

**GOING ONLINE  
PERSPECTIVES ON DIGITAL LEARNING**

Robert Ubell  
Routledge, 2016

## **Pedagogía en línea**

*Un análisis del viaje de la educación hacia el entorno digital*

**E**n 1993, el experto en tecnología educativa Seymour Papert señalaba que, si un profesor del siglo XIX apareciese de repente en un aula de los años noventa, se sentiría como en casa. Veinte años después, ya no podemos decir lo mismo.

Hoy numerosos profesores de gran parte del mundo desarrollado utilizan pizarras electrónicas y tabletas, así como métodos de aprendizaje centrados en el estudiante, colaborativos y basados en proyectos. Muchas universidades están adoptando el método del «aula inversa», en la que los alumnos aprenden en línea y después resuelven problemas en clase. En algunos casos incluso pueden acceder a equipo de laboratorio o telescopios distantes. Ciertas instituciones, como la Universidad de Waterloo o la neozelandesa Massey, combinan la enseñanza en la Red con la presencial. Y en los cursos en línea masivos y abiertos (MOOC, por sus siglas en inglés) estudia y participa gente de todo el mundo. [Véase el informe especial «La educación en la era digital»; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2013.]

Ese cambio incesante provoca un temor existencial en algunos docentes, que imaginan que para la próxima década los profesores serán reemplazados por programas de aprendizaje interactivo y las universidades impartirán cursos exclusivamente en la Red. Pero tales cambios también pueden suscitar entusiasmo, como el que refleja Robert Ubell en *Going online*. El libro proporciona una panorámica del fenómeno desde la Escuela de Ingeniería Tandon, de la Universidad de Nueva York, donde Ubell dirige la unidad de

educación digital. La obra comienza con la observación de que la educación universitaria tradicional ha fracasado a la hora de implicar a los estudiantes en el aprendizaje activo. Cuanto más lograda resulta una clase, por ejemplo, más puede dar la falsa impresión de que todos los alumnos han asimilado el contenido.

**El éxito de la educación digital se debe al aprendizaje basado en redes sociales, con acceso a materiales en línea, cursos abiertos de alta calidad y debates dinámicos entre compañeros**

Ubell plantea que el aprendizaje en la Red permite a los estudiantes procesar la información en el momento que mejor les conviene. Pueden participar en discusiones en línea y formular preguntas de forma anónima, sin temor a quedar en entredicho. Y todo ello exige una nueva pedagogía: nuevas maneras de enseñar y de evaluar adaptadas a las comunidades de aprendizaje activo. Los académicos deben trabajar con diseñadores web y expertos en tecnología educativa para

crear condiciones que permitan a los estudiantes controlar el ritmo y el desarrollo del aprendizaje, así como compartir sus ideas y debatir las de los otros.

Ubell está en lo cierto cuando afirma que el anonimato puede resultar útil para los alumnos más inseguros o para quienes no dominan el idioma. Pero una parte importante de la enseñanza universitaria consiste en aprender a discrepar y a debatir. En este sentido, algunas plataformas de MOOC, como FutureLearn, promueven discusiones constructivas con miles de participantes de distintos países, con el objetivo de que aporten perspectivas diversas sobre cuestiones candentes, como el cambio climático.

*Going online* muestra que hay numerosas maneras de trasladar la educación a Internet. Todas ellas requieren que las instituciones se comprometan a extender el concepto de formación, a fin de que este deje de ser una simple relación profesional entre profesor y alumnos y pase a convertirse en un proceso colectivo. Ello implica tomar decisiones sobre las plataformas de aprendizaje en línea (ya se trate de Moodle, Blackboard o Canvas), si debe usarse un proveedor de MOOC, cómo negociar los derechos de propiedad intelectual y cómo compensar a la plantilla. Al ofrecer a los alumnos actividad y autonomía, la universidad en la Red podría estar sacrificando humanidad.

