

THE MAN IN THE MONKEYNUT COAT, WILLIAM ASTBURY AND THE FORGOTTEN ROAD TO THE DOUBLE-HELIX

Por Kersten T. Hall. Oxford University Press, Oxford, 2014.

ADN

Una desconocida preparación del camino

El hilo conductor de esta espléndida biografía se teje con la archiconocida confesión de Isaac Newton, en la que declaró que había logrado sus monumentales descubrimientos porque pudo ver más lejos al encaramarse a hombros de gigantes. (En realidad, la paternidad de la frase corresponde, según John de Salisbury, del siglo XII, a su maestro Bernardo de Chartres.) En el caso del libro de Kersten T. Hall, el tema es la paternidad del descubrimiento de James Watson y Francis Crick, en 1953, de la estructura en doble hélice de la molécula de ADN, uno de los hitos miliares de la historia de la ciencia. Esa configuración helicoidal transformó nuestro conocimiento de la forma en que opera la herencia y abrió la posibilidad de fabricar nuevos fármacos de importancia vital, como la insulina recombinante. La doble hélice se ha convertido en la imagen de nuestro tiempo. Sobre su hallazgo pareciera que todo estaba escrito con la publicación, en 1968, de *The double helix* por Watson.

Tuvo, sin embargo, sus preámbulos; los gigantes que prestaron sus hombros. Andando el tiempo se reconocería la determinante contribución de Rosalind Franklin, cuya famosa fotografía 51 mostraba el patrón de dispersión de rayos X producido por el ADN, la clave que permitió resolver su estructura. Ahora bien, Franklin se basaba también sobre el trabajo de otros. No fue la primera en recurrir a los rayos X para explorar la estructura del ADN. A su vez, ella se aupó a hombros de otro gigante, William T. Astbury.

Dos años antes del célebre descubrimiento de la estructura del ADN, Watson había asistido a una conferencia celebrada en Nápoles, donde Maurice Wilkin, del King's College de Londres, mostró una serie de fotografías, obtenidas con su discípulo Raymond Gosling; recogían los motivos generados cuando las moléculas de ADN dispersaban haces de rayos X. Aquellas manchas, ordenadas, sobre las instantáneas constituían una prueba poderosa de que el ADN contenía regiones cristalinas; en otras palabras, encerraba una estructura regular iterativa. Tal regularidad convenció a Watson de que en el seno de esa estructura residía el secreto de la transmisión de la información genética. Aquel era su camino, pensó.

Y comenzó a trabajar en Cambridge con Francis Crick, construyendo con cartón y alambre modelos hipotéticos de una molécula de ADN. Para vencer dificultades iniciales invitaron a Cambridge a Wilkins y a la colega de este en sus tareas cristalográficas, Rosalind Franklin, quien les descubrió los errores de química general que habían cometido en su boceto. Lawrence Bragg, director del departamento, les impuso entonces que dejaran de lado su incursión en el ADN y volvieran a sus primeras tareas asignadas: Crick a la estructura de la hemoglobina y Watson a la de los virus.

Para mayor desazón, a finales de 1952 llegaron noticias de que Linus Pauling estaba preparando un artículo sobre la estructura del ADN. Pauling era considerado el mayor químico estructuralista de

su tiempo; un año antes había superado al equipo de Bragg en la solución del plegamiento helicoidal de las proteínas. Pero cuando Watson obtuvo una copia del artículo de Pauling respiró aliviado. Aquello no podía funcionar. Era el momento de reanudar con Crick los trabajos sobre el ADN. Tomó el tren de Londres, para verse de nuevo con Wilkins y Franklin.

A sus treinta años, Franklin se había hecho un nombre en cristalografía de rayos X, técnica que permite deducir la estructura de las moléculas a partir de la dispersión de los rayos X. En razón de su forma particular y repetición de la disposición en el espacio, las moléculas dispersaban o difractaban de una manera u otra los rayos X, que podían registrarse en diversos patrones de manchas negras sobre una película. Mediante un análisis cuidadoso y la aplicación de determinados métodos matemáticos, se infería la forma física de la molécula a partir de las manchas. Tras pasar varios años investigando en París esta técnica aplicada a moléculas basadas en el carbono, Franklin llegó al King's College.

A espaldas de Franklin, Wilkins le enseñó a Watson una sorprendente radiografía del ADN, la «foto 51», realizada por aquella. Al ver la cruz que perfila la foto, Watson pensó en una estructura helicoidal subyacente. La fotografía sirvió para confirmar el modelo en que había trabajado con Crick y convencer a Bragg de que les permitiera retomar sus trabajos sobre la estructura del ADN. Tardaron escasas semanas en terminar su modelo definitivo de ADN y remitieron su ahora famoso artículo a *Nature*. Nueve años más tarde, Crick, Watson y Wilkins recibieron el premio Nobel.

