. Desde 2008, los partidos y organizadores de campañas han tratado de fiscalizar la participación digital de los votantes en las elecciones, canalizándola a través de páginas web oficiales y plataformas de redes sociales. Han controlado su acceso a la información adaptando los mensajes al milímetro, utilizando datos personales de los usuarios, tendencias políticas y preferencias de consumo derivadas de sus cuentas en redes sociales. Además, un pequeño número de empresas, sobre todo Google y Facebook, tiene un poder desmesurado sobre nuestra forma de utilizar el tiempo y el dinero en internet. Su capacidad de atraer y conservar al público socava la capacidad de las empresas pequeñas, los proveedores de información local y los individuos de defender su espacio en el mercado digital (Hindman, 2018).

El papel político de las redes sociales en Estados Unidos se consolidó en las elecciones de 2008. La estrategia de Obama revolucionó las campañas al adoptar trazas de movimiento social con un fuerte componente de movilización digital de base

Este capítulo se centrará en tres tendencias importantes relacionadas con el auge de las redes sociales durante la última década que tienen una especial relevancia para la política y el gobierno democráticos en Estados Unidos. En primer lugar, el desplazamiento de las preferencias del público de los medios de comunicación tradicionales a las fuentes digitales ha cambiado la forma de seguir la política y el tipo de información a la que se accede. En la actualidad son muchos los que se informan a través de sus canales en las redes sociales, lo cual contribuye a una insularidad, una polarización y un incivismo galopantes. A esto hay que añadir que la aparición del llamado *Twitterverso* político ha cambiado de manera



radical la forma que tienen los políticos, los ciudadanos y la prensa de transmitir la información, incluyendo mensajes de gran importancia para el país. El *Twitterverso* se compone tanto de usuarios de plataformas de microblogueo como de aquellos que acceden a sus contenidos cuando se diseminan por otros medios, como los canales de información de 24 horas. En la era Trump, Twitter y otras redes sociales han potenciado la proliferación de desinformación, información falsa, «datos alternativos» y «noticias falsas». Lo primordial es que la presidencia de Trump ha dado paso a una época «regida por el tuit», en la que los políticos hacen declaraciones importantes y realizan tareas de gobierno a través de Twitter. Por último, la expansión de los «desiertos informativos» —lugares de donde han desaparecido los medios de información local— ha puesto en peligro la capacidad de los medios institucionales para poner coto a la información falsa que propagan las redes sociales, fuentes sectarias y *bots* que difunden propaganda manipulada por medios informáticos.

El cambio en las preferencias mediáticas del público

Las opciones de las que disponen los consumidores de noticias se han disparado, ya que no dejan de aumentar las fuentes de distribución: medios impresos, televisión, radio, ordenador, tabletas y dispositivos móviles. Desde las elecciones presidenciales de 2016 y la turbulenta época posterior, el número de estadounidenses que busca noticias e información política es mayor que en otros momentos de la década pasada. Al mismo tiempo, siete de cada diez personas acusan cansancio informativo y se sienten agotadas por la descarga constante de versiones enfrentadas que se ofrecen cada día (Gottfried y Barthel, 2018). Algo que no resulta sorprendente si tenemos en cuenta que en los titulares de un solo día de septiembre de 2018 aparecía la doctora Christine Blasey Ford declarando que había sido agredida sexualmente por el juez Brett Kavanaugh, candidato a magistrado del Tribunal Supremo de Estados Unidos; la posibilidad de que el presidente Donald Trump pudiera destituir al vicefiscal general Rod Rosenstein, que dirige la investigación sobre la intervención rusa en las presidenciales de 2016, por sugerir en una reunión privada que se tomaran medidas para apartar a Trump de su cargo, y la pena de cárcel por conducta sexual indebida para el cómico Bill Cosby, al que se sacó de la sala esposado.

Dónde se informan los estadounidenses Una de las transformaciones más destacadas de la última década es la relacionada con el dónde y el cómo acceden a la información política los estadounidenses. Se ha producido una profunda transformación en las preferencias del público, que se ha apartado de los medios tradicionales, sobre todo la televisión y los periódicos impresos, para optar por fuentes de información en internet y, más recientemente, por nuevas aplicaciones móviles. Las redes sociales se han convertido en importantes fuentes de información para millones de estadounidenses, que, o bien reciben contenidos políticos mediante suscripción, o se la encuentran por casualidad en su sección de «noticias». Las tendencias de uso de los medios de comunicación quedan más patentes en periodos de gran concienciación política, como las campañas electorales. En este sentido, la figura 1 presenta el porcentaje de adultos que utilizó con frecuencia ciertos tipos de medios para informarse sobre las presidenciales de 2008, 2012 y 2016.

La pasión que envolvió los comicios de 2008, en gran medida atribuida a la histórica candidatura de Barack Obama, unida a las transformaciones digitales de la campaña, hicieron que el número regular de consumidores de información a través de internet se disparara desde el 9% de 2006 hasta el 37%. En 2012 la atención a las noticias en internet menguó relativamente



Estudiantes de la University of Southern California (USC) siguen en directo el juicio a Brett Kavanaugh, candidato a la Corte Suprema de Estados Unidos, acusado de abusos sexuales por Christine Blasey Ford (en la imagen, a la izquierda), 27 de septiembre de 2018





y bajó hasta el 31%, ya que los votantes tenían menos interés en la campaña electoral de 2012, en la que el presidente Obama aspiraba a la reelección frente al aspirante republicano Mitt Romney. Sin embargo, el consumo de noticias difundidas por internet y a través de aplicaciones se disparó hasta el 43% de la población durante las elecciones de 2016, en las que se enfrentaron la demócrata Hillary Clinton y el republicano Donald Trump.

Si metemos en el mismo saco la televisión por cable, las grandes cadenas y las cadenas locales, podemos decir que durante todo este periodo la televisión fue la principal fuente de información electoral para la mayoría de los ciudadanos. El número de espectadores de los informativos de las grandes cadenas había registrado una caída en picado antes de 2008 y su público se mantuvo en un nivel constante, en torno al 30% de la población, durante esos tres ciclos electorales, hasta que, en 2017, cayó hasta el 26%. La audiencia de los informativos de las cadenas por cable se redujo ligeramente, pasando de alrededor del 40% en 2008 y 2012 al 31% en 2016 y al 28% en 2017. Al igual que los de las grandes cadenas, los informativos de las cadenas de televisión local han perdido espectadores durante las dos últimas décadas. Puede que este declive se deba en parte a la desaparición de los programas de información local independiente, ahora sustituidos por espacios creados por el grupo mediático conservador Sinclair Broadcast Group. En su mejor momento, los informativos locales los veía de forma habitual más del 70% de la población. La información local era la que más audiencia televisiva atraía en 2008 (52%), cayó en picado en 2012 (38%), volvió a subir en 2016 (46%) y se redujo hasta el 37% en 2017 (Matsa, 2018).

En un periodo relativamente corto, la preferencia del público por internet se ha ido imponiendo sobre los noticiarios de televisión como fuente principal de información. En 2016, el 57% de la población se informaba a través de la televisión, frente al 38% que utilizaba fuentes virtuales. Entre 2016 y 2017, la audiencia televisiva ya estaba en el 50% de la población y la de la información por internet había subido hasta el 43%. En solo un año, la diferencia del 19% a favor de la televisión se había estrechado hasta un margen de solo un 7% (Gottfried y Shearer, 2017). De continuar las tendencias actuales, puede que la información por internet eclipse a la televisiva y que en un futuro no muy lejano esta deje de ser la principal fuente de noticias.

Al ir aumentando la preferencia del público por la información en internet se ha producido una importante reducción de los lectores de periódicos en papel. En 2008, el 34% de la población leía de forma habitual un periódico impreso. En 2012, esa cifra había caído hasta el 23% y siguió cayendo hasta el 20% en 2016 y el 18% en 2017. La información radiofónica ha mantenido una cuota de audiencia más o menos estable, con picos ocasionales cuando las noticias políticas son especialmente absorbentes, como durante la campaña presidencial de 2008, cuando el 35% del público sintonizaba la radio de manera habitual. Los oyentes de los noticiarios radiofónicos se mantienen en torno a un 25% del público desde 2012. Los programas de radio, impulsados por la popularidad de presentadores conservadores como Rush Limbaugh y las emisoras comunitarias que ofrecen información local no dejan de atraer a entre el 10% y el 12% de la población (Guo, 2015).

Las redes sociales como fuente de información La utilización de las redes sociales por parte de la población estadounidense aumentó con rapidez en el periodo posterior a las presidenciales de 2008. El acceso a redes sociales en busca de noticias e información política no ha dejado de incrementarse durante la última década. Según el Pew Research Center, en 2018 el 68% de los adultos de Estados Unidos se informaba a través de redes sociales, por lo menos ocasionalmente, y el 20% los utilizaba con frecuencia para obtener información (Shearer y Matsa, 2018). La figura 2 presenta datos del Pew Research Center que indican el porcentaje

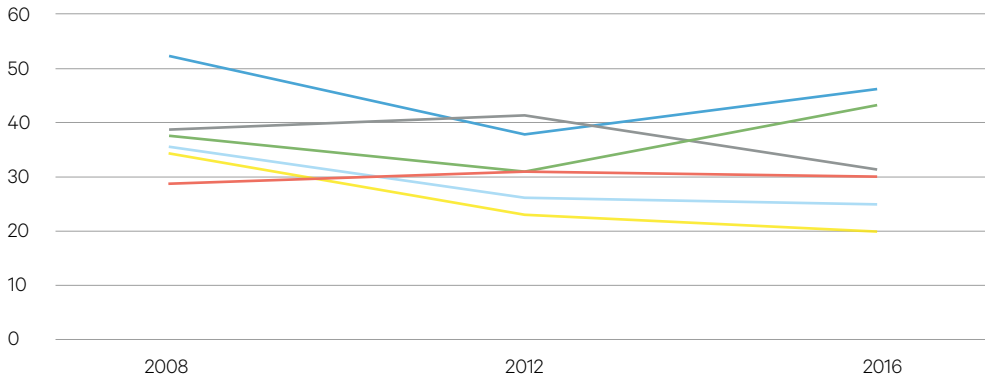


Figura 1. Porcentaje de adultos estadounidenses que accedieron con frecuencia a medios de comunicación durante las elecciones presidenciales de 2008, 2012 y 2016. Fuente: Pew Research Center Data

- Noticiarios de TV por cable
- Noticiarios de TV, grandes cadenas
- Noticias de TV locales
- Periódicos impresos
- Radio
- Noticias a través de internet o aplicación

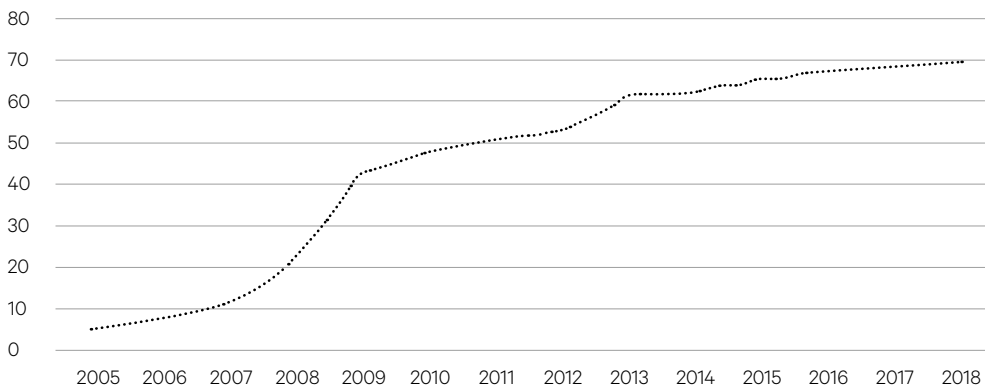


Figura 2. Utilización de las redes sociales por parte de los estadounidenses, 2005-2018. Fuente: Pew Research Center, Social Media Fact Sheet, 2018

de estadounidenses que ha utilizado con regularidad por lo menos un medio social como Facebook, Twitter o LinkedIn a lo largo del tiempo. Entre 2005 y 2008 pocas personas estaban activas en las redes sociales. Ni siquiera durante la decisiva campaña de 2008, ya que solo el 21% de la población estaba entonces en redes sociales. Sin embargo, en 2009 el número de personas que entraba en internet se había disparado hasta alcanzar el 42% y las redes sociales se afianzaron en la esfera política en vísperas de las elecciones a mitad de mandato de 2010. El Tea Party, un movimiento populista de estructura laxa que presentó algunos candidatos que llegaron al poder, optó por privilegiar las redes sociales, para no tener que recurrir a la prensa tradicional que solía denostar. Por su parte, la prensa tradicional se vio obligada a cubrir las declaraciones del Tea Party en las redes sociales, lo cual contribuyó a que las plataformas digitales ganaran popularidad entre los votantes. Los usuarios de redes sociales que se mantuvieron leales al Tea Party fueron destacados participantes en la campaña de Donald Trump, movilizando a votantes en sus redes (Rohlinger y Bunnage, 2017). En 2013, más del



60% de la población utilizaba redes sociales. Desde las elecciones presidenciales de 2016, el porcentaje de usuarios de estos medios se ha estabilizado en torno al 70%.

Este desplazamiento de las lealtades mediáticas de la población, que benefició a las fuentes digitales, ha hecho de las redes sociales una herramienta política mucho más viable y eficaz. Hace una década, solo los ciudadanos más interesados y tecnológicamente capaces utilizaban esos medios con fines políticos. En ese ámbito, los jóvenes tenían ventaja, dado que la tecnología les resultaba más fácil y les fascinaba esta novedosa forma de acercarse a la política. Las diferencias de edad respecto al uso de las redes sociales han ido menguando al mismo tiempo que las relativas a otros rasgos demográficos como género, raza, educación y renta (Smith y Anderson, 2018), lo cual ha alterado la percepción que tienen los políticos de esas plataformas. Antes, las elites utilizaban las redes sociales sobre todo para fijar la agenda de los medios tradicionales, de manera que sus mensajes pudieran difundirse por doquier. En la actualidad, los líderes políticos no solo se sirven de las redes sociales para controlar la agenda de la prensa, también utilizan con eficacia esas plataformas para atender a su base política. Además, las elites utilizan las redes sociales para comunicarse entre sí en un foro público. En 2017, Donald Trump y el presidente norcoreano Kim Jong Un intercambiaron pullas en Twitter que dispararon las tensiones entre sus dos países a cuenta del armamento nuclear. Se lanzaron insultos personales: Trump llamó a Kim «hombrecillo del misil» y Kim lo tachó a él de «chocho» y «viejo lunático». Trump también se enzarzó en enconados enfrentamientos vía Twitter con el presidente francés Emmanuel Macron y con el primer ministro canadiense Justin Trudeau por los aranceles y el comercio, que a comienzos de 2018 llevaron al presidente estadounidense a abandonar la cumbre del G7 (Liptak, Kosinski y Diamond, 2018).

El *Twitterverso* político

La aparición del *Twitterverso* político ha coincidido con el ascenso de las redes sociales en la última década. Estos medios se diferencian de otros canales digitales en que albergan interacciones de usuarios que crean perfiles personales y se comunican entre sí dentro de sus redes (Carr y Hayes, 2015). Los participantes utilizan esos medios para crear y distribuir contenidos, consumir y modificar materiales colgados por sus contactos y expresar sus opiniones públicamente (Ellison y Boyd, 2013). Las redes sociales pueden ayudar a la gente a mantener y desarrollar relaciones, a participar en actividades de vigilancia y voyerismo y a promocionarse (Alhabash y Ma, 2017). Los usuarios de las redes sociales suelen utilizarlas para buscar y seguir a personas y grupos afines, lo cual fomenta los vínculos sociales, refuerza las identidades personales y políticas y genera camaradería digital (Jung y Sundar, 2016; Joinson, 2008). Estos rasgos favorecen enormemente la adaptación de las redes sociales —sobre todo de Twitter— a la utilización para fines políticos. Los seguidores de Trump en Twitter se identifican con él personalmente, lo cual alienta la aceptación *in toto* de sus políticas (Owen, 2018).

Orígenes de las redes sociales La época actual de comunicación en red se inició con la invención de la llamada World Wide Web en 1991 y con el desarrollo de blogs, listas de distribución y del correo electrónico en los que se basaban las comunidades virtuales. El primer medio social, Six Degrees, se creó en 1997 y desapareció en 2000 por falta de usuarios. A finales de la década de 1990 y comienzos de la de 2000 también surgieron portales especializados para grupos identitarios, como Asian Avenue, o para círculos de amigos, entre ellos Friendster y MySpace; para facilitar los contactos profesionales, como LinkedIn, y para partidarios de determinadas políticas públicas, como MoveOn. La aparición de la Web 2.0 a mediados de la



década de 2000, con su énfasis en las plataformas participativas, los usuarios y la colaboración entre ellos, coincidió con el desarrollo de redes sociales longevas como Facebook (2004) y YouTube (2005) (Van Dijck, 2013; Edosomwan *et al.*, 2011), que se han convertido en elementos fundamentales para las campañas y las organizaciones políticas, y también para el gobierno.

Cuando se creó Twitter, en 2006, se concibió como un portal de microblogueo en el que grupos de amigos pudieran enviarse mensajes breves y en tiempo real (tuits) sobre lo que ocurría en su vida, como si fueran SMS. Los usuarios también podrían colgar fotos, GIF y vídeos cortos. Al principio, Twitter impuso un límite de 140 caracteres a los tuits, el mismo que imponían las empresas de telefonía móvil a los SMS. En 2017, el límite se extendió a 280 caracteres, cuando la plataforma estaba en pleno apogeo y las restricciones de los proveedores de servicios inalámbricos al volumen de los contenidos ya no tenían sentido. Era fácil sortear el límite de caracteres enviando múltiples tuits seguidos, algo que hacía con frecuencia Donald Trump. Los usuarios de Twitter no tardaron en intentar ampliar la funcionalidad de la plataforma utilizando el símbolo @ antes del nombre de un usuario para identificarlo e incluyendo *#hashtags* (etiquetas) para marcar los contenidos, con lo que se facilitaba el seguimiento de temas e ideas. Aunque en Twitter resulte difícil conocer el número real de seguidores, ya que hay muchas cuentas inactivas o controladas por *bots*, se calcula que en 2018 había en todo el mundo 335 millones de usuarios mensuales activos (Statista, 2018). Pese a todo, Twitter tardó doce años en generar beneficios, y lo logró cuando puso más atención en la venta de anuncios (Tsukayama, 2018).

Twitter en la era Trump El uso que Trump hace de Twitter ha puesto patas arriba las prácticas de comunicación habituales entre los políticos estadounidenses. Trump ya estaba en Twitter siete años antes de aspirar a la presidencia. Su característico estilo en esa plataforma surgió durante su época en el programa de telerrealidad *The Apprentice* y apenas ha cambiado desde que inició su carrera política. Sus declaraciones en Twitter son superficiales, algo que encaja con un medio que limita el número de palabras de las entradas. Sus mensajes, de tono coloquial, utilizan un vocabulario sencillo, informal, de cuarto de primaria. Los tuits de Trump suenan como los de un vendedor ambulante que quiere colocar sus productos (Grieve y Clarke, 2017; Clarke y Grieve, 2017). A menudo son contradictorios, confusos e imprecisos, lo cual permite a los usuarios interpretarlos según sus propios prejuicios. Son mensajes repetitivos y con una cadencia similar, lo cual acentúa la sensación de fiabilidad y familiaridad entre sus incondicionales (Graham, 2018).

Los usuarios de las redes sociales suelen utilizarlas para buscar y seguir a personas y grupos afines, lo cual fomenta los vínculos sociales, refuerza las identidades personales y políticas y genera camaradería digital

Trump ha presumido de que su control sobre Twitter le allanó el camino a la Casa Blanca (Tatum, 2017). Es cierto que cuando era candidato a la presidencia dio buen uso a Twitter para difundir sus ideas, atacar a su larga lista de enemigos y secuestrar el discurso político. Durante la campaña, sus partidarios se convirtieron en fervientes seguidores de sus mensajes en Twitter. El tipo de campaña que hizo Trump en las redes sociales contrastaba con el enfoque más controlado de Hillary Clinton, el habitual antes de la llegada de Trump (Enli, 2017). Los mensajes de Clinton en las redes sociales eran de tono mesurado, no solían incurrir



El *Twitterverso* político ha cambiado radicalmente la forma que tienen los políticos, los ciudadanos y la prensa de transmitir la información

Un anuncio de Twitter en una estación de metro de Nueva York muestra al expresidente de Estados Unidos, Barack Obama, con su mujer Michelle Obama





- [!\[\]\(1207edb9a08751d3d55970560645ed23_img.jpg\)](#)
- [!\[\]\(d7a34a706cfa4ef37c62a369101e1b36_img.jpg\)](#)
- [!\[\]\(7325769475e8f4bf67f57a0cbebc8ab9_img.jpg\)](#)
- [!\[\]\(1a468f12cdfc63dc07896d0781cf55ec_img.jpg\)](#)



en ataques personales y proporcionaban razones y datos para avalar sus posiciones políticas. Por el contrario, Trump hacía declaraciones poco matizadas, generales, sin base empírica (Stromer-Galley, 2016) y se atribuía logros ajenos (Tsur *et al.*, 2016).

Desde las elecciones, Twitter se ha convertido en el vínculo de Trump con el mundo exterior a la Casa Blanca. Ahora «gobierna mediante tuits», ya que su cuenta de Twitter sustituye a las conferencias de prensa presidenciales y a las alocuciones radiofónicas semanales que eran habituales entre sus antecesores cuando había que hacer grandes anuncios políticos. Trump genera de manera constante tuits desagradables y escandalosos para no dejar de ser nunca el centro de atención, aunque haya desastres políticos y naturales que le arrebaten el primer plano. Twitter transforma el ciclo vital de las noticias, ya que el proceso informativo puede verse inmediatamente superado por la novedad que genera un tuit provocador. Según un estrategia de comunicación digital de la campaña de Trump llamado Cassidy, se trata de una táctica deliberada: «Desde el principio de su candidatura, el objetivo de Trump ha sido marcar la agenda de los medios. Su estrategia es que todo se mueva muy rápido, producir tanto ruido —literal y metafórico— que los medios, la gente, no puedan seguir el ritmo» (Woolley y Guilbeault, 2017, p. 4). Las andanadas de Trump en Twitter han arrinconado con frecuencia debates públicos de políticas importantes como las de inmigración y sanidad, apartado la atención de vergonzosos escándalos personales e intentado camuflar los reveses que sufre su Administración.

Amplificación, incivismo y polarización El poder de influencia política de las redes sociales aumenta gracias a su capacidad para amplificar rápidamente mensajes a través de diversas plataformas. Esos medios se han convertido en una fuente constante de contenidos políticos para servicios de información con gran audiencia, sobre todos los de cable. Los partidarios de Trump sintonizan con frecuencia Fox News para jalear las últimas proezas del presidente en Twitter. Invitados en medios como CNN y MSNBC, que tienen una visión más negativa de Trump, dedican muchísimas horas a tratar de interpretar sus tuits, mientras los mensajes aparecen en pantalla en lugar preferente. Los partidarios que interactúan con sus mensajes, los anotan y los difunden, otorgan todavía más credibilidad a las misivas de Trump en sus propias redes. Cada uno de los mensajes del presidente se retuitea una media de 20.000 veces; algunas de sus interminables diatribas contra los medios se han llegado a retuitear 50.000 veces (Wallsten, 2018). La percepción de que Trump es poderoso la fomenta simplemente la atención que suscita. Los políticos pueden utilizar la capacidad de amplificación de las redes sociales para galvanizar la opinión pública e instarla a actuar. Se ha comprobado que estas ventajas de la amplificación en Twitter conceden mucho más poder a los hombres que a las mujeres. Los periodistas varones tienen más público en Twitter que sus compañeras y es más probable que difundan mensajes políticos de hombres que de mujeres (Usher, Holcomb y Littman, 2018).