La enseñanza combinada o semipresencial ha sido la solución adoptada por algunas universidades con ánimo de lucro que ofrecen instrucción en línea masiva, como la de Phoenix, en Arizona. Los alumnos estudian las asignaturas en la Red con material facilitado por diversas fuentes (entre ellas los MOOC, páginas web y simulaciones interactivas de carácter científico) y se les incita a usar las redes sociales para compartir ese conocimiento. El aula se convierte en un espacio para explorar un tema en profundidad resolviendo problemas, debatiendo y haciendo exámenes. En ciencias, los estudiantes pueden familiarizarse *in situ* con equipos de laboratorio y, después, utilizarlos de forma remota y analizar en línea los datos obtenidos. La enseñanza combinada resulta también eficaz en la capacitación de trabajadores y en la formación continua. La iniciativa de formación profesional DUAL-T, del Gobierno suizo, por ejemplo, salva la distancia entre el aula y el lugar de trabajo.

Este cambio puede parecerle incómodo a un académico que ha impartido

do clases presenciales durante toda su carrera, pero los profesores más jóvenes han crecido con la enseñanza en línea y las redes sociales. Muchos habrán usado herramientas de colaboración, como Slack, y redes sociales profesionales, como LinkedIn o Stack Exchange.

El núcleo del libro es un estudio del año 2000 realizado por Ubell y su colaborador, Hosein Fallah, que compara dos cursos de posgrado, idénticos en contenido e instructor, pero uno impartido mediante clases magistrales y el otro en línea. El número de estudiantes es reducido (siete en línea y doce presenciales) y los resultados no son concluyentes. Un ejemplo mejor lo proporciona un metaanálisis dirigido por la psicóloga educativa Barbara Means —mencionado brevemente en el libro— que analizó más de mil investigaciones empíricas. Aquel informe (*Evaluation of evidence-based practices in online learning*, Departamento de Educación de Estados Unidos,

2009) halló que, de media, la enseñanza en línea obtenía mejores resultados que la presencial, mientras que la combinada superaba a las demás.

Como afirma Ubell, las críticas a la instrucción en línea suelen dirigirse contra aquellos sistemas de enseñanza y MOOC que imparten clases «enlatadas». Pero el éxito de la educación digital se debe al aprendizaje basado en redes sociales, con acceso a materiales en línea desde cualquier parte del mundo, cursos abiertos de alta calidad y debates dinámicos entre compañeros. El aula inversa puede funcionar tanto en Nueva Delhi como en Nueva York. Requiere una perspectiva descentralizada, a fin de crear comunidades de enseñantes y alumnos que acojan con entusiasmo pedagogías y perspectivas culturales diversas. Las pioneras en este ámbito han sido universidades comprometidas con una educación abierta internacional, como la Universidad Abierta del Reino Unido, el Instituto de Tecnología de

Massachusetts, la Universidad de Athabasca, en Canadá, o la Universidad de Ciudad del Cabo. Es este el paso que mayor dificultad supone para las universidades más tradicionales.

Así como la educación moderna se está convirtiendo en una mezcla de recursos y servicios, *Going online* está compuesto a partir de artículos previamente publicados y actualizados. Tejer una narrativa coherente puede resultar problemático, pero la obra consigue captar los aspectos de un sistema educativo en transición: de uno circunscrito a los campus universitarios a uno de alcance internacional.

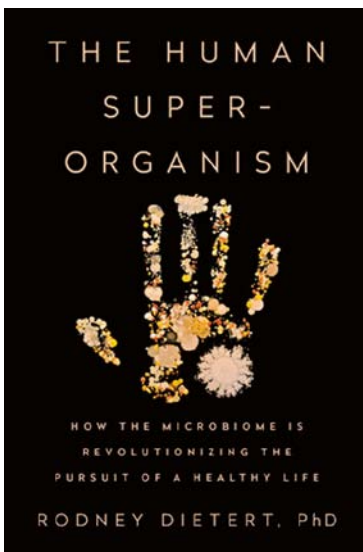
—Mike Sharples

Universidad Abierta del Reino Unido

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 540, página 340, 15 de diciembre de 2016.

Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de **nature**



**THE HUMAN SUPERORGANISM  
HOW THE MICROBIOME IS  
REVOLUTIONIZING THE PURSUIT  
OF A HEALTHY LIFE**

Rodney Dieter  
Dutton, 2016.