En el artículo de *Nature* hay una brevísima alusión a Franklin. Pero en los discursos de recepción del galardón, ni Watson ni Crick la mencionaron; algo más objetivo fue Wilkins. Watson cayó incluso en la crueldad de la vejación, negándole solvencia científica. No pudo percatarse, afirmaba Watson, del alcance de la fotografía, porque era obstinadamente contraria a la idea de hélice. Un juicio carente de fundamento, pues una de las grandes contribuciones de Franklin había sido demostrar que el ADN podía presentar dos conformaciones, según la humedad y el contenido hídrico. Con una humedad por debajo del 75 por ciento, la molécula adoptaba una configuración compacta, que Franklin denominaba «forma A»; con una humedad de entre el 75 y el 92

por ciento, la conformación era más fina y larga. Esta era la conformación que se suponía más verosímil en el ADN en un entorno celular originario; Franklin la denominó «forma B». Cada una de las formas producía un patrón de difracción de rayos X característico.

La mayor parte del trabajo de Franklin se desarrolló sobre la forma A, de la que no se infería una estructura helicoidal con claridad. Pero lejos de ser «obstinadamente contraria», su colega Aaron Klug descubrió un borrador de ensayo que había escrito poco antes del artículo de Watson y Crick, en el que declaraba su convencimiento de que el trabajo que estaba realizando sobre la forma B sí sugería una estructura helicoidal. ¿Por qué no dio el paso definitivo y permitió que se le adelantaran Watson y Crick? Según todos los indicios, estaba confirmando meticulosamente todas las posibilidades de la forma A, antes de reanudar el trabajo sobre la forma B.

Esa forma poderosa y enigmática de radiación (los rayos X) había sido descubierta en 1895 por Wilhelm Röntgen, en su laboratorio de Wurzburg, mientras estudiaba los efectos del paso de la electricidad a través de un gas encerrado en una vasija a baja presión [véase «El descubrimiento de los rayos X», por Graham Farmelo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1996]. Se trataba de una línea de investigación cuyo origen se remontaba a los experimentos de Michael Faraday de 1837. Años después, William Crookes descubrió que, cuando se aplicaba un alto voltaje a través de un gas confinado en un tubo a muy baja presión, el tubo emitía un resplandor misterioso; para su irritación, las placas fotográficas del laboratorio aparecían nubladas. Röntgen se encontró con el mismo fenómeno y lo atribuyó a la luz emitida por el tubo de descargas. Tapó con cartón negro la vasija de cristal. Para su sorpresa, las placas seguían nublándose y las pantallas cubiertas con platino-cianuro de bario, un material fluorescente, comenzaron a brillar.

Röntgen llegó a la conclusión de que el tubo de descargas no solo emitía luz visible, sino también otra forma de radiación todavía sin identificar, que, a diferencia de la luz, podía atravesar un cartón negro. En honor de su descubridor, la nueva radiación se llamó radiación Röntgen. Pero en algunos lugares comenzó a denominarse rayos X, por su naturaleza desconocida. Muy pronto comenzaron a aparecer trabajos sobre sus

aplicaciones: descubrimiento de cálculos renales, lesiones óseas y articulaciones reumáticas.

El gran salto hacia delante lo dieron William Bragg y su hijo Lawrence [véase «El nacimiento de la cristalografía de rayos X», por John Meurig Thomas; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2013]. En 1904 inició el primero su investigación sobre la emisión radiactiva de los rayos alfa. Estudió el papel penetrante de esas partículas emitidas por núcleos inestables del elemento radio. Le intrigaba la capacidad de las partículas alfa para arrancar electrones de los átomos de gas, dejándolo ionizado. Los rayos X compartían esa propiedad, lo que constituía, en su opinión, una prueba convincente de que se trataba de un chorro de partículas, no de ondas electromagnéticas. Pero los físicos andaban divididos sobre la cuestión. Charles Glover Barkla les asignaba una naturaleza ondulatoria.

En 1909 Bragg se hizo cargo de la cátedra Cavendish de física de la Universidad de Leeds, célebre por su industria textil basada en el procesamiento de la lana. Se había convertido, además, en centro importante del desarrollo de la fotografía. Su hijo Lawrence, que se había formado en matemática y física en Cambridge, obtuvo una ecuación sencilla, que lleva su nombre y que relacionaba la disposición espacial de los átomos en un cristal, el ángulo del haz de rayos X dispersado y la longitud de onda de los rayos X. Bragg padre desarrolló el instrumental necesario para someter a contrastación las ideas de Lawrence. Publicaron el primer trabajo conjunto en 1913, titulado «The reflection of X-rays by crystals», aparecido en *Proceedings of the Royal Society of London*, artículo que establecía los principios básicos de una nueva técnica, la «cristalografía de rayos X».