Las redes sociales albergan debates cada vez más incívicos y políticamente polarizadores. Ahora se lanzan comentarios desconsiderados a la arena pública, donde pueden tener enormes repercusiones políticas (Van Dijck, 2013). Las virulentas declaraciones de Trump en Twitter carecen de filtros que respeten lo que se considera digno desde el punto de vista cultural. Hace un uso indiscriminado de la adjetivación, sobre todo para dar una imagen positiva de sí mismo y denigrar a otros. No deja de referirse a sí mismo con calificativos como «guapo», «grande», «el más inteligente», «el de más éxito» y «el de mayor cerebro». Por el contrario, alude a los que le caen mal como «la mentirosa Hillary Clinton», «el falso y despreciable James Comey» (exdirector del FBI) y la «loca de Mika» (Brzezinski, presentadora de una tertulia política). En junio de 2018, Trump había utilizado en 246 ocasiones el término «fracasado»;



el de «bobo» en 232 y el de «estúpido» en 192 desde el inicio de su presidencia para referirse a personas que le desagradan (Armstrong, 2018).

Los políticos se han enzarzado en guerras partidistas vía Twitter que han separado todavía más a republicanos y demócratas, conservadores y progresistas. Un día en el que el *New York Times* reveló que la familia de Trump había evitado pagar millones de dólares de impuestos y que había proporcionado al presidente mucho más apoyo financiero del que este había reconocido, Trump intentó desplazar la atención de la prensa tuiteando sobre la irritación que le producía ¡«el trato despiadado y despreciable que los demócratas están dando a Brett Kavanaugh (candidato a magistrado del Tribunal Supremo)!». Según investigaciones realizadas en la Universidad de Pensilvania, la utilización política de Twitter por parte de la población se concentra en una pequeña parte de la misma, formada por extremistas políticos que se consideran, o bien «muy conservadores», o bien «muy progresistas». Las voces políticas moderadas no suelen estar representadas en esa plataforma (Preotiuc-Pietro *et al.*, 2017).

El *Twitterverso* es muy propenso al engaño. Twitter y otras redes sociales han contribuido a la proliferación de informaciones falsas y de bulos, fomentando incluso ambas cosas, con noticias por completo inventadas. Los datos falsos circulan con facilidad por las redes sociales. Pueden llegar a plataformas de noticias respetables y resultan difíciles de refutar, ya que a la gente le cuesta distinguir entre verdad y ficción. Sin saberlo, muchas personas han difundido «noticias falsas» en sus redes sociales. De hecho, un estudio del MIT ha descubierto que las noticias falsas tienen más probabilidades de difundirse por las redes, por su carácter novedoso y porque suscitan la reacción emocional de los lectores (Vosoughi, Roy y Aral, 2018). El presidente Barack Obama ha calificado de «nube de polvo hecha de tonterías» (Heath, 2016) la confusión que generaron las teorías conspirativas y la información engañosa durante las elecciones de 2016.

La desinformación suele ir dirigida a públicos ideologizados, lo cual contribuye a acentuar la polarización política. Un análisis de *BuzzFeed News* descubrió que tres destacadas páginas derechistas de Facebook publicaban desinformación el 38% del tiempo y tres grandes páginas izquierdistas colgaban datos falsos el 20% del tiempo (Silverman *et al.*, 2016). La situación es todavía más grave en Twitter, donde las cuentas pueden ser totalmente anónimas y millones de *bots* automatizados y cuentas falsas han inundado la red de tuits y retuits. Esos *bots* no han tardado en sortear los detectores de mensajes basura instalados por Twitter (Manjoo, 2017).

Los partidarios de Trump sintonizan Fox News para jalear sus últimas proezas en Twitter. Invitados en medios como CNN y MSNBC, que tienen una visión más negativa de Trump, dedican horas a tratar de interpretar sus tuits, mientras los mensajes aparecen en pantalla en lugar preferente

La difusión de información falsa a través de Twitter ha cobrado especial ímpetu en la incertidumbre de la crisis actual, donde las mentiras pueden extenderse con mucha más rapidez que la verdad (Vosoughi, Roy y Aral, 2018). En febrero de 2018, mientras se producía la muerte a tiros de diecisiete alumnos del instituto de secundaria Marjory Stoneman Douglas de Parkland, en Florida, la desinformación y los bulos no dejaron de correr por la red. Las teorías conspirativas sobre la identidad del asesino apuntaban en la dirección equivocada. Circularon fotos falsas, tanto del sospechoso como de las víctimas. Se manipularon y retuitearon



mensajes de una reportera del *Miami Herald* para que pareciera que había solicitado fotos y vídeos de cadáveres a los alumnos. Una hora después del tiroteo, cuentas de Twitter gestionadas por *bots* rusos hicieron circular cientos de entradas sobre el problema candente del control de armas destinadas a generar polarización (Frenkel y Wakabayashi, 2018). En las semanas posteriores al tiroteo, cuando los alumnos de Parkland abogaron por medidas más estrictas para controlar las armas, proliferaron las teorías conspirativas. Según un rumor muy difundido, los alumnos eran «falsas víctimas» que no tenían nada que ver con el instituto. En YouTube se colgó un vídeo conspirativo manipulado que atacaba a los alumnos y se convirtió en uno de los más vistos de ese canal (Arkin y Popken, 2018).

La aparición de desiertos informativos

Las repercusiones del ascenso de las redes sociales y la difusión de información falsa se han visto agravadas por la desaparición del paisaje mediático de medios de información locales y fiables. La proliferación de «desiertos informativos» —comunidades en las que no hay proveedores de noticias locales responsables que informen a los residentes y contrarresten las noticias falsas— ha provocado que la desinformación se suela tomar por cierta y que se haga viral, sin control alguno, en las redes sociales (Bucay *et al.*, 2017). Facebook y Twitter se han resistido a combatir de forma eficaz el flujo de desinformación que circula por ellas e incluso se han negado a retirar de sus plataformas noticias patentemente falsas (Hautala, 2018). En 2018, Facebook, Twitter, Apple y YouTube proscibieron definitivamente al locutor radiofónico de la derecha alternativa Alex Jones y su portal, *InfoWars*, después de pasarse años sin adoptar ninguna medida disciplinaria contra su prolífica difusión de insultantes teorías conspirativas. Sin embargo, esta iniciativa fue algo excepcional entre las grandes empresas mediáticas. Estas circunstancias han puesto sobre la mesa las posibilidades que tiene la desinformación de desestabilizar el sistema político.

La proliferación de «desiertos informativos» —comunidades en las que no hay proveedores de noticias locales que contrarresten las noticias falsas— ha provocado que la desinformación se tome por cierta y se haga viral en las redes sociales

A lo largo de la historia, la información local ha sido un elemento clave de la dieta mediática de los estadounidenses. Hace menos de una década, los periódicos locales eran los responsables del 85% de las informaciones de carácter empírico y de las investigaciones (Jones, 2011). Sin embargo, con frecuencia se ha subestimado la importancia que tenían a la hora de informar a los habitantes de pueblos y comunidades suburbanas y de conformar sus opiniones. Los periódicos comunitarios han sido mucho más relevantes para sus millones de lectores que grandes cabeceras de referencia como *The New York Times* y *The Washington Post*, cuyas informaciones se amplifican en noticiarios de la televisión por cable que emite las 24 horas del día. La gente suele confiar en sus medios locales y tiene fe en que sus periodistas —vecinos suyos— sean fieles a la realidad. Los ciudadanos han confiado mucho en los medios locales para mantenerse al día de cuestiones de actualidad y problemas directamente relacionados con su vida cotidiana. Los contenidos informativos locales pesan en las opiniones de los residentes y no dejan de influir en las decisiones que toman los líderes de la comunidad. Lo



Un vendedor de periódicos de Nueva Delhi sostiene un diario en cuya contraportada se puede leer un anuncio de WhatsApp en el que se intenta advertir sobre la falsedad de una información acerca del rapto de niños en la India, que se hizo viral en las redes sociales y provocó linchamientos en todo el país en el verano de 2018





importante es que la población confía en que los periodistas locales proporcionen noticias que sirvan para poner coto a la desinformación que pueden diseminar fuentes foráneas, sobre todo porque desconfía enormemente de la información de ámbito nacional (Abernathy, 2016).

Los tuits de Trump han cobrado más relevancia para sus bases en una época en la que los informadores locales han ido desapareciendo del paisaje mediático. Para quienes viven en desiertos informativos, sus tuits pueden sustituir a las noticias. La influencia de sus mensajes en las redes sociales se acentúa allí donde no existen medios locales que puedan poner en cuestión sus datos, contextualizar sus mensajes y ofrecer interpretaciones alternativas. La escasez de medios informativos locales sólidos es especialmente acusada en las zonas rurales, de mayoría blanca, del país, donde se ha instalado la base política de Donald Trump (Lawless y Hayes, 2018; Center for Innovation & Sustainability in Local Media, 2017). Sin el contrapeso de informadores locales fiables, los ataques de Trump a los grandes medios tienen un gran eco y la perspectiva política de la población se ve muy influida por mensajes de redes sociales partidistas que se disfrazan de noticias en sus canales (Musgrave y Nussbaum, 2018).

La concentración de la propiedad de los medios en manos de grandes empresas ha minado aún más la información local fehaciente. En un número creciente de mercados, la desaparición de las empresas de información independientes ha propiciado su sustitución por conglomerados mediáticos. Sinclair Broadcast Group es el principal grupo televisivo dedicado a la información de Estados Unidos y ha comprado canales locales de todo el país, también en desiertos informativos. La empresa está estrechamente relacionada con la Administración de Trump y ha presionado a los periodistas para que den un sesgo más conservador a sus reportajes. Un estudio de la Universidad Emory ha puesto de manifiesto que los canales de noticias televisivos de Sinclair han dejado de cubrir las noticias locales para centrarse en las nacionales y que esa cobertura tiene una perspectiva ideológica claramente derechista (Martin y McCrain, 2018). Hubo un día en el que Sinclair obligó a todos los presentadores de sus noticiarios locales a pronunciar una misma alocución sobre los peligros de las «noticias falsas» y a proclamar su compromiso con la veracidad informativa. A muchos locutores les incomodó la alocución, que calificaron de «lectura forzada». En las grandes cabeceras se dio mucha cobertura a un vídeo en el que aparecían presentadores de todo el país repitiendo de memoria el texto y que se hizo viral en las redes sociales (Fortin y Bromwich, 2018).

El futuro

La revolución digital se ha desarrollado con más rapidez y ha tenido consecuencias políticas e informativas más amplias, profundas y transformadoras que ninguna otra transición anterior registrada en las tecnologías de la comunicación, incluyendo la aparición de la televisión. En la década pasada, la conversión de las redes sociales en herramienta política ha transformado de manera fundamental las relaciones entre los políticos, la prensa y la población. La irrupción de Donald Trump en el conjunto de los medios políticos ha precipitado la evolución del entorno mediático en direcciones imprevistas. Como ha señalado un experto: «Internet reaccionó y se adaptó a la introducción de la campaña de Trump como un ecosistema que acoge a una especie nueva y ajena. Su candidatura desató nuevas estrategias y promovió fuerzas de internet consolidadas» (Persily, 2017).

La ecología de los medios políticos continúa evolucionando. Los políticos no dejan de buscar alternativas a las redes sociales, que dominan la comunicación con el público. Para las elecciones a mitad de mandato de 2018, los candidatos están recurriendo al envío de mensajes de texto, una herramienta de campaña que está sustituyendo a formas de llegar a



los votantes como las llamadas telefónicas masivas o la petición del sufragio puerta a puerta. Nuevos programas informáticos como Hustle, Relay y RumbleUp han posibilitado el envío de miles de mensajes cada hora sin vulnerar las leyes federales que prohíben su envío masivo. Los mensajes se utilizan para registrar a los votantes, organizar actos electorales, recoger fondos y publicitarse. Los envían voluntarios que después responden a las preguntas de los destinatarios. La estrategia se dirige sobre todo a la captación de votantes de zonas rurales y a jóvenes, que tienen en los mensajes su forma preferida de comunicación digital (Ingram, 2018). De forma muy similar a la cuenta de Trump en Twitter, los mensajes dan la sensación de que los políticos están llegando personalmente a los votantes. La táctica también permite a los primeros distanciarse de grandes empresas mediáticas como Facebook y Google, y, por tanto, de la preocupación de que se puedan difundir datos privados sin el consentimiento del interesado.

El futuro de la comunicación política está envuelto en una gran incertidumbre. El análisis anterior ha puesto de relieve las preocupantes tendencias de su situación actual. La polarización política ha convertido en obsoletos la evaluación y el compromiso racionales. La galopante difusión de desinformación obstaculiza la toma de decisiones responsables. La posibilidad de que los líderes políticos exploten de forma negativa el poder de las redes sociales ya es patente.

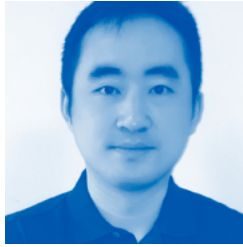
La revolución digital se ha desarrollado con más rapidez y ha tenido consecuencias políticas e informativas más amplias, profundas y transformadoras que ninguna otra transición anterior registrada en las tecnologías de la comunicación, incluyendo la aparición de la televisión

Al mismo tiempo, el péndulo no deja de oscilar y puede que se impongan rasgos positivos de los nuevos medios. Los medios digitales han incrementado en gran medida las posibilidades de que la información política llegue hasta los ciudadanos más desinteresados. La atención a las elecciones a mitad de mandato de 2018 es insólitamente alta y la capacidad de los ciudadanos para expresarse a través de las redes sociales ha contribuido a ese interés. La ciudadanía corriente puede poner sobre el tapete problemas y acontecimientos que quizá escapen al objetivo de los periodistas de los grandes medios. Los redes sociales han mantenido vivo el movimiento #MeToo, ya que las mujeres siguen aportando testimonios y formando comunidades virtuales. Es más, hay pruebas que demuestran un resurgimiento del periodismo de investigación, en parte alentado por el acceso a enormes fuentes digitales, entre ellas archivos públicos y análisis de macrodatos. Esas tendencias encienden una chispa de esperanza respecto al futuro de los medios políticos.

Bibliografía

- Abernathy, Penelope Muse (2016): *The Rise of a New Media Baron and the Emerging Threat of News Deserts*, Chapel Hill, The Center for Innovation and Sustainability in Local Media, School of Media and Journalism, Universidad de Carolina del Norte.
- Alhabash, Saleem y, Ma, Mengyan (2017): «A tale of four platforms: motivations and uses of Facebook, Twitter, Instagram, and Snapchat among college students?», en *Social Media and Society*, enero-marzo, pp. 1-13.
- Arkin, Daniel y Popken, Ben (2018): «How the internet's conspiracy theorists turned Parkland students into "crisis actors"», en *NBC News*, 21 de febrero. Disponible en <https://www.nbcnews.com/news/us-news/howinternet-s-conspiracy-theorists-turned-parkland-students-crisisactors-n849921>
- Armstrong, Martin (2018): «Trump's favorite Twitter insults», en *Statista*, 28 de junio. Disponible en <https://www.statista.com/chart/14474/trump-favoritetwitter-insults/>
- Bimber, Bruce (2014): «Digital media in the Obama campaigns of 2008 and 2012: adaptation to the personalized political communication environment», en *Journal of Information Technology & Politics*, vol. 11, n.º 2, pp. 130-150.
- Bucay, Yemile; Elliott, Vitoria; Kamin, Jennie y Park, Andrea (2017): «America's growing news deserts», en *Columbia Journalism Review*, primavera. Disponible en https://www.cjr.org/local_news/american-news-deserts-donuts-local.php
- Carr, Caleb T. y Hayes, Rebecca (2015): «Social media: defining, developing, and divining», en *Atlantic Journal of Communication*, vol. 23, n.º 1, pp. 46-65.
- Center for Innovation and Sustainability in Local Media (2017): *Thwarting the Emergence of News Deserts*, Chapel Hill, School of Media and Journalism, Universidad de Carolina de Norte, Disponible en <https://www.cislml.org/wp-content/uploads/2017/04/Symposium-Leave-Behind-0404finalweb.pdf>
- Clarke, Isabelle y Grieve, Jack (2017): «Dimensions of abusive language on Twitter», en *Proceedings of the First Workshop on Abusive Language Online*, Vancouver, Canadá, The Association of Computational Linguistics, pp. 1-10. Disponible en <http://www.aclweb.org/anthology/W17-3001>
- Davis, Richard y Owen, Diana (1989): *New Media in American Politics*, Nueva York, Oxford University Press.
- Edosomwan, Simeon; Kalangot Prakasan, Sitalaskshmi; Kouame, Doriane; Watson, Jonelle y Seymour, Tom (2011): «The history of social media and its impact on business», en *The Journal of Applied Management and Entrepreneurship*, vol. 16, n.º 3. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Simeon_Edosomwan/publication/303216233_The_history_of_social_media_and_its_impact_on_business/links/57fe90ef08ae56fae5f23f1d/The-history-of-social-media-and-its-impact-on-business.pdf
- Ellison, Nicole B. y Boyd, Danag (2013): «Sociality through social network sites», en William H. Dutton (ed.), *The Oxford Handbook of Internet Studies*. Oxford, Oxford University Press, pp. 151-172.
- Enli, Gunn (2017): «Twitter as arena for the authentic outsider: exploring the social media campaigns of Trump and Clinton in the 2016 US presidential election», en *European Journal of Communication*, vol. 32, n.º 1, pp. 50-61.
- Fortin, Jacey y Bromwich, Jonah Engel (2018): «Sinclair made dozens of local news anchors recite the same script», en *The New York Times*, 2 de abril. Disponible en <https://www.nytimes.com/2018/04/02/business/media/sinclair-news-anchors-script.html>
- Frenkel, Sheera y Wakabayashi, Daisuke (2018): «After Florida school shooting, Russian "bot" army pounced», en *The New York Times*, 2 de febrero. Disponible en <https://www.nytimes.com/2018/02/19/technology/russian-bots-school-shooting.html>
- Gottfried, Jeffrey y Shearer, Elisa (2017): «Americans' online news use is closing in on TV news use», en *Fact Tank*, Washington, D.C., Pew Research Center. Disponible en <http://www.pewresearch.org/fact-tank/2017/09/07/americans-online-news-use-vs-tv-news-use/>
- Gottfried, Jeffrey y Barthel, Michael (2018): «Almost seven-in-ten Americans have news fatigue, more among Republicans», Washington, D. C., Pew Research Center. Disponible en <http://www.pewresearch.org/fact-tank/2018/06/05/almost-seven-in-ten-americans-have-news-fatigue-more-among-republicans/>
- Graham, David A. (2018): «The gap between Trump's tweets and reality», en *The Atlantic*, 2 de abril. Disponible en <https://www.theatlantic.com/politics/archive/2018/04/the-worldaccording-to-trump/557033/>
- Grieve, Jack y Clarke, Isabelle (2017): «Stylistic variation in the @realDonaldTrump Twitter account and the stylistic typicality of the pled Tweet», Birmingham, Universidad de Birmingham. Disponible en <http://rpubs.com/jwgrieve/340342>
- Guo, Lei. (2015): «Exploring the link between community radio and the community: a study of audience participation in alternative media practices» en *Communication, Culture, and Critique*, vol. 10, n.º 1. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cccr.12141>
- Hautala, Laura (2018): «Facebook's fight against fake news remains a bit of a mystery», en *c/net*, 24 de julio. Disponible en <https://www.cnet.com/news/facebook-says-misinformation-is-a-problem-but-wont-say-how-big/>
- Heath, Alex (2016): «Obama: fake news on Facebook is creating a "dust cloud of nonsense"», en *Business Insider*, 7 de noviembre. Disponible en <https://www.businessinsider.com/obama-fake-news-facebook-creates-dust-cloud-of-nonsense-2016-11>
- Hindman, Matthew (2018): *The Internet Trap: How the Digital Economy Builds Monopolies and Undermines Democracy*, Princeton, Princeton University Press.
- Ingram, David (2018): «Pocket partisans: campaigns use text messages to add a personal touch», en *NBC News*, 3 de octubre. Disponible en <https://www.nbcnews.com/tech/tech-news/sofas-ipads-campaign-workers-use-text-messages-reach-midterm-voters-n915786>
- Joinson, Adam N. (2008): «"Looking at", "looking up" or "keeping up with" people? Motives and uses of Facebook», en *Proceedings of the 26th Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Florencia, 5-10 de abril, pp. 1.027-1.036.
- Jones, Alex S. (2011): *Losing the News: The Future of the News that Feeds Democracy*, Nueva York, Oxford University Press.
- Jost, John T.; Barberá, Pablo; Bonneau, Richard; Langer, Melanie; Metzger, Megan; Nagler, Jonathan; Sterling, Joanna y Tucker, Joshua A. (2018): «How social media facilitates political protest: information, motivation, and social networks», en *Political Psychology*, vol. 39, n.º 51. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pops.12478>
- Jung, Eun Hwa y Sundar, Shyam S. (2016): «Senior Citizens on Facebook: how do they interact and why?», en *Computers in Human Behavior*, vol. 61, pp. 27-35.
- Lawless, Jennifer y Hayes, Danny (2018): «As local news goes, so goes citizen engagement: media, knowledge, and participation in US House elections», en *Journal of Politics*, vol. 77, n.º 2, pp. 447-462.
- Liptak, Kevin; Kosinski, Michelle y Diamond, Jeremy (2018): «Trump to skip climate portion of G7 after Twitter spat with Macron and Trudeau», CNN, 8 de junio. Disponible en <https://edition.cnn.com/2018/06/07/politics/trump-g7-canada/index.html>
- Manjoo, Farhad (2017): «How Twitter is being gamed to feed misinformation», en *The New York Times*, 31 de mayo. Disponible en <https://www.nytimes.com/2017/05/31/technology/how-twitter-is-being-gamed-to-feed-misinformation.html>
- Martin, Gregory J. y McCrain, Josh (2018): «Local News and National Politics», Atlanta, Georgia, Emory University. Disponible