## Holobiontes

*Interacción huésped-microorganismo  
en el ser humano*

Cuando pensamos en el hombre tendemos a ceñirnos a células humanas y órganos. Pero existe otra dimensión: la de las comunidades microbianas asociadas a nuestro cuerpo. Según algunas estimaciones, de los 100 billones de células presentes en el cuerpo humano, el 90 por ciento son microbianas, pertenecientes a más de 10.000 especies diferentes, aunque no todas en cada sujeto. En una persona sana encontramos unas 1000 especies microbianas representantes de todos los dominios de la vida: arqueas, bacterias

y eucariotas. Además, la inmensa mayoría de los genes únicos son microbianos. En este sentido, podríamos considerarnos «holobiontes».

En el curso de los últimos veinte años hemos asistido a una revolución en la concepción del holobionte mamífero. Esa revolución exigió dos cambios de paradigma. El primero aconteció en la segunda mitad del decenio de los noventa del siglo pasado, con el descubrimiento de los receptores de reconocimiento de patrones en el sistema inmunitario inna-

to. El segundo se produjo unos diez años más tarde y vino instado por la caracterización del microbioma, el conjunto de microorganismos que colonizan el cuerpo humano, y sus correspondientes genomas [véase «El ecosistema microbiano humano», por Jennifer Ackerman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2012]. Los microorganismos que establecen relaciones mutualistas con sus huéspedes humanos influyen en multitud de funciones fisiológicas a través de la modulación del sistema inmunitario.

Las enfermedades humanas del siglo XXI presentan nuevos retos. Son crónicas y no transmisibles. Nos referimos a alergias, cáncer, cardiopatías, obesidad y trastornos psicológicos, como la depresión. Esa situación da pie al autor de *The human superorganism* para establecer un nuevo paradigma, según el cual cada uno de nosotros es un superorganismo. El nuevo modelo acaba con dos creencias fundamentales, sostenidas por el pensamiento médico hasta fecha muy reciente: el ser humano se encuentra mejor si se le limpia de microorganismos foráneos, y el genoma humano constituye la clave de los futuros avances clínicos. La pureza biológica no existe. Los microorganismos que se ha querido eliminar han vivido en el ser humano durante siglos, para sostén de nuestros antepasados.

Desde los trabajos de Robert Koch y Louis Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX, se conoce el papel de los microorganismos en las enfermedades infecciosas. Pero solo desde hace diez años se admite la parte desempeñada por comunidades complejas de microorganismos a la hora de aportar un suelo fértil para la infección y de establecer la base de enfermedades no transmisibles. En 1890, Koch presentó lo que más tarde se conocería como postulados de Koch sobre la enfermedad infecciosa. Se trata de criterios empleados para establecer las relaciones causales entre microorganismos y enfermedades. Primer postulado: siempre que aparece una enfermedad, estará también presente el microorganismo causante (bacteria, virus). Segundo: podremos siempre extraer una muestra del agente patógeno para cultivarlo en el laboratorio. Tercer criterio: hemos de poder tomar muestras del cultivo de laboratorio y transferirlas a una persona o animal sanos para producir la misma enfermedad. Cuarto: hemos de poder extraer una muestra del patógeno inoculado y que ha producido la enfermedad para demostrar que se trata del mismo microorganismo cultivado en el laboratorio.

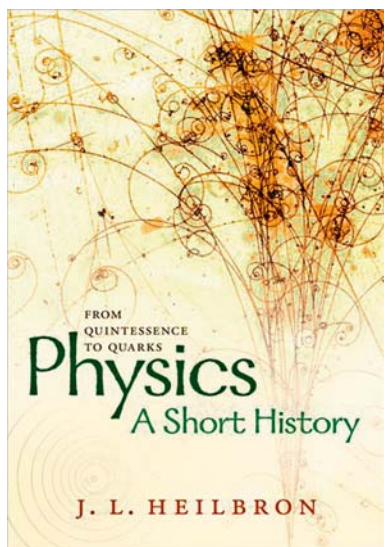
Con la aplicación de esos criterios, se observó que determinados microorganismos causaban muchas de las enfermedades letales de comienzos del siglo XX: fiebre tifoidea, cólera, tuberculosis y gripe. Se cosecharon éxitos sorprendentes al reducir la contaminación bacteriana, vírica y parasitaria. El progreso de la ciencia redujo significativamente la mortalidad infantil, alargó la esperanza de vida e impulsó la incorporación de técnicas médicas. En la nueva era de los antibióticos contra las bacterias y de las vacunas contra los virus, la penicilina cambió el curso de la Segunda Guerra Mundial. Antes, los soldados heridos morían por infecciones bacterianas. Con la administración de penicilina se evitaron gangrenas y septicemias. Si se eliminaban los patógenos y se liberaba a los humanos de esas bacterias —o, de forma alternativa, se generaba una inmunidad protectora contra algunos virus mediante vacunas— sería posible reducir la carga de enfermedades infecciosas letales.