Astbury formó parte del grupo de cristalógrafos de rayos X reunidos en torno a William Bragg en la Institución Real en los años veinte. Entre los muchos jóvenes que conformaron el equipo inicial de Bragg, que abrirían nuevos campos a la cristalografía de rayos X, estaba Kathleen Yardley, con quien Astbury realizó los primeros trabajos. Juntos publicaron en 1924, en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, un estudio denso: «Tabulated X-ray data for the examination of the 230 space-groups by homogeneous X-ray analysis», que transformaron luego en la *International tables for crystallography*, de uso vigente. La

edición de esas tablas constituyó un hito en el desarrollo de la teoría de la estructura cristalina.

En mayo de 1928, el profesor Alfred F. Barker le escribió a William Bragg si conocía a alguien idóneo para el puesto recién creado de física textil en la Universidad de Leeds. Bragg le contestó que tenía a la persona ideal para el trabajo: «[Astbury] es un científico brillante... tenaz y perseverante, dotado de imaginación y espíritu investigador». El cargo comportaba aplicar la técnica de rayos X a las fibras de lana. Allí permaneció hasta su muerte, en 1961. Tras hablar con J. B. Speakman, que trabajaba sobre propiedades químicas de la lana, se determinó que todo lo relacionado con la física de la lana quedara reservado a Astbury.

En esas fechas solo se sabía que algunas prendas estaban tejidas en lana y que la lana, a su vez, se componía de un «coloide anfotérico» denominado queratina, una proteína carente de interés. Pero los escritos de Astbury que resumían sus trabajos en una serie de artículos de 1930 a 1935 llamaron la atención de la comunidad científica porque aportaban respuestas a una cuestión que había desconcertado a los bioquímicos durante muchos años. Se trataba de dilucidar la estructura y composición molecular de las proteínas. Unas, así la queratina, cumplían una función meramente estructural; otras, como las enzimas, eran auténticas máquinas; otras intervenían en el transporte de nutrientes esenciales, etcétera.

De los cinco ensayos publicados en ese período había uno cuya importancia trascendía el ámbito de los telares: las fibras de queratina lanar, extendidas y sin extender, daban origen a dos patrones de difracción de rayos X. Con ello no solo se indicaba la naturaleza de la proteína, sino también su forma posible de operación. Del patrón mostrado por la queratina sin extender, Astbury calculó que la cadena de aminoácidos se plegaba de una manera compacta; la llamó forma alfa. Cuando la lana se extendía hasta un 90 por ciento, se modificaba, de una manera sutil aunque significativa, el patrón producido por los rayos X, de donde se infería que la cadena había cambiado su configuración. Era la forma beta. Las mediciones de las dimensiones de la cadena proteínica de la queratina realizadas por Astbury resultaron de enorme utilidad para Linus Pauling.

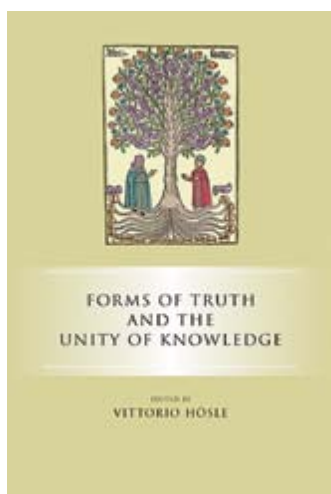
Astbury introdujo el uso de rayos X para sondear la estructura de macromoléculas biológicas y realizó los primeros

trabajos de esa índole sobre ADN ya en 1937. Alcanzó la cima de esa línea de investigación en 1951: su equipo obtuvo una serie preciosa de fotografías de difracción de rayos X de ADN que mostraban exactamente el mismo patrón cruciforme que, dos años más tarde, sería un hito de la historia de la ciencia. Fue un inmenso error no percatarse de lo que tenía ante sus ojos. Que Astbury no viera nada singular en esa fotografía pudiera parecer una pifia garrafal. Pero ese juicio resulta apresurado. Su legado se extendió más allá del ADN. Convencido de que los métodos y las

técnicas de la física arrojarían luz sobre nuestro conocimiento de la biología, ayudó a fundar una ciencia enteramente nueva, la biología molecular, en cuya entraña está la descripción de los sistemas vivos en términos de sus formas y estructuras macromoleculares componentes. Astbury mostró que la forma de las moléculas biológicas podían alterarse deliberadamente, idea que cobró expresión plástica en su gabán (de ahí el título del libro), fabricado con proteínas de cacahuete intencionadamente manipuladas para crear una nueva fibra textil, el Ardil.

Para Astbury, la difracción de los rayos X constituía la herramienta ideal para obtener pruebas experimentales de que determinadas propiedades físicas de una molécula emergían de las divergencias presentadas en la configuración espacial de sus átomos, o estereoisomerismo. Se manifestaba convencido de que las propiedades físicas de sustancias biológicas obedecían a las diferencias producidas en la forma tridimensional de sus moléculas componentes y el modo en que esas formas cambiaban.