- en <http://joshuamccrain.com/localnews.pdf>
- Matsa, Katerina Eva (2018): «Fewer Americans Rely on TV news: what type they watch varies by who they are», Washington, D.C., Pew Research Center, 5 de enero. Disponible en <http://www.pewresearch.org/fact-tank/2018/01/05/fewer-americans-rely-on-tv-news-what-type-they-watch-varies-by-who-they-are/>
- Musgrave, Shawn y Nussbaum, Matthew (2018): «Trump thrives in areas that lack traditional news outlets», en *Politico*, 8 de marzo. Disponible en <https://www.politico.com/story/2018/04/08/news-subscriptions-decline-donald-trump-voters-505605>
- Owen, Diana (2017a): «The new media's role in politics», en Fernando Gutiérrez Junquera (ed.), *The Age of Perplexity: Rethinking the World We Know*, Londres, BBVA/Penguin Random House. [Ed. esp: *La era de la perplejidad. Repensar el mundo que conocíamos*. Madrid, OpenMind/BBVA].
- (2017b): «Tipping the balance of power in elections? voters' engagement in the digital campaign», en Terri Towner y Jody Baumgartner (eds.), *The Internet and the 2016 Presidential Campaign*, Nueva York, Lexington Books, pp. 151-177.
- (2018): «Trump supporters' use of social media and political engagement», Ponencia preparada para la reunión anual de la American Political Science Association, del 30 de agosto al 2 de septiembre.
- Persily, Nathaniel (2017): «Can democracy survive the internet?», en *Journal of Democracy*, vol. 28, n.º 2, pp. 63-76.
- Pew Research Center (2018): «Social media fact sheet: social media use over time», Washington, D.C., Pew Research Center, 5 de febrero. Disponible en <http://www.pewinternet.org/factsheet/social-media/>
- Preotiuc-Pietro, Daniel; Hopkins, Daniel J.; Liu, Ye y Unger, Lyle (2017): «Beyond binary labels: political ideology prediction of Twitter users», en *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Vancouver, Canadá, Association for Computational Linguistics, pp. 729-740. Disponible en <http://aclweb.org/anthology/P17/P17-1068.pdf>
- Rohlinger, Deana A. y Leslie Bunnage (2017): «Did the Tea Party movement fuel the Trump-train? The role of social media in activist persistence and political change in the 21st century», en *Social Media + Society*, vol. 3, n.º 2. Disponible en <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/2056305117706786>
- Rosenberg, Eli (2018): «Facebook wants to cut down on misinformation. So why isn't it doing anything about infowars?», en *The Washington Post*, 14 de julio. Disponible en https://www.washingtonpost.com/news/the-intersect/wp/2018/07/14/facebook-wants-to-cut-down-on-misinformation-sowhy-isnt-it-doing-anything-about-infowars/?utm_term=.84f97800f65b
- Sayej, Nadja (2017): «Alyssa Milano on the #MeToo movement: "We're not going to stand for it any more"», en *The Guardian*, 1 de diciembre. Disponible en <https://www.theguardian.com/culture/2017/dec/01/alyssa-milano-mee-too-sexual-harassment-abuse>
- Shearer, Elisa y Matsa, Katerina Eva (2018): *News Across Social Media Platforms 2018*, Washington, D. C., Pew Research Center, 10 de septiembre. Disponible en <http://www.journalism.org/2018/09/10/news-use-across-social-media-platforms-2018/>
- Silverman, Craig; Hall, Ellie; Strapagiel, Lauren; Singer-Vine, Jeremy y Shaban, Hamza (2016): «Hyperpartisan Facebook pages are publishing false and misleading information at an alarming rate», en *BuzzFeed News*, 20 de octubre. Disponible en <https://www.buzzfeednews.com/article/craigsilverman/partisan-fb-pages-analysis>
- Smith, Aaron y Anderson, Monica (2018): *Social Media Use in 2018*, Washington, D.C., Pew Research Center. Disponible en <http://www.pewinternet.org/2018/03/01/social-media-use-in-2018/>
- Statista (2018): «Number of monthly active twitter users worldwide from 1st quarter 2018 (in millions)». Disponible en <https://www.statista.com/statistics/282087/number-of-monthly-active-twitter-users/>
- Stromer-Galley, J. (2016): *Presidential Campaigning in the Internet Age*, Nueva York, Oxford University Press.
- Tatum, Sophie (2017): «Trump on his tweets: "you have to keep people interested"», en *CNN Politics*, 21 de octubre. Disponible en <https://edition.cnn.com/2017/10/20/politics/donald-trump-fox-business-interview-twitter/index.html>
- Tsukayama, Hayley (2018): «Why Twitter is now profitable for the first time», en *The Washington Post*, 8 de febrero. Disponible en https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2018/02/08/why-twitter-is-now-profitable-for-the-first-time-ever/?noredirect=on&utm_term=.5ab85e111890
- Tsur, Oren; Ognyanova, Katherine y Lazer, David (2016): «The data behind Trump's Twitter takeover», en *Politico Magazine*, 29 de abril. Disponible en <https://www.politico.com/magazine/story/2016/04/donald-trump-2016-twitter-takeover-213861>
- Usher, Nikki; Holcomb, Jesse y Littman, Justi (2018): «Twitter makes it worse: political journalists, gendered echo chambers, and the amplification of gender bias», en *International Journal of Press/Politics*, pp. 1-21. Disponible en <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1940161218781254>
- Van Dijck, José (2013): *The Culture of Connectivity: A Critical History of Social Media*, Nueva York, Oxford University Press.
- Vosoughi, Soroush; Roy, Deb y Aral, Sinan (2018): «The spread of true and false news online», en *Science*, vol. 359, n.º 6380, pp. 1146-1151.
- Wallsten, Kevin (2010): «"Yes We Can": how online viewership, blog discussion, campaign statements, and mainstream media coverage produced a viral video phenomenon», en *Journal of Information Technology and Politics*, vol. 2, n.º 3, pp. 163-181.
- Wallsten, Scott (2018): «Do likes of Trump's tweets predict his popularity?», en *Technology Policy Institute Blog*, 17 de abril. Disponible en <https://techpolicyinstitute.org/2018/04/17/do-likes-of-trumps-tweets-predict-his-popularity/>
- Woolley, Samuel C. y Guilbeault, Douglas R. (2017): «Computational Propaganda in the United States of America: Manufacturing Consensus Online», Working Paper n.º 2017.5, Oxford Internet Institute.



Yang Xu
Hong Kong Polytechnic
University

Yang Xu es profesor asociado del departamento de Land Surveying and Geo-Informatics (LSGI) de la Universidad Politécnica de Hong Kong. Sus investigaciones se centran en la intersección de las ciencias de la información geográfica, los transportes y la informática y utilizan el poder de los macrodatos para dar respuesta a importantes preguntas sobre comportamiento de viaje de los individuos, patrones colectivos de movilidad humana y aspectos varios de las dinámicas urbanas y sociales. En los últimos dos años ha coescrito más de veinte publicaciones en revistas y libros. También ha sido investigador principal de varios proyectos financiados por el Hong Kong Research Grant Council y la National Natural Science Foundation de China. Xu se graduó en la Universidad de Wuhan y se doctoró en la Universidad de Tennessee, Knoxville. Antes de unirse al LSGI, trabajó como investigador asociado en el Senseable City Lab del MIT y en la Singapore-MIT Alliance for Research and Technology (SMART).



Carlo Ratti
MIT-Massachusetts Institute
of Technology

Carlo Ratti, arquitecto e ingeniero de formación, es profesor en MIT, donde dirige el Senseable City Laboratory, y es socio fundador del estudio internacional de diseño e innovación Carlo Ratti Associati. Autoridad reconocida en el debate sobre el impacto de las nuevas tecnologías en la vida urbana, sus trabajos se han expuesto por todo el mundo, incluyendo la Bienal de Venecia, el MoMA de Nueva York, el Science Museum de Londres y el Museu del Disseny de Barcelona. Dos de sus proyectos —el Digital Water Pavilion y la Copenhagen Wheel— fueron elegidos «mejores inventos del año» por la revista *Time*. La revista *Wired* lo ha incluido en su «Smart List: 50 personas que cambiarán el mundo». En la actualidad copreside el Consejo para el Futuro del Mundo dedicado a Ciudades y Urbanismo en el Foro Económico Mundial y sirve en la Comisión Europea como asesor especial en Innovación Urbana.

Libro recomendado: Ratti, Carlo y Claudel, Matthew (2016): *The City of Tomorrow* [La ciudad del mañana], New Haven, Yale University Press.

A partir del reciente aumento de la segregación socioeconómica en ciudades de todo el mundo, los estudiosos de tecnologías urbanas Carlo Ratti y Yang Xu proponen nuevas mediciones con las que estudiar y contrarrestar dicho fenómeno. Mientras que la investigación en el pasado se ha centrado en la segregación residencial, este capítulo argumenta que la segregación ha de medirse de forma más dinámica: en todo el entorno urbano y no solo en la residencia; en el tiempo y no solo en el espacio, y examinando su presencia en el ciberespacio y no solo en el mundo físico. Estos métodos a su vez requieren datos también más dinámicos: Ratti y Xu defienden la rentabilidad y las posibilidades que ofrecen los datos de los teléfonos móviles. Concluyen con una propuesta de determinadas acciones que podrían emprender las ciudades para fomentar una mayor interrelación entre los diferentes grupos de población.



Durante el último medio siglo hemos asistido a un acelerado proceso de urbanización global, que ha producido cambios profundos en la distribución espacial de la población del mundo y sus actividades. En 2007, la población urbana del planeta superó, por primera vez en la historia, a la población rural (Naciones Unidas, 2014). Según las proyecciones, al llegar 2050, más de dos tercios de la población mundial vivirá en zonas urbanas, buena parte de ellas en las llamadas «megaciudades». Esas aglomeraciones reportarán enormes beneficios sociales y económicos a sus habitantes. Sin embargo, la urbanización acelerada también podría ocasionar ciertos problemas o agravarlos. La segregación social, un antiguo desafío para las ciudades, sigue constituyendo un quebradero de cabeza para políticos y reguladores urbanos.

La definición clásica de segregación urbana alude a la separación física o a la distribución desigual de los grupos sociales en las ciudades. En este contexto, el peso de dichos grupos se suele calibrar teniendo en cuenta sus rasgos sociales, económicos o demográficos. Las distintas maneras de diferenciar a los grupos sociales producen formas diversas de abordar la segregación urbana, que afectan a los componentes raciales, étnicos, de renta y a otros rasgos de la composición social en las ciudades.

¿Por qué se está convirtiendo la segregación en un problema al que urge enfrentarse? Una razón crucial es que suele ir unida a la desigualdad, que indica el acceso dispar de los grupos sociales a ciertos recursos o prestaciones. La disposición espacial de los grupos sociales en las ciudades, que solo es una manifestación visible de la segregación urbana, puede generar muchas realidades determinantes y perniciosas para el bienestar social. Por ejemplo, en Estados Unidos la segregación racial ha limitado el acceso al empleo, la educación y los servicios públicos de quienes viven en barrios con un elevado nivel de pobreza (Williams y Collins, 2001). Estos problemas no son solo estadounidenses. Durante la pasada década se ha registrado un incremento de la segregación socioeconómica en muchas ciudades europeas (Musterd *et al.*, 2017), lo que ha dado lugar a problemas relacionados con el incremento de la pobreza, la delincuencia e incluso el terrorismo. En Asia, se cree que en los próximos veinte o treinta años se formarán muchas megaciudades y aglomeraciones urbanas. Parte de los barrios de renta baja o de las áreas que antes se situaban en la periferia urbana se convertirán en «pueblos urbanos» que separarán a los grupos desfavorecidos de los demás. Esa situación podría agravarse si los procesos de gentrificación expulsan a esas personas de su hábitat. El aumento del precio de la vivienda podría obligarlas a alejarse aún más de los centros urbanos, con lo que sus desplazamientos cotidianos serían más costosos y mermaría su acceso a los centros sanitarios y a otros servicios urbanos.

En 2007 la población urbana del planeta superó, por primera vez en la historia, a la población rural. Según las proyecciones, en 2050, más de dos tercios de la población mundial vivirá en zonas urbanas, buena parte de ellas en las llamadas «megaciudades»

Ser consciente del problema no garantiza por sí una solución. Para afrontar la segregación urbana, el paso primero y más importante es comprender en qué medida aparecen separados los diferentes grupos sociales en las ciudades. Durante las últimas décadas, en las urbes se han hecho esfuerzos considerables para investigar la *segregación residencial* (Massey y Denton, 1988). Dos son las razones principales para centrarse en este asunto. En primer lugar, la



ubicación residencial y su entorno —en su calidad de territorio de actividad primordial individual— ejerce una profunda influencia en las interacciones sociales cotidianas. Un elevado nivel de segregación residencial indica la existencia de estratificación social y potencia muchos problemas sociales. La segunda razón tiene que ver con el carácter limitado de las técnicas habituales de recogida de datos. En muchos países, los censos de población se realizan cada cinco o diez años. Esos datos captan, a modo de instantáneas, tanto las huellas que deja la población como información demográfica. Sirven para calibrar la segregación residencial, pero no ofrecen panorámicas actualizadas sobre la configuración socioeconómica de las ciudades.

¿Sería útil medir la magnitud de la segregación urbana sin limitarse a datos residenciales? Es evidente que sí. La segregación social no solo se produce donde la gente vive, también donde trabaja, estudia y se divierte (Hellerstein y Neumark, 2008). Los diferentes lugares pueden desempeñar funciones distintas y obstaculizar o promover la integración social de una ciudad. Para comprender mejor la dinámica social es preciso observar las interacciones humanas en los centros de trabajo, las escuelas, los centros comerciales y toda clase de espacios públicos. Sin embargo, no podremos obtener una panorámica exhaustiva de la segregación urbana si solo nos centramos en la dimensión espacial. ¿Cómo cambia la composición social de una ciudad a lo largo del tiempo? La segregación residencial nos permite saber cómo pasa la gente la noche, pero ¿qué ocurre durante el resto del día? Esa perspectiva temporal es deseable por el mero hecho de que las ciudades son entes bastante dinámicos. Cuando la gente se levanta por la mañana y empieza a moverse, los cambios en la movilidad urbana reformulan las configuraciones socioeconómicas de la ciudad. Todavía no sabemos bien cómo influye la movilidad humana en la segregación y qué políticas exige.

La segregación social no solo afecta al espacio físico. En las dos últimas décadas, internet y las telecomunicaciones han penetrado en casi todos los aspectos de la vida humana, trasladándonos a un entorno de ubicua conectividad. Los avances tecnológicos han creado un mundo digital en el que están surgiendo nuevas formas de comunicación social. ¿Cómo influirán estos cambios en las estructuras sociales urbanas? ¿Hay estratificación en el ciber-mundo? Y, si la hay, ¿es solo un reflejo de las interacciones en el mundo social? Si respondiéramos a estas preguntas podríamos ofrecer una visión más holística de la composición social de las ciudades. Lamentablemente, los datos que antes utilizábamos, entre ellos el censo y las encuestas sobre desplazamientos, no pueden captar las interacciones sociales humanas en el ciberespacio. Hay que redefinir cómo abordar las segregaciones urbanas en el mundo actual, y no solo se trata de datos nuevos, sino de nuevas medidas y de nuevas estrategias para afrontar este permanente problema urbano.

En el presente artículo, primero pasaremos revista a las principales investigaciones de la disciplina. A continuación, daremos ideas para desarrollar nuevas formas de calibrar la segregación urbana. Por último, analizaremos cómo esas nuevas medidas pueden inspirar principios que sirvan para proponer diseños novedosos que integren mejor a las clases socioeconómicas en las ciudades.

Cómo se mide la segregación residencial: algunas iniciativas actuales

Hace tiempo que a la sociología, la economía, la geografía, la planificación urbana y otras disciplinas les interesa investigar la separación o la concentración espacial de diferentes grupos de población. Durante décadas, los estudios se han centrado sobre todo en analizar la segregación en el lugar de residencia (Massey y Denton, 1987; Reardon y O’Sullivan, 2004) y se han desarrollado una serie de métodos para cuantificar la desigual distribución de los grupos



Un hombre pone a secar unos pantalones en el tejado de chapa de una lavandería al aire libre conocida como Dhobi Ghat, cercana a una zona residencial de rascacielos de lujo en Bombay, India. Se estima que en 2100, la población de Bombay superará los 65 millones de habitantes





sociales en el territorio. El índice de disimilitud (ID) es uno de los métodos más utilizados en los estudios sobre segregación (Duncan y Duncan, 1955). Se considera que ese índice, que con frecuencia se ha utilizado en casos caracterizados por la presencia de dos grupos (por ejemplo, en la segregación entre negros y blancos), expresa la proporción de miembros de una minoría que tendría que cambiar de área de residencia para que se alcanzase una integración social perfecta (es decir, una distribución uniforme en todas las zonas), ajustado en función del porcentaje de miembros de esa minoría que tendría que trasladarse cuando se dan condiciones de segregación máxima (es decir, cuando los dos grupos no comparten ninguna zona). Desde que se desarrolló, el ID se ha utilizado en muchos estudios porque representa la segregación de manera sencilla. A pesar de lo mucho que se ha utilizado este indicador, la forma de definir la segregación residencial varía de un investigador a otro, y se han desarrollado muchos otros indicadores para cuantificar la segregación desde diversas perspectivas. Esto ha desatado amplios debates sobre la superposición entre unos índices de segregación y otros y sobre cuáles deberían ser los más utilizados (Cortese *et al.*, 1976; Taeuber y Taeuber, 1976). Después de aplicar el análisis factorial a veinte índices de segregación, Massey y Denton (1988) llegaron a la conclusión de que dichos índices explican principalmente cinco dimensiones de la segregación residencial: la *uniformidad*, la *exposición*, la *concentración*, la *centralización* y el *agrupamiento*. La uniformidad mide el desequilibrio entre dos o más grupos demográficos en diferentes barrios, en tanto que la exposición calibra la interacción potencial entre grupos sociales. Estas dos dimensiones han suscitado más atención que las otras tres en los estudios empíricos.

Desde que Massey y Denton reflexionaran sobre estas cinco dimensiones no han dejado de surgir iniciativas destinadas a analizar la segregación residencial, pero sobre todo desde la perspectiva de la raza o la etnicidad (Johnston *et al.*, 2005; Musterd y Van Kempen, 2009). En estos estudios, los grupos sociales se han presentado como variables binarias o categóricas (por ejemplo, blancos/negros). En consecuencia, muchos índices de segregación, como el de disimilitud (Duncan y Duncan, 1955), el de aislamiento (White, 1986) y el de entropía de Theil (1972), se pueden aplicar directamente a la medición de las pautas de segregación en una población o región. A pesar de lo frecuente de su uso, estos índices no carecen de limitaciones. En primer lugar, muchos de los existentes (por ejemplo, los de disimilitud y aislamiento) solo presentan la segregación general en una región o población determinadas, con lo que no establecen diferencias entre individuos y lugares. También se ha criticado que los métodos tradicionales suelen centrarse en la medición de grupos que pueden definirse fácilmente en función de variables categóricas (Reardon, 2009). Esto los hace inaplicables cuando hay que presentar esos grupos sociales en categorías ordenadas o en forma de variable continua. Por ejemplo, gran parte de los métodos actuales no pueden abordar la segregación por renta, que constituye un importante elemento segregador en muchas ciudades contemporáneas.

Más allá de la segregación residencial: hacia una perspectiva dinámica

A lo largo de los años los investigadores han ido aprendiendo mucho sobre la segregación residencial. Con ayuda de datos censales longitudinales, esa segregación ha quedado bien documentada en muchas ciudades y en su evolución. Se ha descubierto que, en 27 de las 30 principales áreas metropolitanas de Estados Unidos, la segregación residencial en función de la renta se ha incrementado durante las tres últimas décadas (Fry y Taylor, 2012). Además de separar a los ricos de los pobres, esas ciudades también están fomentando e incrementando el aislamiento de los grupos raciales (Fry y Taylor, 2012). Entre 2001 y 2011 también se ha



producido un incremento de las segregaciones socioeconómicas en las capitales europeas (Musterd *et al.*, 2017). Según la conclusión de los autores, ese incremento está ligado a factores estructurales tales como las desigualdades sociales, la globalización y la reconstrucción económica, los sistemas de bienestar y la situación de la vivienda.

Mucho se ha investigado sobre la segregación residencial, pero ¿qué ocurre en otros contextos? ¿Cómo se reúne la gente en las ciudades cuando participa en diferentes tipos de actividades? Entre los trabajos dedicados a estas cuestiones figuran los de Ellis (*et al.*, 2004), Hellerstein y Neumark (2008), y Åslund y Nordström Skans (2010), que investigaron la segregación racial o étnica en el lugar laboral. Esos estudios ofrecen dos mensajes principales. En primer lugar, además de una separación espacial de los grupos sociales en los lugares de residencia, algunas ciudades estadounidenses y europeas también presentan un considerable nivel de segregación laboral (Hellerstein y Neumark, 2008; Åslund y Nordström Skans, 2010), lo cual indica la presencia de otros factores que podrían influir en la composición social de las ciudades (por ejemplo, el mercado de trabajo, la política de inmigración y la educación). Por otra parte, se señala que los lugares de trabajo podrían reducir la segregación incorporando a personas de diversos orígenes sociales (Ellis, 2004). Esto indica lo importante que es abordar la segregación social desde una perspectiva dinámica.

En 27 de las 30 principales áreas metropolitanas de Estados Unidos, la segregación residencial en función de la renta se ha incrementado durante las tres últimas décadas. Además de separar a los ricos de los pobres, esas ciudades están fomentando e incrementando el aislamiento de los grupos raciales

Al reconocer las aportaciones de estos investigadores, merece la pena señalar que sus conclusiones todavía se basan en instantáneas tomadas en ciertos lugares (por ejemplo, los de trabajo). En gran medida, faltan aún por explotar las pautas diurnas de segregación social urbana. Como los datos censales solo muestran una imagen estática de la distribución de la población, no sirven para calibrar la segregación más allá del lugar de residencia y de trabajo. Las encuestas sobre desplazamiento pueden captar movimientos e información demográfica de una misma población. Esos datos podrían enriquecer los aspectos temporales de la segregación urbana. En un estudio reciente han utilizado datos demoscópicos sobre desplazamientos para cuantificar la segregación por horas, teniendo en cuenta la formación y los indicadores socioprofesionales de los encuestados. Los autores han descubierto que la «segregación en la región de París disminuye durante el día y que el grupo más segregado durante la noche (el de clase alta) sigue siendo el más segregado durante el día» (Le Roux *et al.*, 2017, p. 134). Esta nueva perspectiva sobre la «segregación de 24 horas» pone de manifiesto las repercusiones dinámicas de los espacios urbanos en la composición social, que también podrían inspirar nuevas prácticas de diseño urbano.