Los antibióticos revolucionaron la medicina y fueron denominados, con razón, «balas mágicas» contra las infecciones bacterianas. Sin embargo, los antibióti-

cos tradicionales suelen matar o evitar el desarrollo de los microorganismos tanto patógenos como beneficiosos. Los antibióticos pueden alterar los rasgos taxonómicos, genómicos y funcionales de la microbiota. Sus efectos son rápidos y a menudo perdurables. Pueden reducir la diversidad de la microbiota, lo que compromete la resistencia a la colonización por bacterias patógenas foráneas.

El enfoque fundamental de la biología humana tras esos avances produjo, como efecto colateral, una serie de amenazas en el siglo XXI. Las infecciones causadas por bacterias resistentes a los antibióticos han aumentado drásticamente en años recientes, y hoy representan una causa importante de morbilidad y mortalidad. La bacteria *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina, los enterococos resistentes a la vancomicina y las bacterias Gramnegativas resistentes a la cefalosporina de tercera generación serán, sin duda, causa de muerte en los años venideros. Los microorganismos modulan la salud y la enfermedad e inciden en el desarrollo prenatal y posnatal. Conocer tales comunidades nos ayudará a evitar y tratar las enfermedades.

—Luis Alonso



**PHYSICS: A SHORT HISTORY  
FROM QUINTESSENCE TO QUARKS**

John L. Heilbron  
Oxford University Press, 2016

**La física y el futuro  
de la humanidad**

*Una historia de autor, erudita,  
amena y vertiginosa*

John Heilbron es uno de los historiadores de la ciencia más reconocidos del último medio siglo. Su extensa obra recorre las ciencias físicas y matemáticas desde la Antigüedad hasta la Guerra Fría. Discípulo de Thomas S. Kuhn, ejerció durante tres décadas la docencia en la Universidad de California en Berkeley.

Si alguien pensaba que tras retirarse a la campaña inglesa su producción iba a disminuir, se equivocaba. Heilbron ha publicado desde entonces varias obras sustanciales, como el *Oxford companion to the history of modern science* (2003) o sendas biografías de Ernest Rutherford (2002) y Galileo Galilei (2010), editadas todas ellas,

como el libro que nos ocupa, por Oxford University Press.

El título y la factura de este volumen modesto, escrito para una colección de historias breves, no previene al lector del caudal de ideas que le espera. A través de un lenguaje exuberante y preciso, ajeno al «remedo del inglés que hoy constituye el lenguaje internacional de la ciencia», Heilbron revela con ácido sentido del humor e implacable ironía la historia de una disciplina y sus maneras de contarla. «Breve» no es aquí sinónimo de simple o superficial. Heilbron escribe lo que le gustaría leer y no se disculpa por ello.

Las primeras páginas dejan claro que el significado de la física ha cambiado radicalmente a través de la historia, y que comprender tales cambios exige prestar atención a las personas que los protagonizaron y a los lugares en los que trabajaron. El argumento se desarrolla en seis capítulos ordenados cronológicamente. El primero, «Invención en la Antigüedad», explica el significado original del término *física*, que poco tiene que ver con el actual y sí, en cambio, con el estudio de la naturaleza de las cosas. La física habría nacido del impulso por comprender el

mundo de manera racional al margen de cualquier divinidad. Heilbron no descuida el significado de la física en el mundo romano, y son brillantes las páginas dedicadas a las consideraciones morales de Lucrecio o Séneca a propósito de la disciplina.