—Luis Alonso



FORMS OF TRUTH AND THE UNITY OF KNOWLEDGE

Dirigido por Vittorio Hösle. The University of Notre Dame Press, Notre Dame, Indiana, 2014.

Unidad del conocimiento

Unidad del saber e interrelación entre las ciencias

La división de las universidades en departamentos, a menudo estancos, obedece a una razón histórica de demostrada eficacia. El incansable incremento de cada ciencia obliga a evitar la dispersión y generalización, para concentrarse y así seguir avanzando. Mas, al propio tiempo, los peligros asociados a esta hiperespecialización son múltiples y conocidos, develados por pensadores tan dispares como José Ortega y Gasset y Karl Popper. No solo existen interferencias necesarias (la física teórica deviene matemática con frecuencia creciente), sino que la creación e investigación en un campo extrae sumo provecho de los métodos y progresos de otros. Las reuniones interdepartamentales se han ido extendiendo por doquier. Por una razón poderosa: la realidad es única y sus interpretaciones y aproximaciones recogen aspectos regionales o parciales. En esos seminarios, se hace patente la existencia de bases comunes, mutuas dependencias o reducciones de una disciplina a otra y posibles solapamientos.

Las primeras reflexiones sobre el conocimiento y sus múltiples formas aparecieron en la Escuela Eléata, en la época presocrática, con la distinción entre la vía de la opinión y la vía de la verdad. El siglo V antes de Cristo asistió también a la aparición de la matemática teórica; en efecto, el descubrimiento de magnitudes inconmensurables, no más tarde del 450 a.C., elevó la matemática desde su situación de herramienta útil para ayudar a resolver problemas prácticos hasta el nivel de ciencia autónoma, que, al propio tiempo, nos acerca al conocimiento del mundo físico.

El estatuto epistémico peculiar de la matemática y el estatuto ontológico de sus objetos fueron los dos problemas que motivaron la filosofía de Platón. Mientras que la creencia (*pistis*) y la imaginación (*eikasía*) se ocupaban de los objetos físicos y sus imágenes, se atribuía a la cognición (*noesis*) y el pensamiento (*diánoia*) la tarea de descifrar del mundo inteligible. Xenócrates, su discípulo,

propone subdividir la filosofía en lógica, física y ética.

Pero es a Aristóteles a quien debemos el sistema más elaborado sobre teoría del conocimiento en el período clásico. Para Aristóteles, todo conocimiento es teórico, práctico (moral) o productivo (creador, relacionado con alguna habilidad). Las ciencias teóricas se sitúan en el nivel más alto porque versan sobre la contemplación, fuente última de felicidad. El conocimiento teórico comprende la física, la matemática y la teología; el práctico abarca la ética y la política; el poético, la poesía y otras subdisciplinas menores.

Ya en el Medievo, la lógica constituiría una cuarta parte en el *Didascalion* de Hugo de san Víctor. En *De reductione artium ad theologiam*, san Buenaventura incluye el trívium (gramática, lógica y retórica) en su sistema e insiere, entre la ética y la política, la economía (entendida como la gestión de lo doméstico o familiar). La filosofía medieval subordinaba todo conocimiento a la teología. El movimiento de traducciones de los clásicos griegos al latín constituyó uno de los factores determinantes de la restauración científica del siglo XII. En particular, la introducción del corpus aristotélico, que fue abriéndose en las universidades que se iban fundando. Así, la exposición del *Organon*, *Tópicos*, *Categorías* y *Analíticos* entró en el currículum de la facultad de artes. Se enseñaban los *libri naturales* del estagirita, junto con el *De anima*, o psicología, y los *Metafísicos*. La asimilación de la filosofía natural fue gradual. En ciertos casos sufrió una fuerte oposición, especialmente en la Universidad de París, a partir de 1215. En *De reductione artium ad theologiam*, Buenaventura cita las artes mecánicas, cognición sensible

y cognición filosófica, entre las etapas principales de conocimiento. A finales del siglo XIII la filosofía natural aristotélica estaba asentada. Sus ideas biológicas habían penetrado en las doctrinas médicas.

El esfuerzo más impresionante para sistematizar el conocimiento a comienzos de la modernidad se lo debemos a Francis Bacon y su *Of the proficience and advancement of learning, divine and human*, publicado en 1605. Bacon no quiere limitarse a las ciencias establecidas, sino que se propone explorar partes del aprendizaje inéditas. Divide las ciencias de acuerdo con las tres partes del entendimiento humano: memoria (historia), imaginación (poesía) y razón (filosofía). Subdivide la historia en natural, civil, eclesiástica y literaria. Los conocimientos, escribió, son pirámides, en cuya base se encuentra la historia. Así, la base de la filosofía natural es la historia natural.