La segregación urbana en la época de las TIC y los macrodatos: hacia una visión híbrida

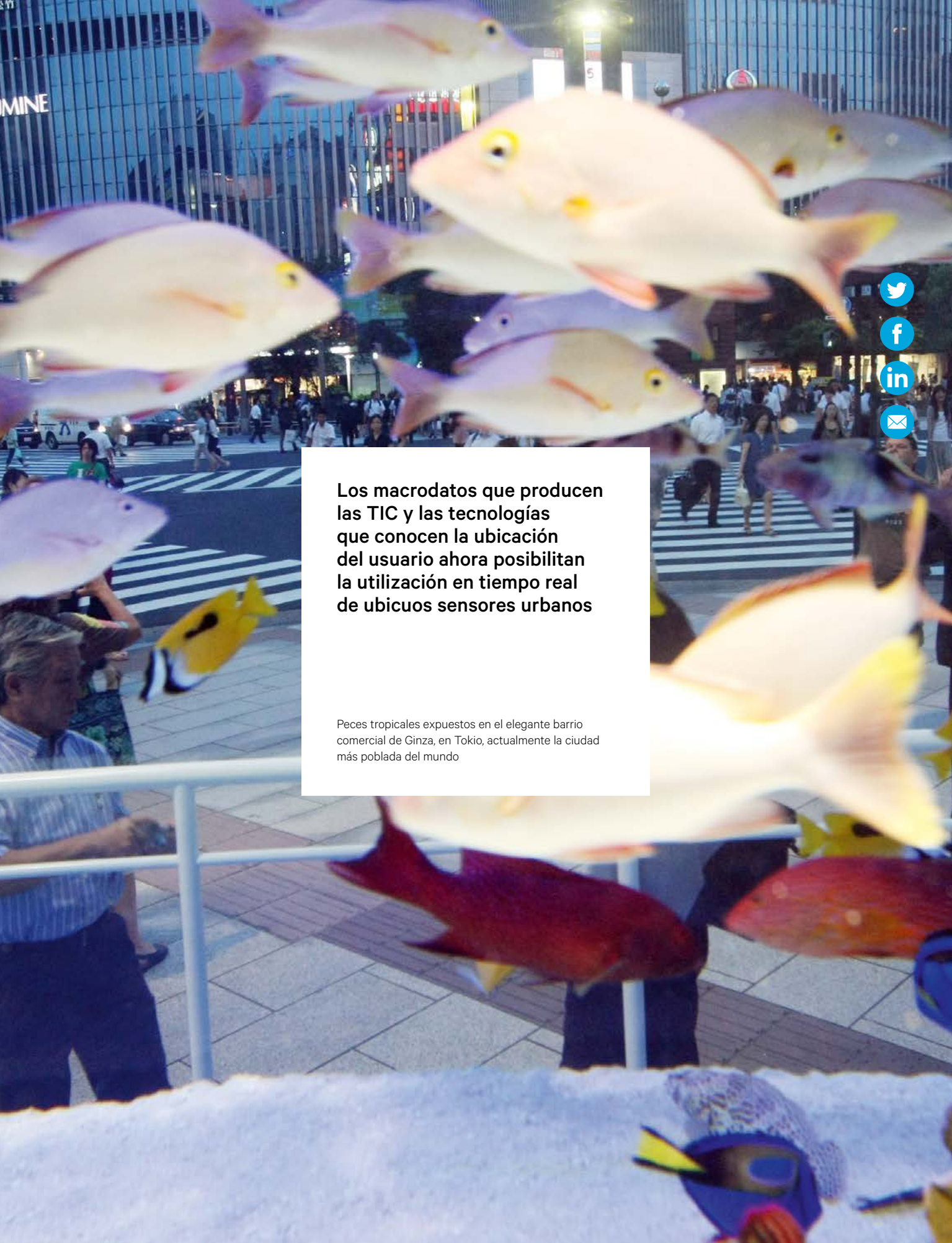
El 3 de abril de 1973, Martin Cooper, de Motorola, utilizó un dispositivo portátil para realizar la primera llamada por teléfono móvil de la historia. Desde entonces, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se han desarrollado con rapidez, reuniendo las redes



telefónicas e informáticas en un mismo sistema interconectado. Los canales de información social se han multiplicado, lo que beneficia al conjunto de la sociedad contemporánea. En el mundo actual, la comunicación cara a cara ya no es la única forma de mantener relaciones interpersonales. Los teléfonos móviles, el correo electrónico y diversas redes sociales se han convertido en los nuevos niños mimados de las interacciones humanas. Esos avances tecnológicos tienen repercusiones profundas, pero aún poco claras, para nuestras estructuras sociales. Por una parte, hay quien cree que las interacciones sociales ya no están limitadas por el lugar donde uno vive, trabaja o se divierte. Dicho de otro modo, ya no se considera que la distancia geográfica o la proximidad vayan a influir en las relaciones interpersonales. Por otra, hay constancia de que el mundo físico puede determinar las estructuras de las redes sociales virtuales. Buen ejemplo de ello es el efecto «decaimiento de la distancia» que se ha observado en muchas redes sociales virtuales, y en virtud del cual la probabilidad de establecer una relación de amistad es inversamente proporcional a la distancia geográfica (Krings *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2017). Esto significa que las interacciones humanas de los mundos físico y virtual están relacionadas. En consecuencia, la unificación de esos dos espacios ofrecería una perspectiva más global de la composición social de las ciudades.

En los últimos dos años se han realizado nuevos estudios sobre segregación urbana. Por ejemplo, Silm y Ahas (2014) llevaron a cabo un análisis temporal de la segregación étnica en Tallin, Estonia, basado en los movimientos humanos que registran los teléfonos móviles. El estudio demuestra que se pueden recoger tanto pautas diurnas de segregación urbana como su evolución a largo plazo de forma cómoda y asequible. Ese estudio se centraba en los datos de los teléfonos móviles, que suelen recoger las empresas que operan esas redes para facturar sus servicios. Esos datos, al poder recopilar movimientos de grandes poblaciones, han proporcionado nuevas oportunidades para la investigación de las dinámicas urbanas. Los datos de los teléfonos móviles, además de revelar aspectos sobre la movilidad humana, también pueden ofrecer información sobre las estructuras de las redes sociales. En un estudio más reciente (Leo *et al.*, 2016) analizaron los desequilibrios socioeconómicos que presentan las interacciones humanas, y lo hicieron mediante un conjunto de datos doble, que recoge información sobre comunicaciones realizadas con teléfono móvil y transacciones bancarias de usuarios de un país latinoamericano. Los autores llegaron a la conclusión de que la gente suele estar mejor conectada con personas de su misma clase socioeconómica. Estos estudios demuestran el potencial que tienen los macrodatos para mostrar la segregación urbana, tanto física como social.

En los últimos dos años, el uso de internet y de las tecnologías móviles ha proliferado en todo el mundo. En 2016, las redes basadas en el estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos LTE (Long Term Evolution) llegaban a casi 4.000 millones de personas del planeta, con lo que cubrían al 53% de la población mundial (Sanou, 2016). En muchos países desarrollados y en desarrollo, el índice de penetración del teléfono móvil ha superado el 100%. Se cree que esas cifras son todavía mayores en las zonas urbanas. Estamos entrando en una época en la que la mayoría de las personas utilizan teléfonos móviles para conectarse con el mundo exterior. Los macrodatos que producen las TIC y las tecnologías que conocen la ubicación del usuario ahora posibilitan la utilización en tiempo real de ubicuos sensores urbanos. Por ejemplo, los datos de los teléfonos móviles pueden utilizarse para analizar las dinámicas de toda una población urbana. Esos datos, unidos a información sociodemográfica, pueden confeccionar una panorámica actualizada de la composición social de las ciudades. Lo más importante es que los datos de los teléfonos móviles pueden captar abiertamente las comunicaciones humanas a nivel individual. A su vez, esa información puede



Los macrodatos que producen las TIC y las tecnologías que conocen la ubicación del usuario ahora posibilitan la utilización en tiempo real de ubicuos sensores urbanos

Peces tropicales expuestos en el elegante barrio comercial de Ginza, en Tokio, actualmente la ciudad más poblada del mundo



La segregación social no solo se produce donde la gente vive, también donde trabaja, estudia y se divierte

Vecinos navegan por los canales del barrio de Makoko, en Lagos. Con más de 13 millones de habitantes, la capital de Nigeria es la segunda ciudad más poblada de África después de El Cairo

ofrecer datos fehacientes sobre el grado de «homofilia» en las redes sociales, una dimensión primordial de la segregación urbana.

Hay que señalar que las ciudades están prestando atención al valor social de estos datos. Hace poco, Türk Telekom ha puesto en marcha un proyecto de recogida de macrodatos llamado D4R (<http://d4r.turktelekom.com.tr>). Esta iniciativa proporcionará a ciertos grupos de investigación acceso a un banco de datos móviles anonimizados con el fin de proponer soluciones innovadoras para mejorar las condiciones de vida de los refugiados sirios en Turquía. El conjunto de datos, que recoge lo que ven refugiados y no refugiados al utilizar sus móviles, permite a los investigadores analizar sus pautas de movimiento e interacción. Esos datos permiten analizar en qué medida se integran los refugiados en el resto de la población de un país, algo que acaba influyendo en su educación, empleo, seguridad y condiciones sanitarias. Aunque haya que alegrarse de la aparición de estos voluminosos conjuntos de datos, merece la pena preguntarse cómo, mediante el recurso a profusos bancos de datos urbanos, podemos generar nuevas mediciones que pongan de manifiesto la presencia o ausencia de segregación urbana y cómo esas perspectivas pueden promover nuevas prácticas en las ciudades.



Perspectivas de encontrar nuevas mediciones para la segregación urbana

Al pasar revista a los estudios actuales sobre segregación tenemos la sensación de que ha llegado la hora de pensar en nuevas mediciones que ofrezcan una perspectiva dinámica y multidimensional de ese fenómeno urbano. Pero ¿qué rasgos deberían tener esas mediciones? ¿Qué cosas hay que medir? Comenzamos esta reflexión mencionando algunas de las lagunas que presentan las investigaciones de la disciplina. En primer lugar, los estudios anteriores se han centrado mucho en medir la segregación residencial. Los datos censales que suelen utilizar proporcionan una perspectiva estática de la huella demográfica. Cuesta caro recogerlos y tardan mucho en actualizarse (por ejemplo, cinco o diez años). Esto dificulta el acceso a perspectivas renovadas relativas a la composición social de las ciudades. Aunque las encuestas sobre desplazamientos han atenuado este problema al proporcionar información minuciosa de la actividad humana, la recogida de esos datos sigue siendo cara y laboriosa. Necesitamos métodos asequibles con los que profundizar en los aspectos espaciales y temporales de la segregación urbana. En segundo lugar, las medidas actuales suelen estar concebidas para calibrar la segregación espacial. Dado que ciertas interacciones se van volviendo «virtuales», necesitamos nuevas formas de cuantificar tanto la segregación en el ciberespacio social como su relación con su homóloga en el mundo físico. En tercer lugar, es preciso comprender mejor cómo se integran en las urbes cada uno de los ciudadanos. Aunque en la actualidad se pueden recoger los movimientos y las comunicaciones individuales a través de tecnologías basadas en sensores, esos datos no se han utilizado para cuantificar la segregación a nivel individual. En consecuencia, creemos que una buena medición de la segregación urbana debería poder cumplir todos o por lo menos algunos de los siguientes requisitos:

- Medir la segregación urbana tanto en el espacio virtual como en el físico.
- Representar la variación temporal de la segregación urbana.
- Diferenciar las pautas de segregación en distintos entornos urbanos.
- Medir los diferentes tipos de segregación (como la racial, la étnica y la de renta).
- Ofrecer medidas de segregación a nivel individual.
- Permitir comparaciones intraurbanas e interurbanas.

Si estuviera dotada de esas capacidades, esa medición podría utilizarse para responder a preguntas complejas sobre la segregación urbana como las siguientes:

- ¿Qué lugares de una ciudad y en qué momento suelen estar ocupados por clases socioeconómicas similares? ¿Qué lugares los utiliza una amplia gama de grupos sociales?
- ¿Qué tipos de lugares contribuyen más a la integración social de una ciudad?
- ¿En qué medida está expuesto un individuo a otros similares a él en el espacio físico o virtual? ¿Existe una correlación entre estos dos espacios? (es decir, ¿está la gente más aislada en el físico o más segregada en el virtual?).
- ¿Qué ciudades están sufriendo grados de segregación más acusados?
- ¿Qué relación hay entre la segregación urbana y los rasgos de cada ciudad (por ejemplo, con su desarrollo económico, composición demográfica, pautas migratorias y forma urbana)?

Esta es nuestra perspectiva sobre nuevas mediciones de la segregación urbana. Para sustentarlas hay datos urbanos procedentes de varias fuentes que ofrecen nuevas oportunidades de emparejar desplazamientos, interacciones sociales y rasgos demográficos de grandes poblaciones. Se pueden conjugar diversos tipos de datos —cada uno con sus ventajas e inconvenientes— de forma orgánica para facilitar los estudios de segregación urbana. Los datos de teléfonos móviles y redes sociales, por ejemplo, pueden recoger a la vez desplazamientos e interacciones humanas. Esos datos podrían servir de base para el análisis de redes de movilidad y sociales de una determinada población. Sin embargo, el debido respeto a la privacidad hace que esos datos suelen quedarse cortos al recoger rasgos sociodemográficos individuales. Esa información, que es importante para los estudios sobre segregación, se puede deducir de otros enfoques innovadores. Se ha descubierto que los indicadores conductuales extraídos de la utilización del teléfono móvil pueden pronosticar con exactitud la situación socioeconómica del individuo (Blumenstock *et al.*, 2015). Otros conjuntos de datos urbanos, como el censo y los precios inmobiliarios, también contienen información valiosa sobre los residentes de las ciudades. Dado que ahora se puede conocer la ubicación de las actividades humanas frecuentes (por ejemplo, el hogar) a través de datos de actividad (usando medios como el teléfono móvil), también es posible relacionar esa información con la sección censal de las viviendas o con los precios inmobiliarios de la zona para determinar cuál es el perfil socioeconómico de cada individuo. La utilización de esas técnicas de pronóstico y fusión de datos nos permite reunir información valiosa para los análisis de segregación.

Se ha descubierto que los indicadores conductuales extraídos de la utilización del teléfono móvil pueden pronosticar con exactitud la situación socioeconómica del individuo. Otros conjuntos de datos urbanos, como el censo y los precios inmobiliarios, también contienen información valiosa sobre los residentes de las ciudades

Una vez dispongamos de esa información, el siguiente paso será desarrollar indicadores de segregación. Pero ¿cómo formular medidas cuantitativas razonables? Se pueden utilizar las pautas de movimiento humano emanadas del paso anterior (franja azul claro de la figura 1) para cuantificar la coincidencia de los individuos en el espacio físico. La medida calibra la probabilidad de que dos determinados individuos suelen presentarse en el mismo lugar en



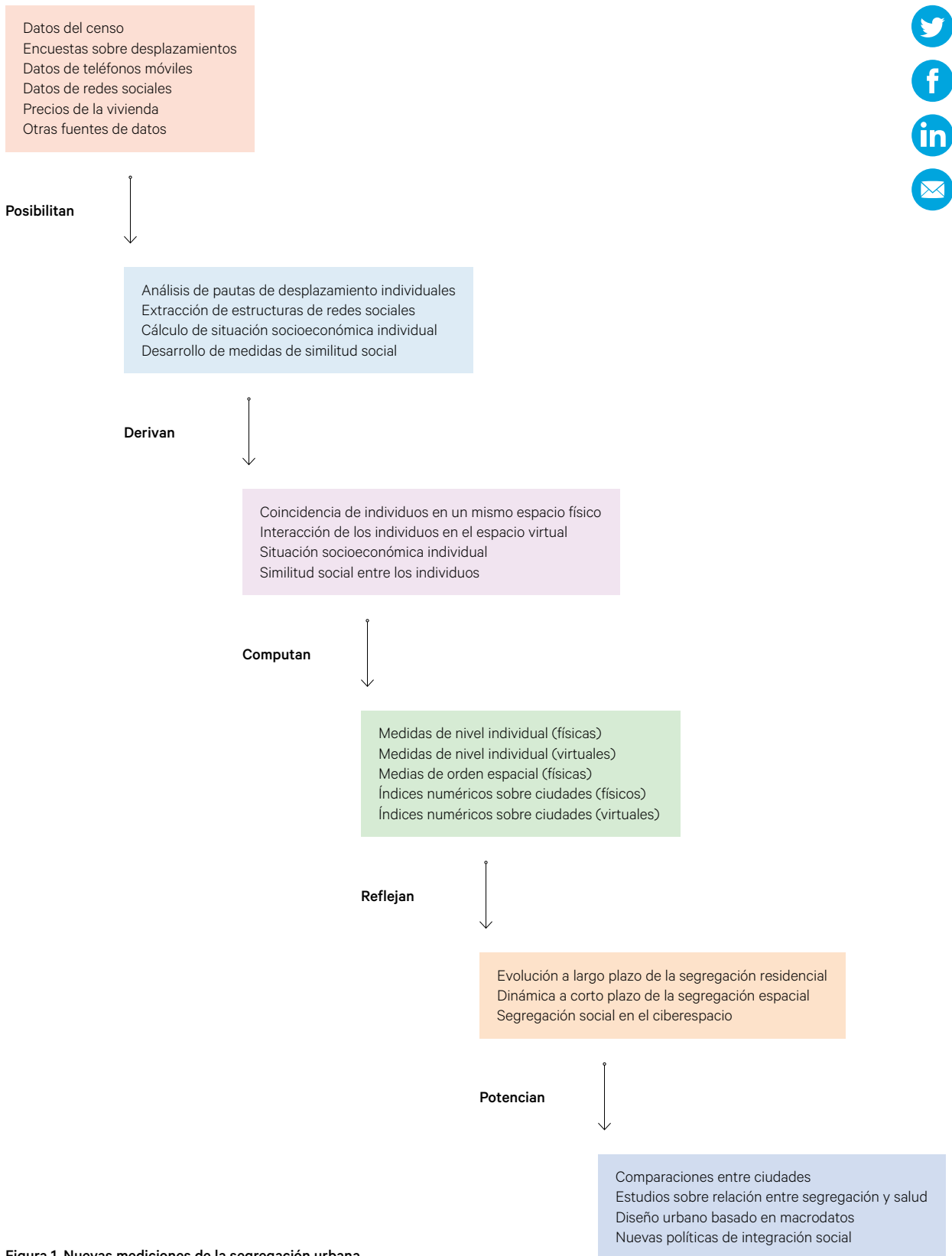


Figura 1. Nuevas mediciones de la segregación urbana





torno a la misma hora. Al conjugar esta información con una medición de la similitud social se podría describir adecuadamente cómo se segregan los individuos en el espacio físico. Por ejemplo, se considera que un individuo que se pasa gran parte del tiempo en lugares mayormente ocupados por individuos similares está físicamente segregado. Se podría concebir una medida similar para calibrar la segregación que se registra en el espacio social. En este se encuentran segregados quienes están dominados por conexiones (es decir, comunicaciones telefónicas frecuentes) con miembros de sus propias clases socioeconómicas.

Al margen de esas dos medidas de tipo individual (franja verde de la figura 1), también podemos establecer medidas de orden espacial. Por ejemplo, un lugar que siempre utilicen personas de rasgos sociales similares será bastante distinto de otro utilizado por diversos grupos sociales. Esa medida se puede realizar estableciendo primero un vector en una ubicación determinada —y en el que cada elemento represente la proporción de personas observadas que pertenece a una determinada clase social—, seguido del cálculo de la entropía de ese vector. Estas medidas también pueden hacerse depender de factores temporales, de manera que se puedan cuantificar los rasgos dinámicos de los espacios urbanos.

Además de medidas que distingan entre cada uno de los ciudadanos o entre lugares, también necesitamos índices numéricos que describan la segregación global de las ciudades para poder compararlas. Por otra parte, los índices actuales —como el de disimilitud y el de entropía de Theil— pueden aplicarse de forma directa para cuantificar la segregación en el espacio físico. Sin embargo, ninguna o pocas iniciativas se han destinado a cuantificar la segregación general en el espacio social (por ejemplo, en una red social móvil). Es preciso concebir nuevos índices que faciliten este objetivo. Se podría, por ejemplo, calibrar la desviación respecto a las pautas de segregación observadas en un «modelo nulo» que dé por hecho que dentro del ciberespacio las interacciones personales tienen un carácter aleatorio.

Con estas nuevas medidas no solo podremos hacer un seguimiento de las tendencias de larga duración, sino detectar las dinámicas a corto plazo que presenta la segregación urbana (franja naranja de la figura 1). Nuestras observaciones transitarán del espacio físico a un espacio híbrido físico-virtual. Nuestros métodos de cuantificación de la segregación mejorarán, hasta incluir no solo medidas agregadas, sino otras de carácter individual. Esas mediciones podrían dar un nuevo impulso a la investigación académica y, lo que es más importante, producir numerosos beneficios sociales (franja azul oscuro de la figura 1).

Cómo conformar ciudades para la integración social

La segregación social está profundamente arraigada en muchas ciudades del mundo y en el futuro, al ir acelerándose la urbanización, puede acentuarse todavía más. Sin embargo, nunca ha sido fácil superar este problema. Los factores que alimentan las segregaciones urbanas son complejos, y por lo general participan de una tupida interrelación de fuerzas históricas, políticas y económicas. Creemos que los nuevos conjuntos de datos urbanos y las mediciones propuestas podrían proporcionar una visión más global de la composición socioeconómica de las ciudades. Esto no solo podría inspirar nuevas prácticas para la mejora de la integración urbana, sino contribuir a evaluar la eficacia de las medidas actuales.

Aunque las formas de cuantificar la segregación se están diversificando, no debemos perder de vista la persistente repercusión que tiene la segregación residencial sobre el bienestar de la sociedad. Según las críticas de la activista estadounidense Jane Jacobs, la planificación urbana «ortodoxa» genera procesos de zonificación y gentrificación que dividen a las sociedades urbanas. Las mediciones propuestas en el presente artículo podrían permitir que los políticos comprendieran mejor la dinámica conductual de quienes habitan en zonas



aisladas; por ejemplo, para evaluar sus niveles de segregación durante el día y también en el ciberespacio. Esto nos llevaría más allá del nivel superficial de la segregación residencial, para desarrollar nuevas políticas y estrategias de intervención.

Las ciudades deberían aspirar a crear espacios públicos diversos que establecieran puentes entre las distintas clases socioeconómicas. Es posible que, tal como ha defendido Jane Jacobs, desarrollar ciudades transitables a pie, con manzanas pequeñas, facilite las interacciones sociales, al tiempo que refuerce la vigilancia informal de los «ojos en la calle». Con estas nuevas mediciones podremos analizar diversos principios de diseño urbano —al establecer correlaciones entre las medidas contra la segregación de tipo espacial y los indicadores relativos al entorno construido (por ejemplo, el tamaño de las manzanas, la densidad de las redes viales y la diversidad del uso del terreno)—, con el fin de evaluar la repercusión que tienen los espacios públicos en las integraciones sociales.

Desde el punto de vista de la movilidad, las ciudades podrían ponderar el desarrollo de redes de transporte que cubran zonas con pocos accesos. El tranvía instalado en la ciudad colombiana de Medellín constituye un ejemplo de éxito, que mejora la comunicación entre los asentamientos informales y el resto de las zonas urbanas. Las mejoras de los servicios de transporte podrían fortalecer las interacciones entre distritos urbanos que mejoren la capacidad de elegir espacios, sobre todo de los grupos desfavorecidos. Evidentemente, esas mejoras deberían ir acompañadas de políticas pertinentes; por ejemplo, de medidas que ofrezcan vivienda asequible a los ciudadanos menos acomodados y creen barrios con habitantes de diversos niveles de renta.

Con la proliferación de internet y de las tecnologías móviles, el fomento de la integración social a través de la red se ha vuelto más importante que nunca. Deben aplicarse normativas que garanticen una igualdad de acceso a la información a través de internet (por ejemplo, de oportunidades laborales) a diferentes grupos sociales y, entretanto, desarrollar comunidades virtuales que sirvan de puente entre distintas clases de personas.

Las ciudades deberían aspirar a crear espacios públicos diversos que establecieran puentes entre las distintas clases socioeconómicas. Es posible que desarrollar ciudades transitables a pie, con manzanas pequeñas, facilite las interacciones sociales y refuerce la vigilancia informal de los «ojos en la calle»

Nuestro mundo está experimentando una urbanización acelerada. Detrás del rápido desarrollo de las ciudades contemporáneas, los entornos urbanos se enfrentan a una enorme desigualdad social y económica. La integración ha sido un elemento medular de las ciudades desde su aparición hace más de diez mil años. Solo podremos avanzar hacia un futuro urbano seguro si logramos calibrar hasta qué punto esta función primordial sigue cumpliéndose y si podemos aplicar, cuando sea necesario, medidas adecuadas para lograr que siga siendo así.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del Research Grant Council de Hong Kong (proyecto n.º 25610118) y de la Hong Kong Polytechnic University Start-Up Grant (proyecto n.º 1-BE0J).

Bibliografía

—Åslund, O. y Nordström Skans, O. (2010): «Will I see you at work? Ethnic workplace segregation in Sweden, 1985-2002», en *ILR Review*, vol. 63, n.º 3, pp. 471-493.

—Blumenstock, J.; Cadamuro, G. y On, R. (2015): «Predicting poverty and wealth from mobile phone metadata», en *Science*, vol. 350, n.º 6264, pp. 1073-1076.

—Cortese, C. F.; Falk, R. F. y Cohen, J. K. (1976): «Further considerations on the methodological analysis of segregation indices», en *American Sociological Review*, pp. 630-637.

—Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (2014): *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*, Nueva York, Naciones Unidas.

—Duncan, O. D. y Duncan, B. (1955): «A methodological analysis of segregation indexes», en *American Sociological Review*, vol. 20, n.º 2, pp. 210-217.

—Ellis, M.; Wright, R. y Parks, V. (2004): «Work together, live apart? Geographies of racial and ethnic segregation at home and at work», en *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 94, n.º 3, pp. 620-637.