El segundo capítulo, «Selección en el islam», analiza la apropiación y desarrollo de la ciencia antigua en el mundo árabe medieval, que ofrecía poderosos estímulos al estudio y a la investigación. Junto a instituciones como la biblioteca o el observatorio astronómico, Heilbron destaca la importancia del papel como causa material del progreso científico en el islam y de los antecedentes árabes de la revolución copernicana, si bien reconoce que no se ha podido determinar una vía de transmisión convincente.

Resulta interesante la decisión de tratar el período de la llamada revolución científica en dos capítulos: «Domesticación en Europa» y «Una segunda creación». El primero de ellos trata de la aparición de las universidades en Europa, la recuperación del legado clásico y los avances metodológicos y filosóficos, e incluye síntesis magistrales de la obra de Copérnico y Galileo. El segundo discute de forma

simétrica las aportaciones de Descartes y Newton, enlazándolas con la «invención de la física» en la Ilustración. El libro se aparta de la cronología convencional, que sitúa la obra de Newton como la culminación de la revolución científica y corolario del trabajo de Copérnico y Galileo, para priorizar en cambio las conexiones con la nueva física experimental ilustrada y, paradójicamente, con la gravedad aristotélica, sin fundamento mecanicista: «En su regresión a estos elementos de la física del Antiguo Régimen, en su sistema de leyes y sus esfuerzos por imponerlas, y en su presidencia imperial de la Real Sociedad británica, Newton fue el Napoleón de la revolución científica».

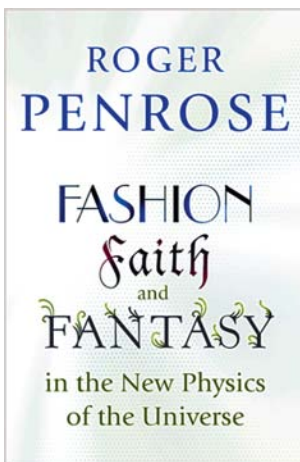
El quinto capítulo, «La física clásica y su cura», describe la creación de la física clásica en paralelo a la profesionalización de la disciplina, hacia 1900. Un sexto capítulo, titulado «Del Viejo al Nuevo Mundo», traza el auge de la física en el siglo xx y su «americanización» desde el fin de la Segunda Guerra Mundial, con el surgimiento de la *big science* y la relegación de los aspectos filosóficos de la disciplina. Pese a ostentar la hegemonía mundial, los Estados Unidos han experimentado desde la última década

del siglo cierto declive, reflejado en la cancelación en 1993 del Supercolisionador Superconductor.

El libro empieza y acaba en un tono espiritual. El último capítulo, «La quincuagesencia», no solo remite de nuevo a los orígenes de la física en la Antigüedad, sino también a su valor para el género humano. Ante un universo «tan inspirador como terrorífico», cabe preguntarse de nuevo qué hacemos aquí. La respuesta «adulta obvia», según el premio nóbel de física Steven Weinberg, es que el universo «no tiene propósito ni significado».

Para Heilbron, saber que el mundo no fue creado para nosotros supone un pensamiento liberador. Pese a todo, la física ha puesto en manos de la humanidad su propio futuro: «Si la humanidad acepta tal responsabilidad y la pérdida concomitante de deidades providenciales y mandatos sagrados, la especie humana podría vencer los obstáculos que se oponen a la supervivencia de una civilización electromagnética, preservar la Tierra y, al cabo del tiempo, alcanzar varias teorías del todo satisfactorias».

—Xavier Roqué  
Centro de Historia de la Ciencia  
Universidad Autónoma de Barcelona



FASHION, FAITH, AND FANTASY IN THE NEW PHYSICS OF THE UNIVERSE

Roger Penrose  
Princeton University Press, 2016

## Reflexiones metacientíficas

*Penrose y las limitaciones de la física*

En octubre de 2003, Roger Penrose impartió una serie de conferencias en la Universidad de Princeton en las que ponía en cuestión varias tesis fundamentales de la física moderna, a las que tildaba de seguidoras de modas, recibidas con fe más o menos ciega y fruto de la fantasía, de una imaginación que en nada desmerecían de los delirios de los autores de ciencia ficción. Si algo parece contrario al

quehacer científico riguroso es lo que esa trilogía —moda, fe y fantasía— designa. A lomos de las ideas allí expuestas se publicaron libros más o menos críticos con la teoría de cuerdas y con otras tesis capitales. En este libro, Penrose depura sus ideas al hilo de lo reflexionado por él y por otros desde entonces. [Véase «Los límites del método científico», por Adán Sus; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2016.]