Descartes no tardó en poner en cuestión el sistema baconiano, con su radical separación entre sustancia extensa y sustancia pensante. Otra mente poderosa, Immanuel Kant, confina espacio, tiempo y causalidad en el dominio de la intuición; en cambio, los juicios sintéticos a priori no implican un conocimiento innato. Más cercano en el tiempo, Edmund Husserl distinguía en sus *Investigaciones lógicas* entre ciencias teóricas o abstractas y ciencias concretas u ontológicas. La geografía y la historia natural serían ciencias concretas; su unidad está constituida por el objeto común de que se ocupan, a menudo utilizando métodos completamente diferentes (pensemos en la distinción entre geografía física y antropogeografía). Las ciencias teóricas, la física matemática por ejemplo, se fundarían en principios homogéneos de explicación.

La aparición de una nueva disciplina obedece a varias causas. Recojamos dos: el descubrimiento de estratos inéditos de la realidad, sea por viajes de exploración a partes de la Tierra o del cosmos hasta entonces desconocidas, sea el invento de nuevos instrumentos de observación, como microscopios y telescopios. La antropología fue alumbrada por la conquista del Nuevo Mundo, la microbiología por el desarrollo de microscopios en el siglo XVII. Los programas espaciales de los años sesenta impulsaron una nueva rama de la biología llamada exobiología, centrada en la búsqueda de vida más allá de la Tierra.

El desarrollo de nuevos útiles teóricos, por lo común matemáticos, nos permite unificar conjuntos de hipótesis y, con ello, conferir estatuto teórico a una disciplina. El éxito de la física moderna va inextricablemente unido al cálculo. Las ciencias sociales despegaron con la aplicación de la estadística a los datos sociales. Lo que constituye una disciplina son los lazos lógicos entre sus diferentes tesis que la integran en un todo coherente, consistente.

Peculiaridad de nuestro tiempo ha sido la introducción firme de la ciencia en campos antaño reservados a la filosofía. Por mor de ejemplo, mencionemos el estatuto de la ética. ¿Es materia filosófica o es materia científica? En el libro coral que aquí reseñamos, Francisco J. Ayala nos acerca a las bases biológicas de la filosofía moral, en una senda que ya habían abierto Edward Wilson y otros. Para ello resaltan el anclaje filogenético de nuestra especie, que ha evolucionado a partir de otras no humanas. Nuestros parientes más estrechos son los grandes simios y, de ellos, chimpancés y babuinos nos son más cercanos que los gorilas, y mucho más que lo son a los orangutanes.

Postura erecta y un cerebro poderoso constituyen las peculiaridades más notorias de la anatomía humana. Somos los únicos vertebrados con marcha bípeda y postura erguida; las aves son bípedas, pero su esqueleto es horizontal, no vertical (con la singular excepción de los pingüinos). El tamaño del cerebro suele ser proporcional al tamaño corporal; con relación a la masa corporal, los humanos poseen el cerebro mayor y más complejo: pesa un promedio de 1380 gramos en el varón y de 1200 gramos en la mujer. El peso del cerebro del chimpancé es de 420 gramos. Ligeramente mayor el del gorila. El de un varón humano adulto tiene un volumen de 1400 centímetros cúbicos (cc).

Hasta fecha reciente, los evolucionistas plantearon la cuestión sobre qué se adquirió primero, si la marcha bípeda o el cerebro poderoso. La cuestión ha quedado ya resuelta. Nuestros antepasados *Australopithecus* tenían, desde hace cuatro millones de años, una marcha erecta, pero un cerebro pequeño, de unos 450 cc, el peso de una libra. Las manos de los homínidos que vivieron hace unos tres millones de años tallaban instrumentos.

Los humanos no solo divergen de otros animales en su anatomía, sino también, y no es menos importante, en su

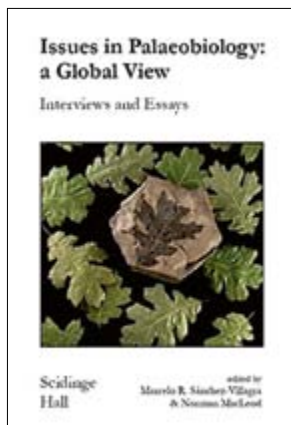
comportamiento, individual y social. Un elenco de esas discrepancias incluiría: pensamiento abstracto, categorización y raciocinio, por lo que se refiere a la inteligencia; lenguaje simbólico creador; autoconsciencia y consciencia de la muerte; fabricación de herramientas y tecnología; ciencia, literatura y arte; ética y religión; organización social y cooperación (división del trabajo); códigos legales e instituciones políticas.

La teoría de la evolución se ha preocupado también de los fundamentos de la moral. No atribuimos conducta ética a los animales; al menos no a todos los animales y no en la misma medida que a los humanos. Por consiguiente, la evolución plantea cuestiones distintivas sobre los orígenes y contenidos de la conducta moral. ¿Está determinado por la evolución el sentido moral?