—Fry, R. y Taylor, P. (2012): «The rise of residential segregation by income», Washington, D. C, Pew Research Center, p. 26.

—Hellerstein, J. K. y Neumark, D. (2008): «Workplace segregation in the United States: race, ethnicity, and skill», en *The Review of Economics and Statistics*, vol. 90, n.º 3, pp. 459-477.

—Johnston, R.; Poulsen, M. y Forrest, J. (2005): «On the measurement and meaning of residential segregation: a response to Simpson», en *Urban Studies*, vol. 42, n.º 7, pp. 1221-1227.

—Krings, G.; Calabrese, F.; Ratti, C. y Blondel, V. D. (2009): «Urban gravity: a model for inter-city telecommunication flows», en *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, L07003.

—Leo, Y.; Fleury, E.; Álvarez-Hamelin, J. I.; Sarraute, C. y Karsai, M. (2016): «Socioeconomic correlations and stratification in social-communication networks», en *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 13, n.º 125, 20160598.

—Le Roux, G.; Vallée, J. y Commenges, H. (2017): «Social segregation around the clock in the Paris region (France)», en *Journal of Transport Geography*, n.º 59, pp. 134-145.

—Massey, D. S. y Denton, N. A. (1987): «Trends in the residential segregation of Blacks, Hispanics, and Asians: 1970-1980», en *American Sociological Review*, pp. 802-825.

—(1988): «The dimensions of residential segregation», en *Social Forces*, vol. 67, n.º 2, pp. 281-315.

—Musterd, S.; Marcicczak, S.; Van Ham, M. y Tammaru, T. (2017): «Socioeconomic segregation in European capital cities. Increasing separation between poor and rich», en *Urban Geography*, vol. 38, n.º 7, pp. 1062-1083.

—Musterd, S. y Van Kempen, R. (2009): «Segregation and housing of minority ethnic groups in Western European cities», en *Tijdschrift voor economische en sociale geografie*, vol. 100, n.º 4, pp. 559-566.

—Reardon, S. F. (2009): «Measures of ordinal segregation», en Y. Flückiger, S. F. Reardon y J. Silber, *Occupational and Residential Segregation*, Bingley, Emerald Group Publishing Limited, pp. 129-155.

—Reardon, S. F. y O'Sullivan, D. (2004): «Measures of spatial segregation», en *Sociological Methodology*, vol. 34, n.º 1, pp. 121-162.

—Sanou, B. (2016): *ICT facts and figures 2016*, International Telecommunication Union.

—Silm, S. y Ahas, R. (2014): «The temporal variation of ethnic segregation in a city: Evidence from a mobile phone use dataset», en *Social Science Research* n.º 47, pp. 30-43.

—Taeuber, K. E. y Taeuber, A. F. (1976): «A practitioner's perspective on the index of dissimilarity», en *American Sociological Review*, vol. 41, n.º 5, pp. 884-889.

—Williams, D. R. y Collins, C. (2001): «Racial residential segregation: a fundamental cause of racial disparities in health», en *Public Health Reports*, vol. 116, n.º 5, p. 404.

—Xu, Y.; Belyi, A.; Bojic, I. y Ratti, C. (2017): «How friends share urban space: An exploratory spatiotemporal analysis using mobile phone data», en *Transactions in GIS*, vol. 21, n.º 3, pp. 468-487.



Amos N. Guiora
SJ Quinney College of Law,
University of Utah

Amos N. Guiora es profesor en la Facultad de Derecho de Quinney, de la Universidad de Utah. Enseña Derecho Penal y Perspectivas Globales sobre Antiterrorismo y Religión y Terrorismo. Incorpora un innovador método basado en situaciones posibles para abordar problemas y dilemas de seguridad nacional e internacional. Asimismo, es investigador asociado de la Universidad de Oxford en el Instituto Oxford de Ética, Derecho y Conflictos Armados; investigador del Instituto Internacional Antiterrorismo del Centro Interdisciplinario en Herzliya, Israel; miembro de la escuela holandesa de Investigación sobre Derechos Humanos de la Facultad de Derecho de Utrecht y asesor en la Alianza por una Uta mejor. Ha publicado numerosos libros en Estados Unidos y Europa. Entre sus últimos títulos figuran: *Cybersecurity: Geopolitics, Law, and Policy* (Londres, 2017); *The Crime of Complicity: The Bystander in the Holocaust* (Chicago, 2017; traducido al chino y al neerlandés, segunda edición en preparación) y *Earl Warren, Ernesto Miranda and Terrorism* (Nueva York, 2018). Ha participado durante muchos años en negociaciones a dos vías en el conflicto israelí-palestino con un enfoque basado en la priorización como herramienta analítica.

Libro recomendado: Shoemaker, Dan y Conklin, W. Arthur (2012): *Cybersecurity: The Essential Body Of Knowledge* [Ciberseguridad: lo que hay que saber], Boston, Cengage.

El grado de gravedad que atribuyamos a las ciberamenazas es cuestión de perspectiva, experiencia, interacción y concienciación. Verlas como una acción delictiva, un acto terrorista o un híbrido de ambas cosas constituye un importante objeto de debate. Resolver este dilema ayuda a definir nuestra percepción de los responsables de los ciberataques y a decidir el castigo que merecen sus actos. Es una cuestión que atañe a la policía, los fiscales, los abogados defensores y la judicatura. Mi enfoque, como sugiere el título, se centra en la cooperación en ciberseguridad con objeto de minimizar el impacto de un ataque. La cooperación, como se verá, suscita reticencias en varios ámbitos. En algunos casos son legítimas y deben abordarse y recibir una respuesta convincente. El objeto del modelo de cooperación es ofrecer mecanismos institucionales para prevenir o, al menos, minimizar el daño que trae consigo la mera amenaza de un ciberataque y, por supuesto, un ataque real.



Que la ciberamenaza existe es hoy algo aceptado. El grado de gravedad que le atribuimos depende del punto de vista, la experiencia, las interacciones y el nivel de sensibilización de cada uno. Un punto importante a abordar es si la consideramos un acto delictivo, un acto terrorista o un híbrido entre ambas cosas.

Resolver esta cuestión ayuda a definir qué condición atribuimos a los responsables de los ciberataques y decidir el correspondiente castigo por sus actos. Es una cuestión que atañe a los cuerpos policiales, los fiscales, los abogados defensores y la judicatura, pero que también da pie a consideraciones morales en el contexto de la responsabilidad y la rendición de cuentas.

Otra realidad histórica a tener en cuenta es la falta de cooperación entre comunidades diferenciadas pero interconectadas que podrían beneficiarse mucho de unirse ante una amenaza grave. En este sentido, algunos objetivos potenciales de los ciberataques tienen el firme interés y la capacidad de minimizar la amenaza. Sin embargo, el análisis retrospectivo de cómo no llegan a unir fuerzas plantea un panorama desconcertante; un panorama que, en pocas palabras, refleja una falta de voluntad, derivada de múltiples razones, de reconocer las ventajas de una respuesta unificada ante los ciberataques.

Esta reticencia o vacilación no es una novedad de 2018, como dejan más que claro mis investigaciones anteriores en otros proyectos sobre ciberseguridad. Es decir, la falta de cooperación constatada en 2018 no es un fenómeno reciente, ni mucho menos. Una revisión de los datos, la literatura y la evidencia casuística pone de relieve, de un modo convincente, la ausencia de cooperación institucionalizada (a falta de un término mejor). En cuanto a las diferentes razones del éxito de los ciberdelincuentes, su execrable impacto se ve intensificado por la incapacidad sistemática de sus blancos potenciales de reconocer las ventajas de adoptar un modelo cooperativo. Dados los esfuerzos persistentes, resueltos e incansables de los responsables del ciberterrorismo o los ciberataques, no adoptar por sistema un modelo de cooperación es tan destacable como preocupante.

Es destacable porque refleja un patrón coherente, y preocupante porque facilita el daño continuado a la sociedad (definida en términos amplios). Dicho patrón histórico explica, en parte, el éxito de los ciberataques. Refleja asimismo la incapacidad de desarrollar plenamente medidas defensivas que puedan aliviar, cuando no minimizar, el daño causado por los ciberataques. El análisis de las páginas siguientes se articula alrededor de dos realidades paralelas: (a) el análisis histórico de los problemas de ciberseguridad pone de relieve las consecuencias de la falta de cooperación; y (b) el desarrollo y la implantación de modelos de cooperación constituyen una medida positiva y muy necesaria para responder con más eficacia a una amenaza evidente.

La contextualización de un problema es importante para determinar qué recursos se dedican a contrarrestar, mitigar y minimizar las amenazas. De un modo similar, para concretar las medidas operativas aplicables contra el autor o los autores responsables de un ataque concreto es importante decidir resolver el dilema terrorismo-delito penal-híbrido. En todo caso, por importante que sea este debate, no será el que ocupe al presente capítulo, cuyo tema principal es, como indica el título, la cooperación en ciberseguridad con el fin de minimizar el impacto de los ataques. Como veremos, la cooperación suscita reticencias en varios ámbitos; reticencias que, en algunos casos, son legítimas y que deben abordarse y recibir una respuesta convincente.

Todo análisis de la ciberseguridad requiere una definición del término. Como suele ocurrir en estos casos, las mentes razonables pueden discrepar razonablemente; la discrepancia es una realidad y es comprensible.



Definimos ciberataques como «el uso deliberado y perverso de la tecnología con el propósito de dañar a las personas, las comunidades, las instituciones y los gobiernos». Pese a que esta propuesta de definición puede ser objeto de desacuerdo, se parte de la base de que sí hay amplio consenso respecto a lo que constituye «daño», con independencia de que un ataque haya tenido o no éxito.

Para que una acción en el ciberespacio sea eficaz, no es necesario ni que sea un ataque ni que tenga éxito. Dada la omnipresencia del ciberespacio, el mero temor a un ataque de este tipo nos hace dedicar, individual y colectivamente, una cantidad significativa de recursos, tiempo y energía a minimizar su impacto potencial. De forma muy parecida a la política antiterrorista, se destinan medidas importantes tanto a la prevención de un ataque como, cuando ocurre uno, a responder a su impacto y consecuencias. Se nos plantean las preguntas siguientes: ¿Cuál es la mejor manera de protegernos? ¿Ya la estamos poniendo en práctica? ¿Existen mecanismos más eficaces y creativos? Podemos dar por hecho que son las mismas preguntas que, a la inversa, se plantean aquellos que se dedican a dañar deliberadamente a la sociedad civil (definida en términos generales o particulares). Es así, con independencia del paradigma que asignemos al ciberespacio. Como ya hemos subrayado, no se puede minimizar la importancia de definir y categorizar las acciones en el ciberespacio. Sin embargo, por mucha importancia que tenga y por poca que se le pueda negar, el presente capítulo se centrará en un aspecto diferente.

Nuestro objeto de análisis se resume en la cooperación entre diferentes objetivos potenciales de ataques y entre distintos organismos policiales, así como entre objetivos y organismos policiales. Sostenemos, en pocas palabras, que implantando modelos de cooperación destinados a ofrecer mecanismos institucionalizados se puede evitar o, por lo menos, minimizar el daño que representa la mera amenaza de un ciberataque o, más aún, un ataque que tenga éxito. Dadas las consecuencias de un ataque y los recursos necesarios para reducir al mínimo su impacto, el modelo de cooperación propuesto tiene el objetivo de reducir los costes, tanto directos como indirectos, de las acciones en el ciberespacio. El modelo se fundamenta en una premisa: prevenir un ataque o, en el peor de los casos, llevar a cabo un esfuerzo concertado y decidido es preferible a asumir los costes de un ataque exitoso.

Implantando modelos de cooperación destinados a ofrecer mecanismos institucionalizados se puede evitar o, por lo menos, minimizar el daño que representa la mera amenaza de un ciberataque o, más aún, un ataque que tenga éxito

Sé que hay grandes empresas que suscriben el argumento opuesto: es más rentable absorber un ataque que invertir en modelos de protección avanzados. Sin embargo no he conocido a directivos cuyas empresas hayan sido objeto de ataques exitosos y que se adhieran a dicha teoría.¹ Para mí, esta lógica refleja un pensamiento a corto plazo centrado en consideraciones económicas muy restringidas e indica una falta de conocimiento de las ventajas de una protección proactiva y de modelos de cooperación. Dichas personas también manifestaron sus inquietudes sobre la imagen pública, el nerviosismo de los consumidores y la ventajas que podría otorgar a la competencia. Desde una perspectiva estrictamente empresarial, este enfoque quizá es comprensible: era un argumento racional, no el producto de la impulsividad o la precipitación. Asimismo, las interacciones con mis interlocutores dejaban claro que consideraban que su enfoque correspondía a las prácticas de las mejores empresas.



Por tanto, no podemos descartarlo de un plumazo. No obstante, el enfoque refleja criterios tácticos limitados, de orientación interna y que no llegan a analizar el panorama general y las posibles ventajas a obtener. Aunque a los citados directivos se les presentó el intercambio de información para minimizar los daños como algo positivo, su perspectiva, centrada en aspectos internos, los conducía a percibir dicho intercambio como algo negativo, con un impacto notable en el producto y posición de la empresa.

Debemos añadir que los agentes de las fuerzas de la ley tenían una percepción positiva del modelo de cooperación como algo que los ayudaría en su labor, con una salvedad: una reticencia claramente manifestada de los agentes policiales federales a intercambiar información con sus homólogos estatales y locales. No queda claro si esta reticencia está institucionalizada o si se limita a determinadas personas; el análisis de esta cuestión no arrojó luz en un sentido u otro.

En el presente capítulo espero convencer a los lectores de la cortedad de miras de un enfoque como ese y subrayar las ventajas del modelo de cooperación que propongo. La pregunta es la siguiente: ¿Cuál es el modo más eficaz de mejorar la ciberseguridad?

Para convencer al lector de la viabilidad de una propuesta así, hay que analizar los costes de las acciones en el ciberespacio, tanto en forma de amenaza como de ataque. Es decir, debe atribuirse una ventaja a la adopción de un modelo de cooperación, de modo que el beneficio supere a los costes esperados; en caso contrario, la propuesta sería inviable desde el principio. De un modo similar, se deben disipar las dudas derivadas de considerar que la cooperación no es un «objetivo en sí misma», según las cuales la cooperación acaba teniendo consecuencias dañinas e involuntarias que reducen su valor.

La premisa de trabajo, como desarrollo más adelante, es que la cooperación es positiva, que así se debe considerar y que hay que desarrollar modelos para implantarla con éxito. No será tarea fácil, como ya me dejaron claro durante la redacción de mi libro *Cybersecurity: Geopolitics, Law, and Policy* [Ciberseguridad: Geopolítica, Ley y Regulación],² y confirmé cuando organicé un ejercicio de simulación.³ Pese a los argumentos planteados (algunos comprensibles, otros que podrían caracterizarse como «difíciles de entender»), considero que el modelo de cooperación propuesto merece una atención detenida en un contexto caracterizado por ciberataques incesantes. Como suele decirse, «la mejor defensa es un buen ataque».

El análisis se dividirá en los cinco apartados siguientes: «Qué significa “cooperación”»; «Cooperación entre quiénes»; «Cooperación hasta qué punto»; «El bueno, el feo y el malo de la cooperación», y «Reflexiones finales».

Qué significa «cooperación»

El término «cooperación» tiene muchos significados y definiciones. El contexto, la época, la cultura y las circunstancias desempeñan un papel importante tanto en la definición del término como en su puesta en práctica real. La cooperación puede ser permanente, transitoria o situacional; se puede fundamentar en mecanismos formales y también en concepciones informales. La cooperación, ya sea bilateral o multilateral, alcanza su plenitud cuando las partes consideran que este tipo de relación les beneficia mutuamente.

Eso no significa que un mecanismo de este tipo, sea formal o informal, esté exento de costes. No lo está. Lo que es cierto es que en cualquier acuerdo vinculante se renuncia voluntariamente a determinadas «libertades» a cambio de un beneficio percibido. Basta con recordar las obras de Hobbes, Locke o Rousseau para reconocer los costes y beneficios de crear una comunidad y unirse a ella.⁴



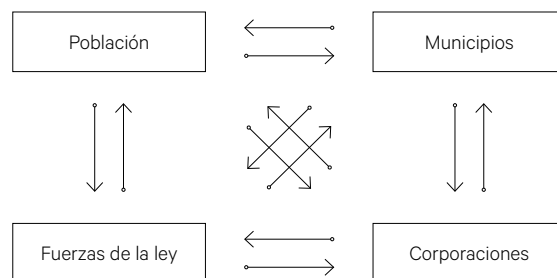
Esa es la esencia de la cooperación. Al entrar en una comunidad y cooperar con sus miembros, buscamos seguridad, estabilidad y protección, aspectos que se suelen percibir como positivos. A cambio, renunciamos al individualismo, a un cierto grado de libre albedrío y a parte de nuestra independencia. Para algunos, se trata de un coste inaceptable, no compensado por las ventajas derivadas de los aspectos positivos de la cooperación. Es razonable.

No obstante, la historia nos enseña que, por lo general, los beneficios de la cooperación superan a los costes percibidos o reales, aunque sin duda hay excepciones. Sin embargo, el concepto de «unir fuerzas» en una empresa o propósito común se suele considerar preferible a «intentarlo solo». Para facilitar o, incluso, mejorar la eficacia, un acuerdo de cooperación debe incluir:

1. Consenso acerca de los objetivos comunes.
2. Mecanismos para evaluar continuamente los costes y beneficios.
3. Mecanismos para abandonar el acuerdo.
4. Unos parámetros para el acuerdo.
5. Unos mecanismos acordados de aplicación del acuerdo.

Huelga decir que el predicado subyacente es que las partes alcanzan el acuerdo voluntariamente reconocen la necesidad de este y admiten que la alternativa no es deseable. A medida que avanzamos en el análisis, estos principios sirven de base para nuestra recomendación de convertir la cooperación en un aspecto esencial de la minimización de las amenazas que plantean los ciberataques, con independencia de que sean considerados un delito, un acto de terrorismo o un híbrido entre los dos.

Para dar cuerpo a la presente propuesta, el modelo de cooperación que recomiendo beneficiaría tanto a las entidades privadas como a las públicas. De un modo similar, obligaría a las corporaciones que han sufrido un hackeo a institucionalizar unos mecanismos de notificación tanto a los organismos policiales como a sus clientes. Los vectores cruzados entre la población (en términos generales), los municipios, la policía y las corporaciones (coticen o no en el mercado de valores).



Esta complejidad refleja la multiplicidad tanto de las amenazas como de los objetivos vulnerables. Somos conscientes de que la puesta en práctica de la presente recomendación resulta contraria a la lógica para muchas de las partes interesadas, como las corporaciones (lo que no nos puede sorprender) y las fuerzas de la ley (lo que sí es sorprendente). En todo caso, el enfoque de dicha cooperación como un modelo de seguridad colectiva combinado con una componente de legítima autodefensa (en ambos casos derivados del derecho internacional) fue acogido con escepticismo.



La resistencia de las corporaciones reflejaba la preocupación por una potencial pérdida de ingresos y otras consecuencias involuntarias, en forma de ventajas para la competencia. Por otra parte, la reticencia de las fuerzas de la ley partía de dos lógicas diferentes: la falta de voluntad de los agentes policiales federales de cooperar con los agentes locales y la escasez de recursos para hacer frente a los ciberataques. La primera lógica no tiene salida, mientras que la segunda requiere admitir que la cibercriminalidad requiere una dotación de recursos suficiente para que la policía sea un colaborador más eficaz a la hora de minimizar la amenaza que plantean los malhechores (más adelante analizaremos la Ley de Intercambio de Información en Ciberseguridad o Cybersecurity Information Sharing Act, de 2015).

¿Cómo lograr el modelo corporativo? Existen varias alternativas y opciones, que en algunos casos representan medidas voluntarias y en otros son fruto de la imposición legislativa. En un mundo ideal imperaría la voluntariedad, pero, como quedó claro en numerosas conversaciones, se trata de un desenlace poco probable. De ahí la propuesta de modelos cooperativos por mandato legislativo que impongan un deber a los objetivos potenciales de ciberataques (la lista de objetivos potenciales se expone en el siguiente apartado 2).

Cabe una advertencia: sumar la intervención del Congreso de Estados Unidos a los requisitos existentes suscita grandes recelos, sobre todo en el sector privado. Asimismo genera preocupaciones de raíz ideológica, en especial entre los detractores acérrimos de la intervención del Estado, que rechazan con vehemencia este tipo de medidas. Ambos antagonismos constituyen obstáculos legítimos y poderosos para el avance de una legislación en la materia. Su poder se magnifica mediante la realidad de la política; en especial, en el contexto de polarización que caracteriza ahora mismo a Estados Unidos.

El deber de notificar, como ilustra la Ley Sarbanes-Oxley de 2002,⁵ es la bestia negra de muchos líderes corporativos. Un directivo dijo que la legislación era fuente de cargas, costes y obligaciones engorrosas para las empresas. En su opinión, en su equipo había más directivos dedicados a supervisar el cumplimiento de la ley que responsables de producción.

Sin duda, ello impone costes indeseados y, en ocasiones, injustificados. Sin embargo, los riesgos y amenazas que representan los ciberataques justifican la búsqueda de mecanismos que impongan la cooperación. Esto es, si la cooperación voluntaria no es posible, se debe ampliar el debate a la posibilidad de que la cooperación sea obligatoria.