En el mundo de la física hay de todo menos tranquilidad. El modelo estándar de la física de partículas describe los bloques constitutivos de la materia y las interacciones fundamentales. Pese a su enorme poder explicativo, se muestra incapaz de dar cuenta de la materia oscura ni de por qué hay más materia que antimateria, entre otras cuestiones. Se atribuye esa debilidad a la existencia de nuevas partículas aún por descubrir. Una de las extensiones más estudiadas del modelo estándar, la supersimetría, postula cientos de ellas. Esos y otros modelos se proponen ahorrar un universo implausible.

La materia oscura y la energía oscura dan cuenta del 95 por ciento del contenido total de materia y energía del universo. Y lo que reviste mayor curiosidad: sus densidades en el universo actual vienen a ser del mismo orden de magnitud, un hecho tan inverosímil que los cosmólogos han convenido en denominarlo «problema de la coincidencia cósmica». De ese universo implausible podemos pensar que es mucho más extraño de lo que cabría imaginar. Pero, para interpretarlo, los físicos no se entregan a modas y creen-



cias ni dejan volar la fantasía. ¿O sí? Si por esa tríada entendemos tendencias cambiantes a capricho, fe ciega en lo que afirma una autoridad sobre algo que no alcanzamos a entender, o delirios de la imaginación desbocada, es evidente que no podemos predicar esos atributos de las grandes teorías de la física. Parece obvio que la naturaleza no se espeja en la voluble condición de las tendencias humanas, que su método experimental hipotético-deductivo no se compagina con un repertorio de dogmas, y que su roma objetividad no se acerca a una ficción que desprecia la lógica.

Pese a ello, hay aspectos positivos en esa tríada que Penrose va descubriendo en sendos capítulos. Ninguna teoría alcanza el estatus de preeminente por meras razones externas, sino por sus virtudes, las cuales convencen a los científicos de su validez y hacen que se convierta en tendencia. Sin embargo, eso no obsta para que se sitúe muy lejos de la realidad física diaria y pueda acabar cayendo en contradicciones con esta y su observación. Por lo demás, no se trata de un fenómeno nuevo o reciente. En la historia de la

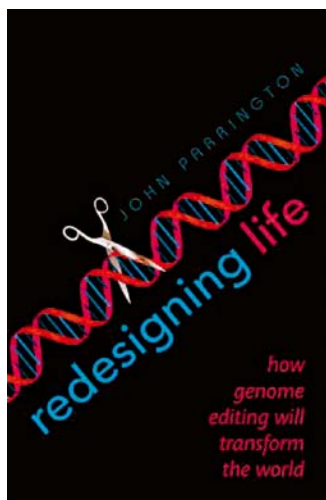
ciencia fueron teorías de moda el geocentrismo de Ptolomeo, que perduró más de un milenio, y el flogisto, desentascado por Lavoisier. Además, las teorías físicas del pasado pueden mantener su eficacia aunque hayan sido superadas por otras posteriores. Ocurrió así con la teoría newtoniana de la gravitación, que se plegó ante la relatividad einsteiniana, y con el electromagnetismo de Maxwell, mejorado en su versión cuántica. En ambos casos, la teoría más antigua continúa manteniendo su certidumbre dentro de sus límites de aplicabilidad.

A propósito de la teoría de cuerdas, ejemplo de entre las que se toman por sujeta a la moda, Penrose destaca las seis dimensiones espaciales extra que esta requiere, las cuales se alejan de la realidad física a la que estamos habituados. Para mostrar la fe acude a la creencia ciega de que los procedimientos de la mecánica cuántica deben seguirse a pies juntillas, sin que importe la extensión y la masa de los elementos físicos a los que se aplique la teoría. Una fe que se ha visto respaldada por experimentos notabilísimos, como los de Serge Haroche y David Wineland

en el campo de la óptica cuántica, quienes demostraron la posibilidad de medir y manipular partículas individuales sin destruir sus propiedades cuánticas, un hito que en 2012 sería reconocido con la concesión del premio Nobel de física.