Si está determinado por la evolución, ¿en qué momento se adquirió? ¿Tenían desde un comienzo los humanos modernos un sentido ético? ¿Se regían los neandertales por normas morales? ¿Qué decir a ese respecto de *Homo erectus* y *Homo habilis*? ¿Cómo evolucionó el sentido moral? ¿Vino instado directamente por la selección natural? ¿O vino como un subproducto de otros atributos (la racionalidad, por ejemplo) que sí fueron objeto directo de selección, como propusieron Gould y Lewontin sobre las enjutas de san Marcos? ¿Es acaso el sentido moral un resultado de la evolución cultural más que de la evolución biológica? Y, concedido que así sea, habría que averiguar si el comportamiento ético viene directamente promovido por la selección natural o si es fruto de una manifestación epigenética de otro rasgo que sí es objetivo de la selección natural.

Propone Ayala que la evaluación de la acción moral emerge de la racionalidad humana; en términos darwinistas, de las facultades intelectuales altamente desarrolladas. Nuestra elevada inteligencia permite anticiparnos a las consecuencias de nuestros actos con respecto a los demás y, por tanto, juzgarlos como buenos o malos en términos de sus consecuencias para otras personas. En cambio, las normas a tenor de las cuales decimos que un acto es bueno o malo vienen determinadas en buena medida por la cultura, aunque condicionadas por las predisposiciones biológicas, como el cuidado de los padres en ofrecer un buen modelo de conducta.

—Luis Alonso



ISSUES IN PALEOBIOLOGY: A GLOBAL VIEW. INTERVIEWS AND ESSAYS

Preparado por Marcelo R. Sánchez-Villagra y Norman MacLeod. Sciedinge Hall Verlag, Zúrich, 2014.

Paleobiología

*Individuos, especies, ecosistemas
y entornos fósiles*

Salvo en contados recodos de tendencia geológica, los paleontólogos de la nueva síntesis darwinista mostraban un interés central en la biología y evolución de los organismos fósiles en sus ecosistemas. Miquel Crusafont, decano de la materia en España, declaraba, a este respecto, en las lecciones inaugurales de la asignatura, que la biología se dividía en paleontología, atenta al estudio de los fósiles, y neontología, que se ocupaba de las especies actuales. De la paleontología a la paleobiología no ha habido solución de continuidad, con la salvedad de que esta se ha beneficiado de un mayor número de expertos y dilatación del dominio de investigación.

El registro fósil facilita el acceso a pautas evolutivas y tendencias globales de la biodiversidad a través de las eras geológicas. En ello insiste la paleobiología desde su fundación, en 1912, por Othenio Abel. La disciplina adquirió plena madurez epistemológica en los años setenta con los trabajos de un grupo de paleontólogos norteamericanos integrado, entre otros, por Niles Eldredge, Stephen Jay Gould, David M. Raup, Thomas J. M. Schopf y Stephen M. Stanley. Empezaron por admitir la estasis morfológica de las especies, un fenómeno que implica que el cambio evolutivo se concentró en episodios de especiación geológicamente breves. Esta teoría del equilibrio puntuado, elaborada por Eldredge y Gould, tuvo una implicación importante que no se reconoció en el comienzo: la macroevolución debe operar mediante la selección de especies, análoga a la selección de individuos en la evolución darwinista. Gould en particular influyó en el movimiento de la taxonomía numérica; aplicó métodos matemáticos a la alometría, morfología y heterocronías.

Pese a todo, los paleontólogos no han descuidado los métodos tradicionales, incluido el más sencillo, la observación directa. De ese medio se sirvió el recientemente fallecido Adolf Seilacher (1925-2014) en su interpretación de los enigmáticos especímenes de Ediacara, que datan de hace unos 578 millones de años, antes de la aparición de los principales filos animales durante la explosión del Cámbrico. Seilacher entró en la Universidad de Tubinga en 1945. Allí el paleontólogo Friedrich von Huene le enseñó el uso de la cámara lúcida, un aparato con un prisma y un espejo que proyecta la imagen del espécimen en una lámina de papel para que pueda dibujarse. En una expedición a Salt Range, en Pakistán, Seilacher y su alumno Otto Schindewolf descubrieron huellas de trilobites en rocas tempranas del Cámbrico, que aportaron claves para descifrar el estilo de vida de los animales.

Seilacher mostró también de qué modo los fósiles traza (los que registran una actividad biológica, como la excavación subterránea de animales marinos) revelan rasgos de conducta. Analizó influencias que conforman la morfología de los invertebrados y mostró cuán excepcionalmente los conjuntos fósiles conservados (denominados por él *Lagerstätten*) eran resultado de condiciones tales como la escasez de oxígeno, rápido enterramiento y el efecto de películas microbianas que sellaban la superficie del sedimento.