La Ley de Intercambio de Información sobre Ciberseguridad (S. 754), presentada por Richard Burr, senador republicano por Carolina del Norte, y promulgada por el presidente Obama, el 18 de diciembre de 2015, era una medida importante porque «autoriza el intercambio de información sobre ciberseguridad entre el sector privado, los gobiernos estatales, locales, tribales y territoriales, y el gobierno federal».⁶ Esta ley tiene cuatro objetivos importantes:

- Requiere al gobierno federal que publique periódicamente un documento de buenas prácticas. De este modo las entidades podrán utilizar las buenas prácticas para defender mejor su infraestructura cibernética.
- Identifica los usos de indicadores de ciberamenaza y las medidas defensivas permitidas al gobierno federal, al tiempo que restringe la revelación, retención y uso de la información.
- Autoriza a las entidades a intercambiar indicadores de ciberamenaza y medidas defensivas, entre sí y con el Departamento de Seguridad Nacional, con la consiguiente protección ante riesgos legales.
- Protege la información identificable personalmente (IIP), al exigir a las entidades que retiren toda la IIP de la información transmitida al gobierno federal. Estipula que cualquier organismo federal que reciba ciberinformación que contenga IIP debe proteger la IIP de toda difusión o uso no autorizado. El fiscal general de Estados Unidos y el secretario del Departamento de Seguridad Nacional publicarán unas directrices para ayudar a cumplir este requisito.⁷



En el mismo sentido, el 6 de julio de 2016, el Parlamento Europeo adoptó la Directiva relativa a las redes y sistemas de información (Directiva RSI), que proporciona medidas legales para mejorar el nivel general de ciberseguridad en la UE, al garantizar:

- La preparación de los Estados miembros, al exigirles unos dispositivos apropiados al respecto; por ejemplo, una red de equipos de respuesta a incidentes de seguridad informática (CSIRT, por sus siglas en inglés) y una autoridad nacional competente en redes y sistemas de información (RSI).
- La cooperación entre todos los Estados miembros mediante la creación de un grupo de cooperación a fin de respaldar y facilitar la cooperación estratégica y el intercambio de información. También deberán crear una Red de CSIRT, con el objetivo de promover una cooperación operacional rápida y eficaz ante incidentes de ciberseguridad específicos e intercambiar información sobre riesgos.
- Una cultura de la seguridad en diferentes sectores que resultan vitales para nuestra economía y sociedad y, por añadidura, dependen en gran medida de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), como la energía, el transporte, el agua, la banca, las infraestructuras de los mercados financieros, la sanidad y la infraestructura digital. Las empresas de dichos sectores que sean identificadas por los Estados miembro como operadoras de servicios esenciales deberán adoptar las medidas de seguridad adecuadas y notificar los incidentes graves a la autoridad nacional correspondiente. Asimismo, los proveedores de servicios digitales clave (motores de búsqueda, servicios informáticos en la nube y mercados en línea) deberán cumplir los requisitos de seguridad y notificación de la nueva Directiva.⁸

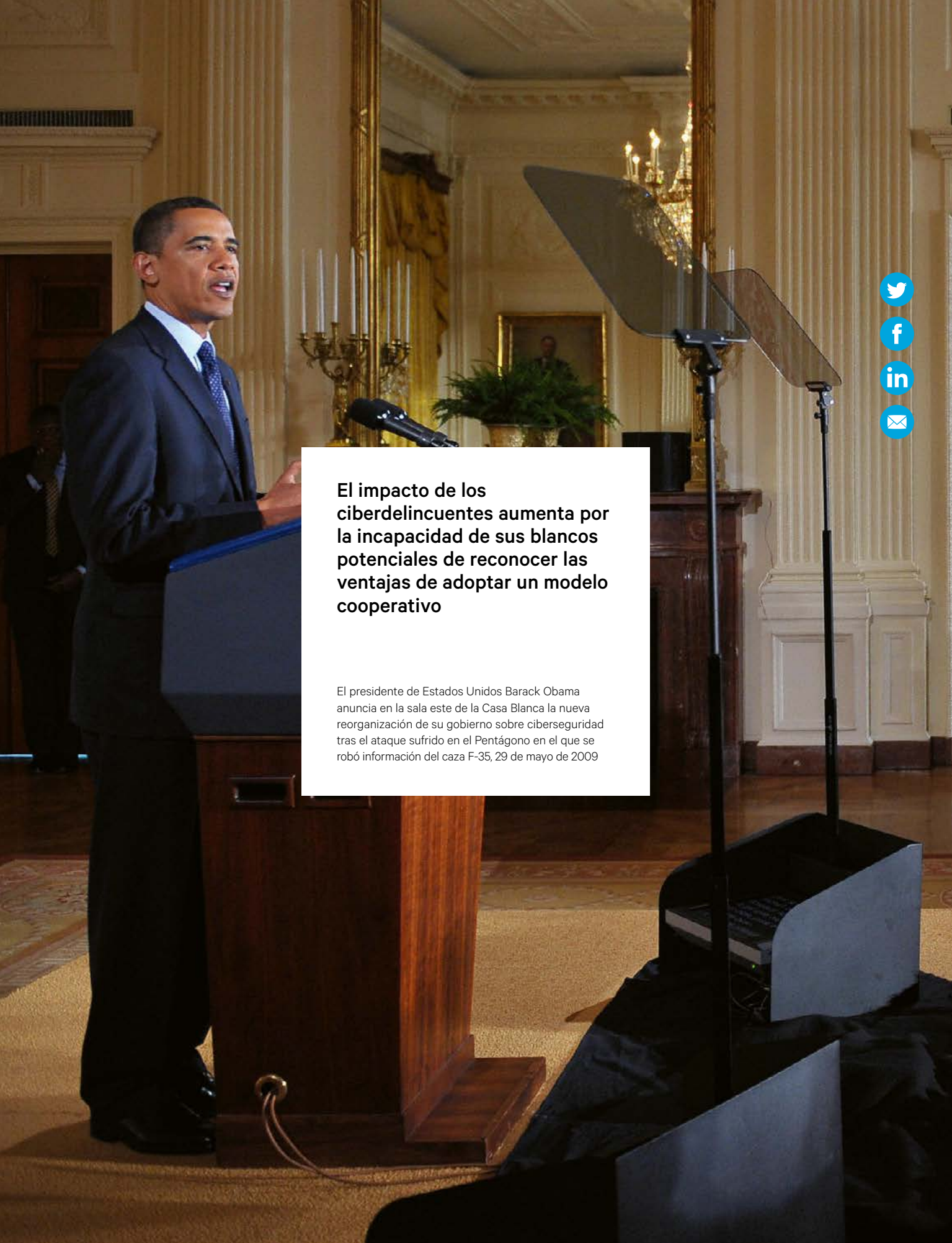
La clave está en basarse en estas dos importantes medidas e incrementar los niveles de cooperación entre diferentes comunidades, creando así una infraestructura que minimice con la máxima eficacia las posibles consecuencias de un ciberataque. Para conseguirlo, es necesario integrar sectores, vectores y grupos de interés; y, para lograrlo con mayor solvencia, hay que reconocer que las medidas de cooperación existentes, por bienintencionadas que sean, se quedan cortas. El «porqué» nos lo dejaron claro; el desafío, a medida que avanzamos en este debate, radica en determinar qué cooperación, entre quiénes, es la que se debe institucionalizar con mayor efectividad.⁹

El apartado siguiente se centra en esta cuestión.

Cooperación entre quiénes


En el reino de la ciberseguridad, los blancos de los ciberataques (con independencia de que lleguen o no a sufrirlos) pueden ser (de lo general a lo específico, sin afán de exhaustividad):

1. Personas como objeto de un robo de identidad.¹⁰
2. Personas cuya intimidad está en peligro cuando, por ejemplo, los centros sanitarios sufren un hackeo.
3. Empresas (de todos los tamaños) cuyos datos se ven comprometidos.
4. El sector financiero, incluidos los bancos, las empresas de inversión y los mercados de valores.
5. Municipios cuyas infraestructuras (por ejemplo, la señalización de tráfico y los sistemas de agua) se ven amenazadas.
6. Hospitales, cuando se pone en peligro el bienestar de los pacientes y la seguridad y protección de las historias médicas.



El impacto de los ciberdelincuentes aumenta por la incapacidad de sus blancos potenciales de reconocer las ventajas de adoptar un modelo cooperativo

El presidente de Estados Unidos Barack Obama anuncia en la sala este de la Casa Blanca la nueva reorganización de su gobierno sobre ciberseguridad tras el ataque sufrido en el Pentágono en el que se robó información del caza F-35, 29 de mayo de 2009



El 6 de julio de 2016 el Parlamento Europeo adoptó la Directiva RSI que proporciona medidas legales para mejorar el nivel general de ciberseguridad en la UE

Cables de fibra óptica y de cobre de Ethernet. El Departamento de Cultura, Comunicación y Deportes junto al Ministerio del Interior británico trabajan en un libro blanco que obligue a los gigantes tecnológicos a revelar cómo gestionan el material ofensivo e ilegal que publican sus usuarios



7. Las fuerzas armadas, al resultar amenazados los sistemas de armamento.
8. Las líneas aéreas y los sistemas de control del tráfico aéreo.
9. Los organismos y oficinas gubernamentales.



Esta lista, pese a que no es exhaustiva, basta para mostrar la amplitud del abanico de objetivos potenciales de un ciberataque. Pone el acento en el número significativo de personas, instituciones, corporaciones e infraestructuras críticas que corren peligro. El concepto de «peligro» es esencial en el debate sobre la cooperación: a falta de un peligro potencial, el impulso para llegar a un acuerdo se debilita significativamente, cuando no se desvanece por completo.¹¹

No obstante, en realidad la ciberseguridad es un mundo de amenazas claras pero desconocidas, ocultas e indistinguibles hasta que se produce el verdadero ataque. La ciberamenaza se debe formular en términos de «cuándo se producirá un ataque», y no «si se produce un ataque».

La lista anterior refleja el amplio abanico de objetivos potenciales de un ataque, además de poner de manifiesto el alcance de su impacto en términos de víctimas secundarias. También subraya la importante cuestión de «ante quién hay que rendir cuentas». La cooperación no se puede considerar algo «que está bien», sino un medio necesario para proteger a las víctimas, tanto deliberadas como accidentales, de un ciberataque. Para señalar lo que es obvio: el número de personas afectadas por el hackeo de cualquiera de las entidades enumeradas antes es asombroso. No solo tiene un coste económico extraordinario, también paraliza el municipio, afecta al hospital, pone en peligro a los viajeros aéreos y tiene consecuencias abrumadoras para las personas que requieren de los servicios públicos. Por sí solo, esto justifica la cooperación entre las partes implicadas.

Lo que propongo es que consideremos la presente propuesta desde la óptica, por extrapolación, del derecho internacional. De este modo podremos analizar la cooperación en cuanto autodefensa, pero también como iniciativa de seguridad colectiva. En el contexto de la cooperación entre las víctimas potenciales de un ciberataque, esta dualidad proporciona un marco intelectual y, en ocasiones, también práctico. Pone de relieve dos realidades importantes: la necesidad de autodefensa y el reconocimiento de que unir fuerzas constituye un medio eficaz de mejorar la protección.¹²

La cooperación o seguridad mutua no implica un acuerdo sobre todas las cuestiones ni indica una confluencia perfecta de intereses, valores y objetivos. Sin embargo sí refleja el reconocimiento de que determinadas amenazas, a tenor de sus posibles consecuencias, justifican la búsqueda de una postura común aun cuando las partes tengan intereses contrapuestos. Los dos principios (autodefensa y seguridad colectiva) se pueden considerar complementarios. Por una parte, la acción individual está justificada; por otra, se reconoce que determinados casos requieren de cooperación para facilitar la protección.

El artículo 51 de la Carta de las Naciones Unidas establece que:

Ninguna disposición de esta Carta menoscabará el derecho inmanente de legítima defensa, individual o colectiva, en caso de ataque armado contra un Miembro de las Naciones Unidas, en tanto que el Consejo de Seguridad haya tomado las medidas necesarias para mantener la paz y la seguridad internacionales. Las medidas tomadas por los Miembros en ejercicio del derecho de legítima defensa serán comunicadas inmediatamente al Consejo de Seguridad, y no afectarán en manera alguna la autoridad y responsabilidad del Consejo conforme a la presente Carta para ejercer en cualquier momento la acción que estime necesaria con el fin de mantener o restablecer la paz y la seguridad internacionales.¹³

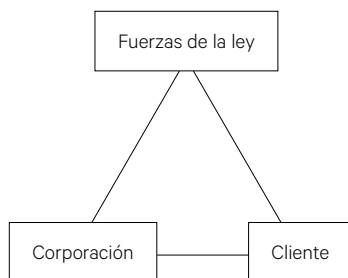
Según el artículo 5 del Tratado de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN):

Las Partes acuerdan que un ataque armado contra una o más de ellas, que tenga lugar en Europa o en América del Norte, será considerado como un ataque dirigido contra todas ellas, y en consecuencia, acuerdan que si tal ataque se produce, cada una de ellas, en ejercicio del derecho de legítima defensa individual o colectiva reconocido por el artículo 51 de la Carta de las Naciones Unidas, ayudará a la Parte o Partes atacadas, adoptando seguidamente, de forma individual y de acuerdo con las otras Partes, las medidas que juzgue necesarias, incluso el empleo de la fuerza armada, para restablecer la seguridad en la zona del Atlántico Norte. Cualquier ataque armado de esta naturaleza y todas las medidas adoptadas en consecuencia serán inmediatamente puestas en conocimiento del Consejo de Seguridad. Estas medidas cesarán cuando el Consejo de Seguridad haya tomado las disposiciones necesarias para restablecer y mantener la paz y la seguridad internacionales.¹⁴



Aplicados a la cibernética, los dos principios reflejan un enfoque integrado que nos permite responder al que debería ser el interés principal de los objetivos potenciales de un ciberataque: evitarlo, si es posible, o, en caso de ataque consumado, minimizar su impacto. Desde el punto de vista de la víctima potencial (por ejemplo, el cliente de una gran empresa financiera), un enfoque de este tipo reflejaría reconocer el deber de proteger y la aplicación de las consiguientes medidas. De un modo bastante análogo, los gobiernos tienen la obligación de proteger a su población civil.

En el combate contra el ciberterrorismo, la concepción del «cliente como colaborador» —en virtud de la cual se crea una relación triangular entre la empresa, el cliente y las fuerzas de la ley— es mucho más eficaz que la minimización innecesaria o la misma negación de la amenaza.



Para una empresa, resulta más barato responder a un hackeo o gestionar sus consecuencias que invertir en sistemas de defensa y protección.¹⁵ El número de empresas que, tras un hackeo (consumado o no) se sinceran inmediatamente y admiten «nos han hackeado, somos vulnerables y debemos aprender de ello» es mínimo. Es una oportunidad perdida tanto para la empresa como para otras partes interesadas, al tiempo que representa una doble victoria para los piratas informáticos:¹⁶ la intrusión ha tenido éxito y las empresas son incapaces de aprender las unas de las otras. Pese a que las diferentes compañías tienen intereses que proteger, las similitudes y los valores comunes que las unen justificarían que aceptaran y facilitaran el intercambio de información frente a una intrusión o un intento de intrusión. Pero lo cierto es que la mayoría de las empresas son muy reticentes a dar un paso adelante y reconocer que han sufrido un hackeo. En ese sentido, no son francas con sus clientes, sus accionistas o las fuerzas del orden público. Además, impiden o evitan que otras empresas se protejan. Tal vez les avergüenza ser vulnerables pese al enorme gasto en cortafuegos y equipos de TI (tecnologías de la información). Sin embargo, dado el carácter malintencionado de los

ciberagresores y el daño causado, las empresas deberían dejar de lado la vergüenza y ser mucho más transparentes.

Para tal fin, es recomendable definir la falta de transmisión de información como un acto delictivo. El marco establecido por la Ley de Intercambio de Información en Ciberseguridad ofrece un punto de partida para hacerlo. A continuación se articulan las razones de esta recomendación:

— *Teniendo en cuenta a los clientes*

Como cliente de una empresa que ha sido hackeada, usted desea saber *de inmediato* si su intimidad está en peligro. Tiene el derecho a saber que «alguien a quien no autorizó» tiene acceso a su número de la seguridad social, su información sanitaria y otros datos de carácter muy personal. Las empresas deben tener la *obligación* inmediata de notificar a sus clientes.

— *Teniendo en cuenta a los accionistas*

Para los accionistas hay en juego intereses económicos considerables. Dicho esto, existen factores económicos importantes a tener en cuenta a la hora de determinar cuándo y cómo informar a los accionistas de un ciberataque, haya tenido o no éxito. Claramente, las corporaciones sopesan con cuidado el impacto de una respuesta negativa, pero, en cualquier caso, deben asumir la responsabilidad absoluta de ofrecer a sus accionistas la máxima información y de un modo inmediato.

— *Teniendo en cuenta a las fuerzas de la ley*

Cuanto menos se tarde en transmitir a las fuerzas de la ley la información de un ciberataque, con mayor eficacia podrán iniciar el proceso de identificar al responsable. A primera vista, a la empresa agredida le interesa ayudar a la policía. No obstante, los reiterados retrasos en la transmisión de información indican la existencia de un conflicto al respecto, pese a las ostensibles ventajas que se derivarían de una notificación y una transmisión de información inmediatas.

Con vistas a un proceso de notificación institucionalizado, el apartado siguiente se centra en la mejora de la cooperación entre partes afectadas por un ciberataque contra una empresa.

¿Cooperación hasta qué punto?

La complejidad de esta cuestión queda patente en un comentario y una respuesta del ejercicio mencionado en la introducción. El diálogo se puede resumir del modo siguiente:¹⁷

—Amos N. Guiora (ANG): ¿Cuándo informa a sus clientes de que le han hackeado, con la consiguiente potencial violación de su intimidad?

—CEO: Solo cuando el problema está resuelto; nunca mientras estamos enfrentándonos al posible hackeo.

—Participante: Me gustaría saberlo tan pronto como ustedes (la empresa); de este modo podría tomar medidas para protegerme.

—CEO: Me centraré en resolver el problema antes que en informar a los clientes.

—Cliente: ¿Y eso significa que no me permitirán proteger mi intimidad, aunque consideren que puede estar en peligro?

—CEO: Así es.

—ANG: ¿Informaría usted a la competencia (del mismo sector) de que su empresa ha sido hackeada?

—CEO: No.

—ANG: ¿Por qué?

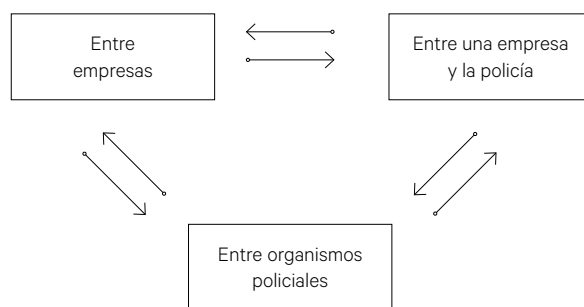


- CEO: Lo usarían en su propio beneficio, de modo que debilitarían mi posición financiera.
- ANG: ¿Informaría a las fuerzas de la ley, ya fueran locales o nacionales?
- CEO: No sería una prioridad.



Me impresionó el CEO por su franqueza; además, quedaba claro que el ciberprotocolo de su empresa era avanzado y fruto de mucha reflexión y conocimiento. Pero también me asombró la falta de voluntad (bien argumentada) de cooperar con tres actores diferenciados: los clientes, la competencia y las autoridades policiales. Sus respuestas reflejaban un enfoque de «hacer las cosas solos». Esta sensación se acrecentó cuando un participante me explicó lo siguiente: un director de seguridad de la información afirmó que durante un ataque solo compartiría información con aquellas entidades empresariales que conociera y en las que confiara personalmente.

A menudo se alude a los motivos corporativos, los intereses financieros, la competencia y los secretos industriales como razones de este enfoque. Por otra parte, el pensamiento estratégico a largo plazo indica que es esencial adoptar una perspectiva distinta para contrarrestar con éxito los ciberataques. Este enfoque más estratégico y a largo plazo se fundamenta sobre todo en el reconocimiento de un «enemigo común» y de que «aunar fuerzas» mejorará notablemente el desarrollo de contramedidas más eficaces. El modelo de cooperación propone la colaboración entre empresas, y entre estas y fuerzas policiales.



La interacción con agentes de policía puso de relieve la falta de cooperación en materia de ciberseguridad y en tres ámbitos distintos: entre una empresa y otra, entre una empresa y la policía, y entre distintos organismos policiales.

¿Qué deberían hacer las empresas al descubrir que ha habido una intromisión?:

- Efectuar una evaluación sincera del «daño causado».
- Tomar todas las medidas posibles para proteger los datos existentes.
- Informar a los clientes lo antes posible.
- Informar de inmediato a las autoridades policiales y colaborar estrechamente con estas para minimizar los daños.
- Informar al público.
- Cooperar con otras empresas, con el objetivo tanto de minimizar los daños internos como de evitar ataques futuros.

Adoptar estas medidas requiere sofisticación, trabajo en equipo y la capacidad y voluntad de analizar las vulnerabilidades internas, lo cual exige, a su vez, contar con las herramientas necesarias y también con un equipo humano competente. La voluntad, por importante

que sea, debe ir acompañada de unas determinadas destrezas. La capacidad de reacción inmediata, que exige la integración del trabajo en equipo, la competencia y buena disposición, minimiza daños futuros. No obstante, lo primero que se desprende del análisis de cómo reaccionan las empresas ante un hackeo es la falta de una respuesta rápida. Queda por saber si es deliberada o no. En todo caso, demuestra las dificultades que entrañan tanto la incapacidad para identificar rápidamente la intromisión como la no transmisión de información al cliente. Uno de los lectores de un borrador anterior comentó ambos problemas (las dificultades y la información al cliente) y manifestó lo siguiente:



En la actualidad nos enfrentamos a amenazas de piratas informáticos decididos y con talento, muy capaces y motivados y que cuentan con el tiempo y el apoyo de Estados nación para ejercer su oficio (el hackeo) contra un blanco determinado. Sí, puede haber dado la impresión de que algunas empresas no se tomaban este asunto con seriedad, pero ello se debe en parte a cómo se dan las noticias. En las noticias no se habla de cómo una empresa gestiona sus cambios internos, sus problemas de vulnerabilidad o sus recursos (los equipos informáticos físicos y los programas) o los procesos de seguridad en las TI, por ejemplo [...] estas entidades constituyen unidades separadas o compartimentalizadas que deben unirse para responder a un hackeo. Además, tras algunos hackeos recientes, los responsables de la amenaza ocultan sus actividades para evitar ser detectados. Se adelantan a cualquier sistema que alerte de su actividad; superan con creces la protección antivirus porque simulan ser un usuario normal de la red, de modo que a veces pasan desapercibidos para la protección antivirus.

En cuanto a informar o no a un cliente mientras la investigación está en curso es un arma de doble filo. Hasta que se determine el alcance del peligro, informar a los clientes puede entorpecer la investigación; en especial, si quieres ver si el pirata informático todavía está activo en el sistema, que es una manera de atraparlo. Además, la empresa debe determinar antes hasta qué punto se han visto expuestos sus clientes. Como hemos visto con Equifax (que sufrió una violación de datos en 2017), tuvo que informar al público una y otra vez con más detalles sobre el hackeo.¹⁸

En cuanto a los requisitos normativos sobre el sector financiero, en la actualidad se está decidiendo cuánto se puede esperar antes de informar al público de un hackeo y si se «debería» notificar a los clientes antes que a la prensa o la población. Las consecuencias son significativas: prolongación de la vulnerabilidad; prolongación de la amenaza contra los clientes; responsabilidad civil potencial en el contexto de una protección insuficiente de la información o la privacidad del cliente, y responsabilidad por no notificar al cliente de la vulneración y de sus consecuencias.

Pese a que es comprensible que la atención se centre en las posibles demandas judiciales, las cuestiones más importantes radican en las omisiones de protección y de información por razones claras:

- Los clientes potenciales serán reticentes a «hacer negocios con nosotros» cuando descubran la omisión de proteger o de informar.
- Los clientes existentes podrían irse a la competencia si llegan a la conclusión de que no se tomaron todas las medidas razonables para proteger su intimidad.
- La población en general tendrá una mala imagen de la empresa en cuanto a su incapacidad para eliminar los ciberataques y minimizar los ciberriesgos, aunque su crítica más potente será la relativa a la *omisión de la verdad*.



Por lo tanto, ¿qué significa esto para las empresas? Siendo escuetos, deben ser mucho más transparentes. En mi opinión, reconocer públicamente que ha sufrido un hackeo tiene beneficios claros para una empresa. Aunque justo después de notificar el ataque, el público se mostrará preocupado, la reacción más a largo plazo será de aprecio por haber «dicho la verdad».

Además, la información sobre cómo se produjeron la violación o intromisión podría evitar vulneraciones futuras a otras compañías. Este cambio de comportamiento puede tener un efecto considerable y positivo en millones de consumidores.

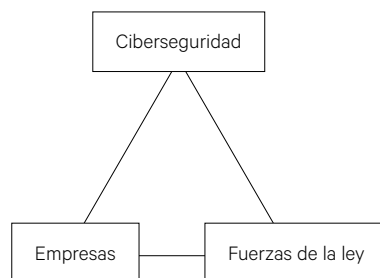
Revelar la verdad debe incluir los pasos siguientes:¹⁹

- Admisión de la intromisión.
- Una lista de medidas tomadas para afrontar de inmediato la intromisión con vistas a proteger a los clientes.
- Una lista de medidas para proteger a los clientes en un futuro.
- Contactar con otras empresas en el marco del «intercambio de información».
- Aplicación de contramedidas cibernéticas agresivas.

Este enfoque «abierto» entraña riesgos. Sin embargo, desde una perspectiva de coste-beneficio, las ventajas acaban por imponerse a las desventajas. Pese a que la transparencia y la sinceridad traen consigo vulnerabilidad, un enfoque que ponga el acento en la aplicación de medidas para evitar ataques futuros combinado con la sinceridad refleja: (1) una mayor protección de los clientes; (2) una mayor protección de las infraestructuras críticas, y (3) una mayor protección del «interés general».