Para escenificar la fantasía, trae a consideración el origen del universo; un universo que, ese sí, trasciende todos los límites de experiencia observable. Cabe, sin embargo, esperar que los avances en las técnicas de observación permitan transformar lo que ahora parece una ficción cinematográfica en un cuadro convincente de nuestro universo real. A diferencia de la teoría de cuerdas, sí parece que algunas descripciones imaginativas del origen del universo puedan someterse en un día no muy lejano a algún tipo de contrastación empírica, como ya anuncian los datos aportados por satélites y telescopios. En un análisis de autocrítica radical, Penrose confiesa que también esa tríada de moda, fe y fantasía ha condicionado su propia obra, desde la teoría de los twistores hasta la cosmología cíclica conforme, que presentó en 2005.

—Luis Alonso



**REDESIGNING LIFE**

**HOW GENOME EDITING WILL TRANSFORM THE WORLD**

John Parrington  
Oxford University Press, 2016

**Edición génica**

*La técnica que está revolucionando la biología*

Los dioses de la mitología griega bajaban a destajo. Poseidón, además de ostentar el dominio sobre los mares y desatar terremotos, gozaba de un poder menos comentado, diríase que sobreañadido: el de crear animales. Su diseño más célebre fue el caballo. Estaba tan orgulloso de sus caballos que los unció a su carro para cortar las olas. Esos primeros caballos de mar, o hipocampos, tenían cola pisciforme y dos pezuñas frontales.

Hasta ahí el mito. Lo científico empieza con las posibilidades que ha descubierto el ser humano con la edición génica, las cuales van de la creación de bebés a la carta a asuntos tan rutinarios como la indumentaria. Dentro de pocos años, los suéteres de lana de cachemir, suaves y sedosos, procederán de cabras sometidas a edición génica. Un equipo de investigadores chinos de la Universidad de Yulin ha conseguido cabras que producen

un tercio más de cachemir que las tradicionales. Los investigadores aplicaron la técnica de edición génica CRISPR-Cas9 para silenciar el gen *FGF5*, que limita el desarrollo del pelo en la raza Shanbel de cabras cachemir. El mismo gen controla la longitud del pelo en animales muy dispares, incluido el ser humano.

Esta técnica de edición génica confiere a los investigadores la capacidad para editar genes con una precisión y facilidad desconocidas. Pero hay dos graves riesgos: que se corte el ADN por un sitio equivocado y que se produzca una edición del ADN no deseada. [Véase «La edición genética, más precisa», por Margaret Knox; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2015.]

¿En qué consiste esta técnica que ha revolucionado la ciencia de los últimos años? Está inspirada en las bacterias. De hecho, se descubrió en *Escherichia coli*. En esta, el sistema CRISPR-Cas9 detecta y destruye los bacteriófagos, virus de ADN que se insieren en las bacterias para reproducirse. CRISPR son las siglas de *clustered regularly interspersed palindromic repeats* («repeticiones breves palindrómicas agrupadas y regularmente espaciadas»), y la técnica reconoce en qué lugar del ADN debe procederse a un corte

enzimático. Esta operación corresponde a Cas9, endonucleasa que actúa como tijera molecular para cortar el ADN una vez acotado el punto exacto. *E. coli* reconoce los virus que la infectaron en el pasado mediante la integración de la secuencia del ADN vírico en su propia información genética.

Entre los muchos mecanismos de defensa antivírica adquiridos en el curso de la evolución, los loci CRISPR codifican un sistema singular que aporta una adaptación potente. Tales loci CRISPR constan de un repertorio de entre 30 y 40 pares de bases y secuencias repetitivas. Tras la inyección vírica, una pequeña secuencia del genoma vírico, el llamado espaciador, se integra en el locus CRISPR para inmunizar la célula huésped. Los espaciadores se transcriben en pequeñas guías de ARN que dirigen la cisura del ADN vírico por nucleasas de ADN. El ARN guía comprende una secuencia dual derivada de ARN de CRISPR y un ARN transcrito que se une a la enzima Cas9 y la estabiliza. El corte de ADN mediado por Cas9-ARN produce un corte toco de doble cadena que activa las enzimas de reparación para sustituir las secuencias de ADN en el sitio de corte o en su vecindad.