La paleontología es una ciencia en continua progresión. Por botón de muestra, traigamos a colación algunos de los últimos hallazgos más importantes. Empecemos por el relativo a la estilización de los huesos del esqueleto humano con el tiempo. Los huesos de chimpancé se encuentran inmersos en estructuras microscópicas que conforman un hueso es-

ponjoso, lo que no acontece en los huesos de los humanos modernos, expuestos a fracturas y osteoporosis. Un reciente estudio comparado de *Australopithecus*, neandertales y primeros *Homo sapiens* nos muestra que presentaban densidades de hueso esponjoso mucho mayores que los humanos modernos, fenómeno que se atribuye a un estilo sedentario de vida.

Conocida es la riqueza del registro fósil de équidos, modelo de procesos evolutivos. Una nueva calibración de la filogenia de *Equus*, basada en la secuencia genómica de un équido de comienzos del Pleistoceno (hace entre 4 y 4,5 millones de años) sugiere que el linaje de *Equus* dio origen a los caballos, cebras y asnos contemporáneos. Otra cuestión en el desarrollo de la paleontología lo constituye la evolución temprana de vertebrados dotados de mandíbula (gnatostomos). El equipo dirigido por Martin D. Brazeau ha aplicado la tomografía computerizada a la caja craneana de un espécimen de 450 millones de edad procedente del Devónico inferior de Siberia, un osteíctio. Han descubierto que el cráneo era una mezcla de características observadas por separado en los osteíctianos, condriactianos o en ninguno de ellos. El análisis filogenético sitúa a los peces en la base de los gnatostomos y sugiere que los enigmáticos acantodianos (grupo extinto de peces fósiles) estaban emparentados con peces cartilaginosos.

Un cuarto ejemplo tiene que ver con la incompletitud del registro fósil, que impide identificar el origen de muchos de los clados de vertebrados más derivados. Tal es el grupo de los Ictiopterigios, un clado de reptiles marinos que aparecieron a comienzos del Triásico, sin que se conozcan intermedios. El examen de un inctiosauriforme basal procedente del Triásico inferior (hace unos 248 millones de años) de China presenta un esqueleto primitivo que indica posibles hábitos anfibios.

Otro ejemplo: ¿quiénes eran los gondwanaterios? Durante decenios han estado envueltos en el misterio. Los Gondwanatheria constituían una rareza mamífera. Solo se conocían restos fragmentarios (dientes aquí y allí y, excepcionalmente, algún trozo de mandíbula). Su conformación era propia de omnívoros y herbívoros, pero se desconocían sus relaciones de parentesco con los otros miembros del árbol de los mamíferos. El descubrimiento de un cráneo entero de un nuevo género de gondwanaterio ofrece pruebas y datos que resuelven el misterio y revela la existencia

de una sorprendente diversidad morfológica en los mamíferos primitivos. El cráneo, de 12,41 centímetros de longitud, pertenece a un individuo de la especie *Vintana sortichi*; se descubrió en la formación Maevarano de Madagascar. Se presume que se trataba de un herbívoro de ojos grandes, ágil y con un desarrollo extraordinario del olfato. El cráneo constituye un mosaico de rasgos primitivos y derivados, reflejo quizá de una larga historia evolutiva en aislamiento geográfico.

Las fosforitas de la formación ediacarana de Doushantuo (de unos 600 millones de años de antigüedad) produjeron microfósiles esferoides con un patrón de división celular palintómica. Se han recuperado fósiles esferoidales procedentes de fosforitas negras de dicha formación. Y ahora sabemos que acometían la división celular, había separación entre gametos y células somáticas y pasaban por la muerte celular programada. Por fin, en la formación de Bugiin Tsav, Mongolia, se encontró en 2009 la extremidad anterior izquierda de un espécimen de *Deinocheirus*. El fósil superaba en un 6 por ciento la longitud del holotipo. El análisis cladístico realizado ahora indica que *Deinocheirus* constituía el miembro más poderoso de los Ornithomimosauria, lo que no impide que presente caracteres que le distinguen del resto del grupo. Nos hallaríamos ante un animal pesado, con un hocico pronunciado, mandíbula profunda, espinas neurales muy altas, pigostilo, fúrcula en U, pelvis extensa para los anclajes musculares. De los restos de peces encontrados en su estómago se infiere su dieta megaomnívora y un hábitat méxico.