La mayoría de las empresas son muy reticentes a dar un paso adelante y reconocer que han sufrido un hackeo. En ese sentido, no son francas con sus clientes, sus accionistas o las fuerzas del orden público

Mitigar riesgos mediante la sinceridad y la proactividad es beneficioso en todos los sentidos. Desde una perspectiva jurídica (porque minimiza el impacto potencial de las demandas civiles), una política de transparencia basada en el mensaje de «tomamos medidas para minimizar la exposición de la información personal, aprendemos de ello y trabajamos en estrecha colaboración con los clientes», reducirá la probabilidad de demandas judiciales contra las empresas. Un enfoque de este tipo transmite una voluntad por parte de la empresa de llegar a públicos diferentes; en particular a los clientes y a las autoridades policiales.





Para que las autoridades policiales puedan proteger a las empresas con eficacia es necesario un cambio fundamental en el contexto y el concepto de la cooperación. Una mayor eficacia policial en la protección de las empresas requerirá que estas sean más transparentes con los cuerpos policiales.

Sin embargo, un lector planteó la advertencia siguiente:

¿Cree que hay en los «cuerpos policiales» talento necesario en materia de cibernética para descubrir vulnerabilidades y cómo solucionarlas? ¿Cuáles podrían hacerlo? ¿Los locales, los estatales o los federales? Cuando la policía interviene se plantean los siguientes problemas: A la policía le interesa, sobre todo, encontrar al responsable del hackeo, mientras que la empresa quiere retomar su actividad empresarial; son prioridades contrapuestas. Una de las razones por las que no se alerta de inmediato a las autoridades es que la empresa quiere hacer su trabajo sin la distracción de la intervención policial supone. Por otra parte, que sean policías no garantiza que dispongan del talento necesario en materia de ciberseguridad. Además, dependiendo de la empresa de que se trate, podría tener que interrumpir su actividad y sus servicios mientras dura la investigación.²⁰

La cooperación ayudará a las fuerzas de la ley a comprender dónde se produjo el hackeo y dónde radicaba la vulnerabilidad de la empresa, además de contribuir a solucionarla. Sin embargo, para ello es necesario que las empresas sean mucho más transparentes. En este sentido, la pelota está en su tejado. La falta de una colaboración estrecha con los cuerpos policiales impide el desarrollo y, todavía peor, la aplicación de un modelo avanzado de cooperación entre el mundo empresarial y la policía. Y dadas las consecuencias de un ciberataque para la vulnerabilidad para las personas, urge adoptar enfoques diferentes de los actuales en lo referido a la aplicación de la ley.²¹

La cooperación ayudará a las fuerzas de la ley a comprender dónde se produjo el hackeo y dónde radicaba la vulnerabilidad de la empresa, además de contribuir a solucionarla

No obstante, la puesta en práctica de estos nuevos enfoques depende de la disposición de las compañías a considerar a los cuerpos policiales como colaboradores de pleno derecho, tanto en el plano preventivo como en el reactivo. A tal efecto, es necesario un modelo de gobernanza corporativa de la seguridad, todavía pendiente, cuyo desarrollo corresponde a las compañías mismas. Por otra parte, las autoridades policiales han manifestado repetidamente su disposición a colaborar en el desarrollo y la aplicación de dicho modelo, que pondría el acento en:²²

- Identificar las amenazas.
- Minimizar las vulnerabilidades.
- Establecer prioridades en los recursos.
- Efectuar análisis coste-beneficio.
- Proteger los activos.
- Comprender mejor los puntos de vulnerabilidad.
- Minimizar el impacto de los ataques futuros.



El ex consejero delegado de Equifax, Richard Smith, se prepara para declarar ante el Comité de Bancos, Vivienda y Asuntos Urbanos del Senado de Estados Unidos el 4 de octubre de 2017. Smith dimitió tras hacerse público que unos piratas informáticos habían atacado la firma de solvencia crediticia y se habían llevado información sobre casi 145 millones de estadounidenses

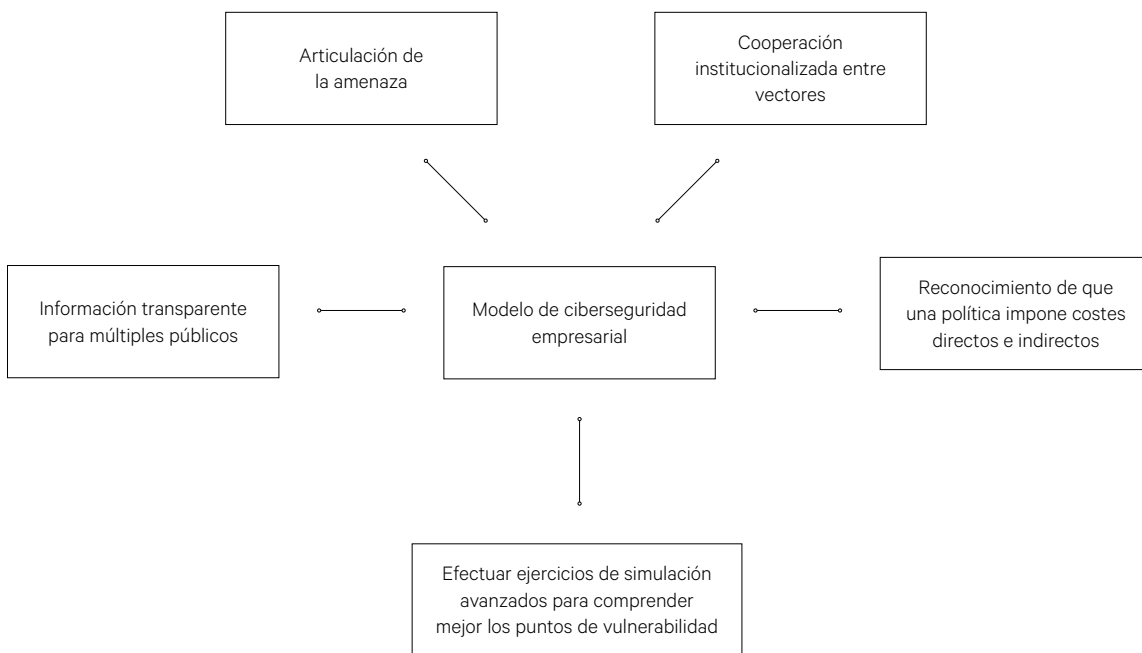


Por consiguiente, ¿qué deben hacer las empresas?

Los líderes corporativos pueden reunirse y debatir sin fin sobre sus puntos débiles, pero el mecanismo más eficaz para entender de verdad estos puntos es realizar ejercicios de simulación, ya sea interno o con expertos.

Recomiendo encarecidamente que los cuerpos policiales tengan un sitio en la mesa de reuniones con las corporaciones y otros representantes públicos. De lo contrario, el ejercicio se quedará en una mera cámara de resonancia, en gran medida ineficaz a la hora de concebir y aplicar una política de ciberseguridad. Soy muy consciente de que, para muchos dirigentes del mundo empresarial, la idea de una cooperación institucionalizada con los cuerpos policiales, las entidades del gobierno y otras compañías o competidores es alarmante²³ y lo respeto.

Sin embargo, dados el coste, el impacto y la perversión de los piratas informáticos, no atisbo otra alternativa que reformar el modelo de ciberseguridad empresarial.



A continuación planteo las preguntas a considerar para comprender la naturaleza y el alcance de la cooperación:²⁴

- ¿Las empresas deben ser responsables de su propia ciberseguridad?
- ¿El gobierno debe obligar a las empresas a tener una política de ciberseguridad?
- ¿Se debería exigir a las empresas que compartan la información de ciberseguridad relevante con otras empresas, incluidas sus competidoras?
- ¿Se debería exigir a las empresas que informen a los cuerpos policiales cuando sufran un ataque?
- ¿Tienen las empresas el deber de informar a sus accionistas de un ciberataque?

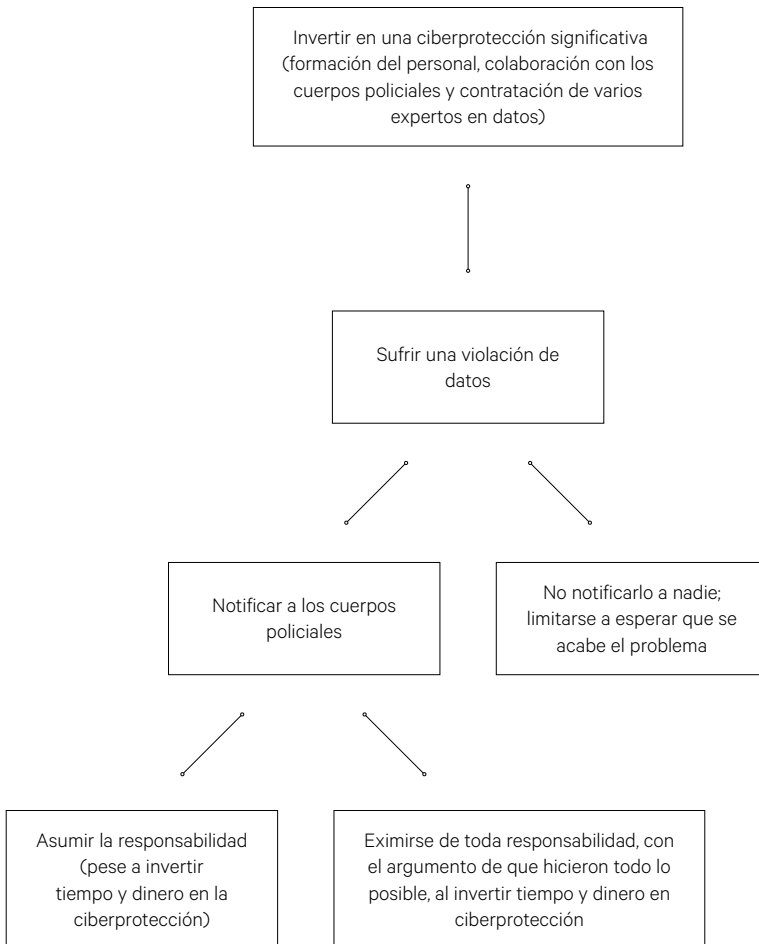


Como ilustran los apartados anteriores, la cooperación no se puede «dar por supuesta», ni mucho menos. Sin embargo, descartarla de entrada sería demasiado fácil. El reto radica en crear modelos factibles y funcionales que generen un equilibrio adecuado; que protejan a las distintas partes interesadas sin causar un daño económico involuntario a una entidad que coopere. En otros términos: a la hora de determinar el alcance de la cooperación, el desafío consiste en convencer a las empresas de que la colaboración (con clientes, cuerpos policiales y competidores) es beneficiosa, tanto táctica como estratégicamente.

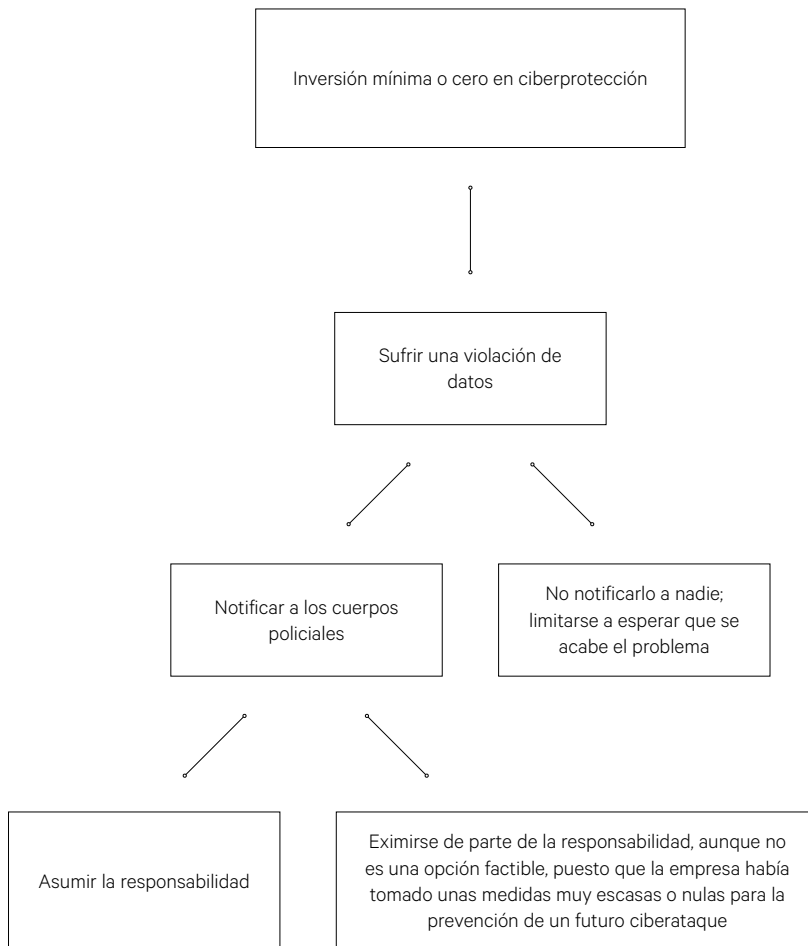
Las ventajas tácticas representan un beneficio a corto plazo, mientras que las estratégicas lo hacen a largo. No tienen por qué ir unidas; de hecho, pueden ser mutuamente excluyentes. En todo caso, al considerar la adopción de un modelo de cooperación, el dilema se puede plantear como un experimento intelectual sobre coste-beneficio.

Para avanzar es fundamental considerar cuatro tipos distintos de empresa: los dos gráficos siguientes tienen el objetivo de ilustrar la relación de las empresas con la cooperación.

**Vulneración de datos en una empresa
(empresa con una protección significativa)**



**Violación de datos en una empresa
(empresa sin una protección significativa)**



Empresa A La empresa A asume una gran responsabilidad por la cantidad de información a la que tiene acceso. Por consiguiente ha invertido una cantidad significativa de tiempo y dinero en ciberprotección. Colabora estrechamente con los cuerpos policiales, proporciona la formación correspondiente al personal y recurre a expertos en datos para protegerse de un ciberataque.

Ahora, pese a sus denodados esfuerzos, la empresa A ha sido hackeada. De un modo similar a Target o eBay (que sufrieron violaciones de datos en 2013 y 2014, respectivamente), más de cien millones de clientes se han visto afectados por esta intromisión. Se plantean, pues, las preguntas siguientes: ¿qué hacer a continuación?; ¿quién es el responsable del ataque? Sin embargo, como la empresa A tomó medidas considerables para protegerse de un ciberataque, la pregunta pasa a ser la siguiente: ¿la compensación o castigo deberían ser distintos porque la corporación tomó medidas para evitar el incidente?



Sea como fuere, lo primero que debe ocurrir cuando una empresa sufre un ciberataque es que se notifique a las fuerzas policiales. Pese a que las empresas quizá no querrán informar a las autoridades por miedo a las repercusiones o a la pérdida de confianza entre los clientes, hacerlo debe ser una obligación legal. Sin notificación a los cuerpos policiales, estos no podrán deducir patrones o algoritmos que puedan evitar futuros ataques.

El siguiente aspecto a tomar en consideración es si la empresa A está eximida de responsabilidad porque tomó las precauciones necesarias; sufrió un ciberataque, pero no fue por su culpa. Es una cuestión difícil de dirimir y que no tendrá una respuesta definitiva hasta que se promulgue la legislación correspondiente.

Empresa B La empresa B, como la A, es una de las mayores corporaciones de Estados Unidos. Como tal, asume una gran responsabilidad por la cantidad de información a la que tiene acceso. Sin embargo, la corporación B no ha invertido en ciberprotección una cantidad significativa ni de tiempo ni de dinero. Por el contrario, su consejo de administración, consciente de las amenazas contra la ciberseguridad, votó a favor de suspender cualquier inversión económica o de personal en medidas de ciberprotección, dado que son caras y la corporación tiene el objetivo de ganar dinero. Este problema es el máximo exponente del debate entre la protección y los beneficios.

Imaginemos ahora que la corporación B ha sufrido un hackeo.

De una manera parecida los casos de Target o eBay, más de cien millones de clientes se han visto afectados. Como en el caso A, se plantean, pues, las preguntas siguientes: ¿qué hacer a continuación?; ¿quién es el responsable del ataque? Como se ha dicho, el gobierno de Estados Unidos podría decidir asumir la responsabilidad de intervenir cuando el problema implique a empresas de una cierta magnitud, y lo ha hecho en el pasado.

Los cuerpos policiales han de estar en las reuniones de corporaciones y representantes públicos. De lo contrario, el ejercicio se quedará en una cámara de resonancia, en gran medida ineficaz a la hora de concebir y aplicar una política de ciberseguridad

Sin embargo, como la corporación B no tomó medidas considerables para protegerse de un ciberataque, que finalmente se produjo, la pregunta pasa a ser la siguiente: ¿la compensación o castigo deberían ser mayores porque la corporación no tomó medidas? Una vez más, lo primero que debe hacer una empresa cuando sufre un ciberataque es notificarlo a los cuerpos policiales. La mayoría deciden no hacerlo, ya sea por miedo a la pérdida de confianza entre los accionistas, a la percepción de los accionistas o a otras repercusiones. No obstante, la notificación debe ser una obligación legal. El paso siguiente es determinar si la corporación B tiene una mayor responsabilidad a causa de su negligencia.

A diferencia de la corporación A, no puede ser eximida de responsabilidad, puesto que no tomó las precauciones necesarias. Pese a que es probable que el director de inteligencia u otros empleados de la corporación recomendaran lo contrario, la corporación B eligió los beneficios en detrimento de la protección y se convirtió en un blanco fácil. Cabe entonces preguntarse si la negligencia debería repercutir en la compensación o protección posterior al ataque. Es una cuestión que deberá dirimir la legislación por venir.



Empresa C La empresa C, a diferencia de A y B, es una de las más pequeñas de Estados Unidos; es un negocio de ciudad pequeña, controlado con mano firme por algunos miembros de una familia. En consecuencia, asume una responsabilidad notablemente inferior, puesto que tiene acceso a mucha menos información.

Sin embargo, al igual que la empresa A, la empresa C ha invertido una cantidad significativa de tiempo y dinero en ciberprotección. Asimismo, colabora estrechamente con los cuerpos policiales, proporciona al personal la formación correspondiente y recurre a expertos en datos para protegerse de un ciberataque.

Pese a los denodados esfuerzos de la empresa C, ha sufrido un hackeo, pero, al contrario que A y B, dicha violación no afecta a más de cien millones de clientes, ni mucho menos: solo a 5.000 personas. De nuevo, se plantean las preguntas siguientes: ¿qué hacer a continuación?; ¿quién es el responsable del ataque? Cabe suponer, sin miedo a equivocarse, que el gobierno de Estados Unidos sería menos proclive a intervenir cuando la violación es tan reducida que ante las crisis de las corporaciones A y B.

Con todo, se nos plantea la pregunta siguiente: dado que la empresa C tomó medidas considerables para protegerse de un ciberataque, aunque no pudo evitarlo, ¿tendría que recibir algún tipo de compensación o de apoyo? ¿Dicho apoyo tendría que ser superior al asignado a una empresa que no hubiera tomado medidas de protección ante un ciberataque?

La empresa C, pese a su pequeño tamaño en comparación a las A y B, debe estar sujeta también a la obligación legal de informar a los cuerpos policiales de que han sufrido un ciberataque. La pregunta siguiente es si la empresa C debe ser eximida de responsabilidad por tomar las precauciones necesarias y haber sido víctima de un ciberataque pese a no haber cometido falta alguna.

Empresa D La empresa D, al igual que C y a diferencia de A y B, es una de las más pequeñas de Estados Unidos, al tratarse de un negocio de ciudad pequeña, controlado con mano firme por algunos miembros de una familia. En consecuencia, asume una responsabilidad notablemente inferior puesto que tiene acceso a mucha menos información. Sin embargo, como B, la empresa D no ha invertido una cantidad significativa de tiempo ni dinero en la ciberprotección.

En su lugar, decidió suspender cualquier inversión económica o de personal en medidas de ciberprotección porque son caras y está centrada en ganar dinero. Este problema, como quedó patente con el caso de la corporación B, es el máximo exponente del debate entre protección y beneficios.

A causa de su falta de inversión en ciberseguridad, la empresa D ha sido objeto de un hackeo. Sin embargo, a diferencia de los casos de las corporaciones A y B, esta violación no afecta a más de cien millones de clientes, solo a 5.000 personas. El razonamiento y los factores a tener en cuenta son muy similares a los expuestos en el caso de la corporación C. Se nos siguen planteando, pues, las preguntas siguientes: ¿qué hacer a continuación?; ¿quién es el responsable del ataque?

Podemos afirmar, sin miedo a equivocarnos, que es menos probable que el gobierno de Estados Unidos intervenga, puesto que, en comparación con los hackeos de las corporaciones A y B, el impacto es mínimo. No obstante, habida cuenta de que la empresa D no tomó medidas significativas para protegerse de un ciberataque, que al final sufrió, ¿la compensación o castigo deberían ser menores o mayores?

La empresa D, pese a su pequeño tamaño comparada con las corporaciones A y B, debe tener también la obligación legal de informar del ciberataque. A continuación debemos reflexionar sobre su responsabilidad: A diferencia de las corporaciones A y C, no hay justificación para eximirla de responsabilidad, porque no adoptó las precauciones necesarias.



Pese a que es probable que el director de inteligencia u otros empleados de la corporación recomendaran lo contrario, la empresa D eligió los beneficios en detrimento de la protección y se convirtió en un blanco fácil. Cabe entonces preguntarse si la negligencia debería repercutir en la compensación o protección posterior al ataque. Es una cuestión que deberá dirimir la legislación por venir.

El bueno, el feo y el malo de la cooperación

Es más fácil de decir que de hacer.

Esta máxima tan repetida se aplica al modelo corporativo en que se basa el presente ensayo. Una empresa no está exenta de costes. En este sentido, existe una preocupación comprensible por la vulnerabilidad, la exposición y los riesgos injustificados, quizá acompañados por unas ventajas mínimas.

La concisión del CEO citado en el apartado 3 hablaba por sí sola: para él, colaborar no era una opción. Otros líderes corporativos me habían manifestado esta misma actitud, pero, para mi sorpresa, era el mismo mensaje de los agentes policiales federales cuando les pregunté si colaborarían con sus homólogos locales. La respuesta fue tajante y embarazosa: «No cooperamos con los cuerpos policiales locales». Esta respuesta breve y rotunda era embarazosa porque iba dirigida a autoridades policiales locales presentes en la reunión. Sin embargo, pese a lo escueto del mensaje, ponía de manifiesto una cuestión tan vital como preocupante: que los cuerpos policiales cooperan poco entre sí y mucho menos con entidades externas.

Esta salida me pareció en su momento —y aún me lo parece— un signo de arrogancia cortoplacista que antepone «proteger el territorio propio» al bien común. En una reunión reciente con agentes policiales federales me aseguraron que una respuesta así sería acogida con gran desagrado por los altos mandos. Eso espero.

Más allá de las garantías que den las autoridades, es importante que la cooperación entre agentes locales, estatales y federales se institucionalice y no se deje al capricho y la voluntad de los policías implicados. Dicha institucionalización contribuiría al interés público y el bien común, velar por ellos constituye la principal obligación de los cuerpos policiales. Sin embargo, institucionalizar la cooperación entre las diversas partes interesadas requiere tiempo, dedicación y recursos. Asimismo, la puesta en marcha inmediata de protocolos que faciliten la cooperación no está exenta de problemas cuando están representadas diferentes culturas, normas y costumbres. Requerirá de un esfuerzo concertado.