Los científicos han logrado domoñar ese mecanismo de defensa para alterar

secuencias de ADN: Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier se percataron de que podían manipular el sistema para reconocer nuevas secuencias de ADN y cortarlas en lugares prefijados del genoma. Para inactivar un gen, todo lo que necesitamos es crear una secuencia novedosa de CRISPR que se unirá a la secuencia escogida de ADN y atacarlo con Cas9. La técnica CRISPR es una poderosa herramienta de edición génica con capacidad de alterar, a muy bajo coste, plantas, animales y embriones humanos. Se han descubierto hasta tres familias de proteínas inhibidoras del sistema de edición CRISPR-Cas9 en células humanas, lo que abre no pocas esperanzas en el campo de la terapia génica.

Sorprende de esta técnica la celeridad con que se ha desarrollado. A los seis meses de publicarse, en 2012, la primera propuesta de programación de CRISPR, tres laboratorios lo empleaban ya como herramienta de edición del genoma. A los 12 meses, los investigadores lo aplicaban a diversos tipos celulares y organismos.

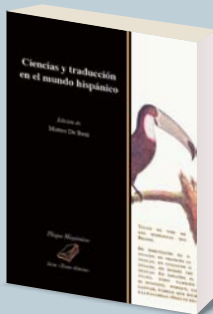
El autor no rehúye los dilemas éticos que plantean las nuevas técnicas de manipulación del genoma humano. Pese a todas las objeciones morales, los ensayos no se han detenido. En 2015, Junjiu Huang aplicó el sistema CRISPR-Cas9 a un embrión

humano para bloquear el gen de la beta-globina causante de la talasemia, según informó. Se trataba de un embrión *ad hoc* creado por la fusión de espermatozoides con un óvulo y, por ende, no viable, lo que causó un enorme estupor en la comunidad científica. Ante el derrotero que ese tipo de prácticas pudiera seguir, se convocó ese mismo año una cumbre en Washington en la que se pidió una moratoria mundial [véase «La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes», por Sara Reardon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2016].

Sin embargo, en abril del año pasado, un equipo de la Universidad de Guangzhou se propuso, con limitado éxito, modificar el gen *CCR5* e impedir así que el virus de la inmunodeficiencia humana penetrara en células inmunitarias sanas. Los investigadores emplearon embriones no viables que destruyeron a los tres días. Meses más tarde, el 28 de octubre de 2016, un paciente que sufría cáncer de pulmón en el hospital de Chengdu se sometió a un tratamiento de células que habían sido manipuladas con la técnica de edición CRISPR-Cas9. Se esperaba que las células editadas montaran una respuesta inmunitaria frente al cáncer. Hay nuevos proyectos para el año en curso.

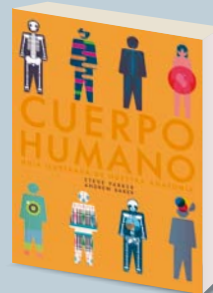
—Luis Alonso

## NOVEDADES



### CIENCIAS Y TRADUCCIÓN EN EL MUNDO HISPÁNICO

Dirigido por Matteo De Beni  
Universitas Studiorum, 2016  
ISBN: 978-8899459543  
394 págs. (20 €)



### CUERPO HUMANO GUÍA ILUSTRADA DE NUESTRA ANATOMÍA

Steve Parker y Andrew Baker  
Lunwerg Editores, 2017  
ISBN: 978-84-16489-98-5  
224 págs. (21,50 €)

### LAS 4 FUERZAS QUE RIGEN EL UNIVERSO

Jordi Pereyra  
Paidós, 2017  
ISBN: 978-84-493-3316-3  
256 págs. (17,95 €)



### LAS CIENCIAS Y LAS HUMANIDADES

Henri Poincaré  
Edición de Francisco González Fernández  
KRK Ediciones, 2017  
ISBN: 978-84-8367-573-1  
93 págs. (9,95 €)