Las cuestiones centrales de la paleobiología son las relacionadas con el proceso de especiación y radiación en el espacio y el tiempo. Es decir, las variables genéticas y ecológicas, que nos conducirán a la evolución filogenética de las especies. En el transcurso del tiempo geológico y hasta el presente, la vida en el mar presenta una exuberancia de biodiversidad fascinante. Pensemos en protozoos marinos, en particular en los foraminíferos, cuya investigación resulta ahora impensable sin atender a la paleobiología, paleoclimatología, paleogeografía, paleoecología y posible fisiología de formas extintas mediante la comparación con análogos vivos. Los foraminíferos, eucariotas unicelulares, han vivido en los océanos durante más de 500 millones de años. En razón de su estrategia de vida se dividen

en dos tipos: foraminíferos planctónicos y foraminíferos bentónicos. Los bentónicos, que habitan en las profundidades, presentan un tamaño oscilante entre menos de 100 micras hasta un diámetro máximo de centímetros. Los de mayor talla poseen estructuras internas complejas. Los planctónicos han evolucionado a partir de los bentónicos del Triásico; no suelen superar las 600 micras. Foraminíferos vivos y fósiles presentan una amplia variedad de formas y tamaño. La complejidad morfológica de sus conchas y su evolución en el curso del tiempo ayudan a interpretar cuestiones fundamentales de paleobiología. Del conocimiento de la forma y estructura de los grandes foraminíferos se vale, para su progreso, la bioestratigrafía de entornos de aguas someras. En los horizontes estratigráficos queda recogida la evolución. Las formas primitivas persistieron y superaron condiciones adversas y episodios de grandes extinciones; además, dieron origen a formas gradualmente más especializadas y complejas.

Los grandes foraminíferos medran en muchos medios. Con su estrategia de reproducción aplazada, presentan una vida media muy larga; los grandes *Nummulites* llegan a los cien años. Desde hace años se viene investigando la genética de los foraminíferos que permite establecer las relaciones de filogenia entre grupos. Los experimentos con cultivos bajo condiciones ambientales controladas (temperatura, salinidad, concentración de oxígeno disuelto, contenido en nutrientes, concentración de elementos traza y riqueza isotópica) nos habrán de permitir interpretar mejor el comportamiento ecológico natural y las tolerancias ambientales. Se sirven de pseudópodos para capturar partículas nutritivas; descifradas la salinidad, temperatura, densidad de agua e iluminación, conoceremos la naturaleza, estilo de vida, hábitos y evolución de especies extintas de foraminíferos.

No todo es avance. Las plantas son cruciales en el funcionamiento de la Tierra, al menos en su superficie. Condicionan el clima, la geoquímica y erosión del suelo. Son fuente y sumidero de carbono. Nuestro conocimiento sobre esas cuestiones procede de la mano del descubrimiento de plantas fósiles, de su taxonomía, sistemática y fisiología. No obstante, nos sentimos abrumados por las carencias. ¿Cómo eran los licópsidos arborescentes del Carbonífero? Ignoramos su metabolismo, vida media y forma de nutrición. El mundo moderno está do-

minado por las plantas con flores, muy distinto del que predominaba en tiempos pasados; las propias coníferas del Paleozoico divergían mucho de las coníferas actuales.

La región de mayor biodiversidad del planeta se ubica en los trópicos de América del Sur (que comprenden un extenso número de ecosistemas, de las selvas alpinas de los Andes hasta desiertos y sabanas, páramos y pluviselvas). Para hacerse una idea: 50 hectáreas de la pluviselva del Ecuador tienen más especies arbóreas que, juntos, Estados Unidos y Canadá. Desde hace tiempo se conoce este fenómeno, denominado gradiente latitudinal de la diversidad. Los científicos han propuesto hasta 25 hipótesis diferentes para explicar los gradientes, aunque ninguna resulta satisfactoria. La razón de tanta controversia es que no se puede resolver el origen del gradiente latitudinal de la diversidad sin el uso del registro fósil. Al fin y al cabo, el gradiente que observamos hoy es el fruto de la acción del tiempo geológico.

Pero, ¿en qué medida se epitomiza en el registro fósil la historia real de la vida? Todos los campos de la paleobiología, sea de nivel microevolutivo o macroevolutivo, dependen de un dominio seguro del registro fósil. Todavía conocemos de una manera muy imperfecta el registro de organismos, poblaciones, especies, filos y comunidades ecológicas en diferentes escalas temporales y espaciales. A escala temporal global y geológica, lo vemos ejemplificado en el origen de los ecosistemas terrestres trópicamente modernos y en la colonización de tierra firme por plantas y animales, uno de los principales acontecimientos de la historia de la vida. Entre el Cámbrico y el Ordovícico Medio no existen pruebas fósiles incuestionables de colonización de la tierra. El registro fósil de plantas continentales comienza, en el Ordovícico, con esporas, pero hasta el Silúrico tardío no empiezan a aparecer fósiles de plantas. El registro fósil de los subsiguientes invasores de tierra firme, los artrópodos, es, con mucho, más incompleto. Diversos grupos invadieron el suelo firme independientemente; su fosilización dependía de ciertas condiciones especiales y favorables, amén de entornos sedimentarios. Los fósiles de artrópodos más antiguos son restos de milípedos del Silúrico y arácnidos. Los insectos no aparecieron hasta comienzos del Devónico.

—Luis Alonso