Para implantar la cooperación hay que asignar recursos, encontrar un lenguaje común, identificar objetivos comunes y mitigar problemas tan comprensibles como las reticencias, las vacilaciones y el escepticismo. Ello exige un esfuerzo dedicado de todos los implicados, que centre su motivación en el bien general y no en los costes y cargas temporales. En caso contrario, el proyecto no llegará a buen puerto.

Por otra parte, los aspectos positivos de la cooperación compensan con creces los conflictos y tensiones, como se hace patente en términos de seguridad pública. Francamente, esta debe ser la consideración más importante al sopesar la adopción de un modelo de cooperación.

Reflexiones finales

El tema de la cooperación ha constituido el punto central del presente ensayo; y no es casualidad.



Antiguo centro de vigilancia de la organización de la Agencia de Seguridad Nacional estadounidense (NSA) en Bad Aibling, al sur de Múnich. Las revelaciones sobre programas de vigilancia masiva de la NSA hechas por Edward Snowden en junio de 2013 pusieron en jaque las relaciones diplomáticas entre Estados Unidos y sus socios europeos





Fui asesor legal en un grupo de trabajo del Congreso de Estados Unidos reunido bajo los auspicios del Comité de Seguridad Interior de la Cámara de Representantes, dedicado a la política de seguridad interior de Estados Unidos. Para mí, el principio de cooperación debía prevalecer en el desarrollo e implementación de un sistema eficaz de contramedidas de seguridad cibernética. La argumentación del presente ensayo quiere ayudar al lector a comprender la necesidad de desarrollar la cooperación institucionalizada y, al mismo tiempo, reconocer las dificultades que entraña un empeño de este tipo.

Las razones son diversas: las hay de índole financiera, como en el caso de las empresas; otras derivan del empeño por defender el «territorio» y el presupuesto propios, como me explicaron unos agentes de policía. En todo caso, las consecuencias son fáciles de predecir. El beneficiario de una falta sistemática de cooperación es el malhechor y el perjudicado, sus numerosas víctimas. Dicha falta de cooperación fue un tema recurrente durante la redacción de mi libro y se repitió durante el ejercicio de simulación. En los tres ámbitos (el Congreso de Estados Unidos, la investigación para el libro y la simulación), la actitud de las personas con las que estuve en contacto respecto a la cooperación, ya fuera de tipo proactivo o reactivo fue idéntica: no encajaba en su «modelo». Fue un mantra repetido numerosas veces.

Esto contrasta de manera frontal con una reunión que tuve en Israel con un importante ciberexperto. La conversación fue muy reveladora y arrojó mucha luz sobre la intersección entre la seguridad nacional y la ciberseguridad. Y, lo que es más importante, dejó claro el papel clave que el gobierno puede y debe desempeñar frente a las ciberamenazas. La conversación se centró en cuestiones legales y regulatorias; los aspectos técnicos, pese a su indudable importancia, no tuvieron un papel destacado. Lo que más me admiró, por lo que respecta a la cooperación, es el enorme beneficio derivado de la cooperación y la unión de fuerzas entre los sectores público y privado.

Con ello no quiero quitar hierro a las inevitables tensiones, rivalidades y competición entre ambos. Pero la diferencia respecto a mis conversaciones con los agentes de policía estadounidenses era evidente. Lo distinto de los enfoques era desconcertante y tenía unas consecuencias obvias. De ahí el papel central de la cooperación en mi libro *Cybersecurity: Geopolitics, Law, and Policy*.

El principio de cooperación debe prevalecer en el desarrollo e implementación de un sistema eficaz de contramedidas de seguridad cibernética

Muchos hemos sido víctimas de daños, ya sea en el ámbito personal, profesional o de social. Nuestra vulnerabilidad ante el cibercrimen está bien documentada y no es necesario reiterar la letanía de incidentes ocurridos, que van desde los meramente molestos a los catastróficos.

No hay duda de que hay grupos de individuos en todo el mundo dedicados a buscar modos de utilizar la tecnología del ciberespacio en su favor y en nuestra contra. En ciberseguridad hay, sin duda, un «nosotros» y un «ellos». Los daños causados por los cibercriminales y los ciberterroristas son notables, pero todavía deben preocuparnos más los daños futuros que, con toda seguridad, planean infligir a la sociedad.

Existe una profunda falta de consenso respecto a la intervención gubernamental. Quizá por mis antecedentes en las fuerzas de defensa de Israel, me desconcierta la vacilación que he percibido una y otra vez en Estados Unidos en este sentido. En mi opinión, los ciberataques deben considerarse similares a las agresiones físicas.



La consecuencia de ello, para mí, está clara: un ataque a una corporación estadounidense justifica una respuesta del gobierno. Ciertamente es que para ello es necesaria la cooperación antes explicada, pero las ventajas, tanto a corto como a largo plazo, compensan con creces cualquier consecuencia negativa de un «exceso» de intervención. Hay demasiado en juego como para recurrir a clichés gastados y mantras irrelevantes sobre derecho a la intimidad. Ello no equivale a infravalorar la importancia de la privacidad (las filtraciones de la NSA constituyen un perturbador recordatorio del carácter real de la intrusión gubernamental), sino a proponer que las ciberamenazas exigen un enfoque equilibrado y matizado. Descartar de entrada la intervención del gobierno resulta corto de miras y, en última instancia, contraproducente.

Hablar de la intervención del gobierno implica hablar también de autodefensa y la auto-defensa colectiva. Hoy en día son inseparables.

La autodefensa es crucial en el debate sobre el ciberespacio. Se trata de dirimir la cuestión de si los Estados nación tienen deberes para con las empresas y las personas víctimas de un ciberataque. No es un problema abstracto, sino concreto.

Imponer la responsabilidad de «responder a un ciberataque» al Estado nación comporta grandes riesgos. Solo es posible si se adopta un modelo cooperativo. Si, por el contrario, todos los objetivos potenciales irreales de un ciberataque se «estancan» en un paradigma de no colaboración, solo salen ganando, sin duda alguna, las fuerzas del mal.

En cualquier caso, los sectores privado y público han presentado una oposición tan intensa y sistemática a la cooperación que en algún momento tendrán que parar. Esta oposición, sin duda acompañada de escepticismo, es legítima y no se puede desestimar, por mucho que nos pese.

Porque, pese a todo, la amenaza continuada que plantean los ciberataques potenciales, por no hablar del impacto real de un ataque exitoso, justifican el examen detenido de cualquier propuesta de imponer legalmente unos requisitos y obligaciones de cooperación. La cooperación entre las diferentes partes implicadas que propone este ensayo podría minimizar las consecuencias de un ataque determinado.

Y, en el peor de los casos, la cooperación contendría las consecuencias de un ataque, al dar la posibilidad a otras entidades afectadas (sí, las de la competencia) de aplicar medidas proactivas de protección y al garantizar la implicación plena de cuerpos policiales nacionales y locales en la atenuación de los daños colaterales.

Existen diversos mecanismos para determinar la viabilidad de una iniciativa de este tipo. Como me dejaron claro en el ejercicio de simulación, la comunicación y el diálogo son un excelente punto de partida. Reunir a las partes interesadas, analizar cómo responder y, con suerte, minimizar los daños colaterales de un ataque es un paso importante. Es recomendable que un ejercicio de este tipo incluya a un amplio abanico de participantes, como parlamentarios, miembros de los cuerpos de policía (local, estatal y nacional), directivos (de empresas pequeñas y grandes, que cotizan o no en los mercados de valores), funcionarios o cargos municipales, representantes de grupos de defensores del consumidor y miembros de la población general.

Una iniciativa de este tipo permitirá a la comunidad (tanto en un sentido restringido como amplio) determinar cuál es el mejor mecanismo para garantizar la cooperación frente a un ciberataque.

Es un debate que debemos entablar. Posponer el análisis de los modelos de cooperación no está exento de costes; al contrario, supone costes importantes. Las medidas existentes representan una plataforma eficaz como punto de partida, pero el desafío es grande y debemos abordarlo ya.

Agradecimientos

Debo expresar mi profundo agradecimiento a las personas siguientes, que tuvieron la amabilidad de leer los borradores previos y hacer perspicaces comentarios y sugerencias que han mejorado notablemente el producto final (huelga decir que todos los errores y omisiones son responsabilidad mía): Anne-Marie Cotton, profesora titular en Gestión de la Comunicación, Universidad de Artevelde, Gante (Bélgica); Jessie Dyer, doctoranda (obtención del título de doctora previsto para 2019), S. J. Quinney College of Law, Universidad de Utah; Brent Grover, presidente, Brent Grover & Co.; profesor Daniel Shoemaker, catedrático en la Universidad de Detroit Mercy, y Judy A. Towers, directora de Inteligencia ante Ciberamenazas, SunTrust Bank.

Notas

1. El lector de un borrador anterior indicó que esta afirmación es aplicable al 99% de los directivos corporativos con los que ha tratado.
2. Guiora, Amos N. (2017): *Cybersecurity: Geopolitics, Law, and Policy*, Londres, Routledge.
3. Debido a las normas «Chatham House», no se puede tomar nota de la identidad de los participantes ni de sus comentarios; el ejercicio estuvo auspiciado por la organización National Cyber Partnership.
4. Para un análisis concienzudo del contrato social, ver <https://www.iep.utm.edu/soc-cont/>
5. <https://www.investopedia.com/terms/s/sarbanesoxleyact.asp>
6. <https://www.cisecurity.org/newsletter/cybersecurity-information-sharing-act-of-2015/>
7. <https://www.cisecurity.org/newsletter/cybersecurity-information-sharing-act-of-2015/>
8. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/network-and-information-security-nis-directive>
9. <https://www.us-cert.gov/ais>
10. Problemas nacionales: no solo el robo de identidad, también de propiedades, como ilustra este anuncio: https://www.youtube.com/watch?v=_CQA3X-qNgA
11. Un lector de un borrador anterior señaló que: «Muchos dirían que la ciberseguridad no es más que gestión de riesgos» correo electrónico, archivos del autor.
12. Como ilustra este anuncio de una agencia belga: <https://www.youtube.com/watch?v=jop215u2F3U>
13. <http://www.un.org/en/sections/un-charter/chapter-viii/>
14. https://www.nato.int/cps/ic/natohq/official_texts_17120.htm
15. Un lector de un borrador anterior planteó los comentarios y preguntas siguientes: ¿De acuerdo con qué pruebas? ¿Qué hay del impacto negativo en la reputación? ¿Pérdida de confianza? Son intangibles, frente a las cifras económicas de rediseñar los «cortafuegos» [...]. Sin embargo, el valor de marca también se ha convertido en un elemento importante.
16. Un lector de un borrador anterior señaló que: «[...] desarrollado maravillosamente por Andrew Ehrenberg (London School of Economics) en su teoría de la doble penalización aplicada a la dicotomía entre empresas grandes y pequeñas. Las empresas de pequeño tamaño son dos veces «víctimas» de su tamaño: aunque las pequeñas inviertan, las grandes invierten más, de modo que, en proporción, las primeras tienen que invertir X más que las segundas para obtener un resultado inferior [...]».
17. De acuerdo con las normas «Chatham House».
18. Intercambio de correos electrónicos con un lector; correo electrónico, archivo del autor.
19. Véanse los artículos de Finn Frandsen, Timothy Coombs, Robert Heath y Winni Johansen sobre este tema; por ejemplo, «Why a concern for apology and crisis communication?». Frandsen y Johansen acaban de publicar sus últimas propuestas teóricas en: *Organizational Crisis Communication: A Multivocal Approach*.
20. Intercambio de correos electrónicos con un lector; correo electrónico, archivo del autor.
21. Un lector de un borrador anterior hizo la advertencia siguiente: «Además de la sensibilización, esto también lleva mucho tiempo [...] No hemos hecho más que empezar a generar el talento [necesario], y los miembros de la policía rara vez tienen el “ancho de banda” necesario para asumir otro conjunto de competencias»; correo electrónico, archivo del autor.
22. Un lector de un borrador anterior señaló que es una buena propuesta, pero no ha visto agentes de la ley lo bastante duchos en materia empresarial como para poder poner en práctica los elementos de la lista. Ahí es donde entran los reguladores del sector, aportando conocimientos para llevar a efecto dichos elementos; no los agentes de la ley. Además, están asesorando al Departamento de Seguridad Nacional, porque están estableciendo los mismos criterios de la lista.

23. Un lector de un borrador anterior señaló que, en este momento, esto ya se está haciendo en el sector financiero; y que las empresas eran sinceras en los «porqués» de sus procesos de reparación, mientras que todos los que representamos a los reguladores o la policía estábamos esperando a que nos explicaran las cosas. Asimismo, una empresa puede tardar días en determinar que ha habido un hackeo y no solo un fallo del sistema, en especial si el autor de la amenaza ha modificado los registros del sistema y borrado su código, acciones o pasos. Hacer que parezcan problemas normales del sistema es propio de un pirata informático avezado. Esperemos que esta capacidad no sea fácil de adquirir para cualquier pirata informático «corriente y moliente».
24. Un lector de un borrador anterior señaló que estas preguntas ahora las responden los reguladores del sector. A saber, el Estado de Nueva York estableció estos requisitos para cualquier empresa cuya razón social estuviera en este estado antes del final de 2018; el Estado empezará a auditar estas empresas para garantizar que se ha trabajado en la ciberseguridad. Una vez más, no debemos olvidar qué ocurre cuando las empresas trabajan solo para cumplir unos requisitos básicos. Si los criterios a cumplir no se actualizan, una empresa puede cumplirlos y satisfacer a los reguladores pese a no ser cibersegura. La mayoría de las empresas que han sido hackeadas hoy cumplen los criterios del regulador, pero el regulador ya no está al día. Es un escenario con umbrales evolutivos: las empresas cumplirán solo con el mínimo requerido, porque ir más allá cuesta dinero.

Edición

BBVA

Dirección del proyecto y coordinación

Adjunto al Presidente, BBVA

Textos

Michelle Baddeley

Joanna J. Bryson

Nancy H. Chau

Barry Eichengreen

Francisco González

Amos N. Guiora

Peter Kalmus

Ravi Kanbur

Ramón López de Mántaras

María Martín-Torres

José M. Mato

Diana Owen

Alex Pentland

Carlo Ratti

Martin Rees

Victoria Robinson

Daniela Rus

José Manuel Sánchez Ron

Vivien A. Schmidt

Samuel H. Sternberg

Sandip Tiwari

Yang Xu

Ernesto Zedillo Ponce de León

Edición y producción

Turner

Coordinación editorial y edición gráfica

Nuria Martínez Deaño

Diseño gráfico y maquetación

underbau

Traducción

Yolanda Bravo Vergel

Jesús Cuéllar Menezo

José Ventura López

Laura Vidal

Corrección de textos

Gloria Díaz Llorente

Impresión

Artes Gráficas Palermo

Encuadernación

Ramos

Composición digital

Comando g

Imágenes

Daniel Acker/Bloomberg via Getty Images: p. 248;

Jason Alden/Bloomberg via Getty Images: p. 457;

AMA/Corbis via Getty Images: p. 346 (imagen superior);

American Cancer Society/Getty Images: p. 212;

Christopher Anderson/Magnum Photos: p. 406 (imagen superior);

Marco Ansaloni/SCIENCE PHOTO LIBRARY: p. 86 (imagen superior);

Francisco Asencio: p. 107; Patrick Aventurier/

Getty Images: p. 228; Gonzalo Azumendi/Getty

Images: p. 95; Matthias Balk/Picture Alliance via

Getty Images: p. 198; Joseph Barrak/AFP/Getty

Images: p. 446 (imagen superior); Juan Barreto

/AFP/Getty Images: p. 303; BBVA: p. 31; Jonas

Bendiksen/Magnum Photos: pp. 428 (imagen

inferior) y 430; Noah Berger/AFP/Getty Images:

p. 379; Kena Betancur/AFP/Getty Images: p. 322;

Jabin Botsford/The Washington Post via Getty

Images: p. 382 (imagen superior); Brill/ullstein

bild via Getty Images: pp. 220 (imagen inferior)

y 222; James Brittain/View Pictures/UIG via

Getty Images: p. 136; Frederic J. Brown/AFP/

Getty Images: p. 413; Michael Christopher Brown/

Magnum Photos: pp. 446 (imagen inferior) y 448;

SIP/UIG via Getty Images: p. 227; Martin Bureau/

AFP/Getty Images: p. 12 (imagen superior); Andrew

Burton/Getty Images: p. 401; José Calvo/SCIENCE

PHOTO LIBRARY: p. 211; John B. Carnett/Bonnier

Corporation via Getty Images: p. 193; CERN,

2017-2018: pp. 56 (imagen inferior) y 58; CERN,

2005-2018: p. 62; CERN, 2008, a beneficio de

CMS Collaboration/Fotografía de Michael Hoch

y Maximilien Brice: pp. 66-67; Creapole/Alex

Pentland: p. 107; Pigi Cipelli/Archivio Pigi Cipelli/

Mondadori Portfolio via Getty Images: pp. 126

(imagen inferior) y 128; Khaled Desouki/AFP/

Getty Images: p. 428 (imagen superior); Al Drago/

Bloomberg via Getty Images: p. 288 (imagen

superior); Patrick T. Fallon/Bloomberg via Getty

Images: p. 220 (imagen superior); Gregor Fischer/

Picture Alliance via Getty Images: p. 253; J. Emilio

Flores/Corbis via Getty Images: pp. 288 (imagen

inferior) y 290; Frederick Florin/AFP/Getty Images:

pp. 168-169; Katherine Frey/The Washington

Post via Getty Images: p. 139; Christopher

Goodney/Bloomberg via Getty Images: pp. 346

(imagen inferior) y 348; Fritz Goro/The LIFE

Picture Collection/Getty Images: p. 126 (imagen

superior); Louisa Gouliamaki/AFP/Getty Images:

p. 332; Steve Gschmeissner/SCIENCE PHOTO

LIBRARY: p. 244; Noriko Hayashi/Bloomberg via

Getty Images: p. 361; Ann Hermes/The Christian

Science Monitor via Getty Images: p. 235; Stefan

Heunis/AFP/Getty Images: p. 439; Zakir Hossain

Chowdhury/Barcroft Media via Getty Images:

p. 364 (imagen superior); Lewis Houghton/

SCIENCE PHOTO LIBRARY: p. 229; Institute

for Stem Cell Research via Getty Images: p. 186

(imagen superior); Wolfgang Kaehler/LightRocket

via Getty Images: pp. 274-275; Michael Kappeler/

Picture Alliance via Getty Images: p. 21; Manjunath

Kiran/AFP/Getty Images: pp. 24-25; Kyodo News

via Getty Images: pp. 194-195; Wolfgang Kumm/

Picture Alliance via Getty Images: p. 216; Andrew

Lichtenstein/Corbis via Getty Images: p. 336;

Matthew Lloyd/Bloomberg via Getty Images:

p. 132; Majority World/UIG via Getty Images: p. 258

(imagen superior); Marek Mis/SCIENCE PHOTO

LIBRARY: p. 204 (imagen superior); MIT Media

Lab/Getty Images: p. 230; Jeff J. Mitchell/Getty

Images: p. 389; John Moore/Getty Images:

p. 102 (imagen superior); Eduardo Muñoz Álvarez/

Getty Images: pp. 406 (imagen inferior) y 408;

Samuel Nacar/SOPA Images/LightRocket via

Getty Images: pp. 356-357; NASA: p. 34 (imagen

superior); NASA, ESA and the Hubble sm4 ERO

Team: p. 49; NASA/Dimitri Gerondidakis: pp.

44-45; NASA/MSFC/David Higginbotham: pp. 34

(imagen inferior) y 36; NASA/JPL-Caltech/MSSS:

p. 41; NASA/SCIENCE PHOTO LIBRARY: p. 75;

Mandel Ngan/AFP/Getty Images: p. 456; Robert

Nickelsberg/Getty Images: pp. 418-419; Leonard

Ortiz/Digital First Media/Orange County Register

via Getty Images: pp. 238 (imagen inferior) y 240;

Punit Paranjpe/AFP/Getty Images: p. 370; Paolo

Pellegrin/Magnum Photos: p. 115; Gilles Peress/

Magnum Photos: pp. 12 (imagen inferior), 14,

326 (imagen inferior) y 328; Spencer Platt/Getty

Images: p. 339; Pool/ Tim Graham Picture Library/

Getty Images: p. 353; Balint Porneczii/AFP/Getty

Images: pp. 382 (imagen inferior) y 384; Sergey

Pyatakov/Sputnik/SCIENCE PHOTO LIBRARY:

p. 137; Aamir Qureshi/AFP/Getty Images: p. 310

(imagen superior); REUTERS/Iván Alvarado:

pp. 310 (imagen inferior) y 312; REUTERS/

Rebecca Cook: p. 337; REUTERS/Kevin Coombs:

p. 18; REUTERS/Jonathan Ernst: pp. 280 y 298;

REUTERS/Robert Galbraith: p. 156; REUTERS/

Kim Hong-Ji TPX: pp. 364 (imagen inferior) y

366; REUTERS/Adam Hunger: p. 374; REUTERS/

Aaron Josefczyk: p. 144; REUTERS/Kham:

p. 294; REUTERS/Adrees Latif: pp. 258 (imagen

inferior) y 260; REUTERS/Jason Lee: p. 299;

REUTERS/David Loh: pp. 86 (imagen inferior) y

88; REUTERS/Jon Nazca: pp. 318-319; REUTERS/

Thomas Peter: p. 150 (imagen superior);

REUTERS/Michaela Rehle: p. 472; REUTERS/

Joshua Roberts: p. 213; REUTERS/Pascal

Rossignol: pp. 392-393; REUTERS/Axel Schmidt:

p. 265; REUTERS/Gregory Scruggs: p. 26; REUTERS/

Tyrone Siu: p. 249; REUTERS/Shannon Stapleton:

pp. 150 (imagen inferior) y 152; Reuters/Stringer:

p. 342; REUTERS/Benoit Tessier/Pool: pp. 204

(imagen inferior) y 206; REUTERS/Paulo Whitaker:

p. 238 (imagen superior); Bertrand Rindoff Petroff/

Getty Images: p. 114; Janine Schmitz/Photothek

via Getty Images: p. 119; Roberto Schmidt/AFP/

Getty Images: p. 434; Georgy Shafeev/SCIENCE

PHOTO LIBRARY: p. 83; Luke Sharrett/Bloomberg

via Getty Images: p. 163; Qilai Shen/Bloomberg via

Getty Images: p. 283; Prakash Singh/AFP/Getty

Images: p. 423; Jeff Spicer/Getty Images: pp. 102

(imagen inferior) y 104; Melanie Stetson Freeman/

The Christian Science Monitor via Getty Images:

p. 172; Newsha Tavakolian/Magnum Photos: p. 396;

Javier Trueba/MSF/SCIENCE PHOTO LIBRARY:

p. 98; Peter Tuffy, University of Edinburg/SCIENCE

PHOTO LIBRARY: p. 56 (imagen superior); UN

Photo/Eskinder Debebe: p. 371; VCG/VCG via

Getty Images: pp. 122 y 326 (imagen superior);

Rudolf Vicek/Getty Images: p. 94; Mark Wilson/

Getty Images: p. 465; Hitoshi Yamada/NurPhoto

via Getty Images: p. 438; Beata Zawrzel/NurPhoto

via Getty Images: pp. 186 (imagen inferior) y 188.

© de la edición, BBVA, 2018

© de los textos, sus autores, 2018

© de la traducción, sus autores, 2018



ACCEDE AL LIBRO COMPLETO EN INGLÉS

- Towards A New Enlightenment? A Trascendent Decade

CÓMO CITAR ESTE LIBRO

¿Hacia una nueva ilustración? Una década trascendente. Madrid, BBVA, 2018.

TODOS LOS TÍTULOS DE LA COLECCIÓN OPENMIND

