

**ACROSS THE BRIDGE
UNDERSTANDING THE ORIGIN
OF THE VERTEBRATES**

Henry Gee
The University of Chicago Press

El origen de los vertebrados

Certezas e incógnitas de un salto evolutivo confuso

La historia de la vida dista mucho de ser un campo cerrado, empezando por la cuestión recurrente de si nació aquí o provino de fuera. No solo aparecen propuestas sobre el tránsito de lo inerte a lo vivo, sino también sobre el origen de los grandes saltos, como el paso del mundo procariota al eucariota o el origen de los vertebrados. Las células eucariotas, que portan su ADN encerrado en un núcleo, se supone que evolucionaron a partir de la fusión de otros dos organismos: una arquea hospedadora y una bacteria. Además del núcleo, los eucariotas poseen otras características distintivas, como un sistema interno de membranas, un citoesqueleto y mitocondrias. Durante el Cámbrico, iniciado hace unos 540 millones de años, casi todos los grupos modernos, de moluscos a cordados, se habían iniciado ya y dejaron su impronta en el registro fósil. El propósito del libro de Henry Gee es presentar una síntesis accesible de los avances conseguidos en este campo.

Los vertebrados representan un grupo bastante pequeño del reino animal, aunque por su situación en la escala trófica desempeñan un papel clave para la vida en la Tierra. Algunas de las ideas aquí introducidas son objeto de controversia entre los expertos. Para el autor, por ejemplo, los fósiles del Cámbrico denominados vetulícolos y yunnanozoos constituirían parientes estrechos de los cordados, grupo extenso al que pertenecen los vertebrados. La sección segmentada del tronco de los cordados se originó, con los vetulícolos, separada por entero del resto del cuerpo y estaría destinada a convertirse en la cabeza y las vísceras.

Sin embargo, los vertebrados difieren tanto de otros animales que resulta muy difícil tender un puente que salve el hiato. Antes del advenimiento de las técnicas mo-

dernas de filogenia molecular y de medios objetivos para construir relaciones evolutivas, florecieron un sinnúmero de hipótesis, muchas de ellas aventuradas, sobre cómo los vertebrados emergerían de equinodermos, arañas, escorpiones, tunicados moluscos, nematodos, gusanos e incluso protozoos. Decepcionado por los textos de su tiempo, el autor publicó en 1996 un libro sobre los orígenes de los vertebrados bajo el título *Before the backbone*, donde realizaba un extenso repaso histórico sobre las distintas concepciones de la materia.

Por entonces acababan de descubrirse los genes *Hox*, cuya organización y funciones revelaban profundas conexiones entre las estructuras de todos los animales. A la par, se iniciaba la secuenciación de genomas que se presumían sencillos, los bacterianos. Desde entonces ha cambiado mucho el rostro de la ciencia. Las técnicas moleculares permiten la inspección e incluso la manipulación genética de organismos fuera del laboratorio. Se han secuenciado genomas de organismos de interés en la evolución de los vertebrados, una tarea que prosigue. En noviembre de 2018 arrancó en Londres el Proyecto Biogenoma de la Tierra, de diez años de duración y concebido para secuenciar el genoma de un millón y medio de especies eucariotas. Se han descubierto y descrito nuevos fósiles. Muchas ideas que se creían asentadas han caído. Todo ello ha propiciado un cambio drástico en la concepción de la evolución de los vertebrados en los últimos veinte años.

Con todo, no podemos explicar todavía el hilo conductor que nos lleve de invertebrados a vertebrados. Los parientes vivos de los equinodermos son muy pocos y, cuanto más sabemos de ellos, más claro resulta que evolucionaron hace mucho tiempo, siguiendo una trayectoria

peculiar que no nos permite usarlos para reconstruir el precursor universal de los vertebrados. Pisamos, en cambio, terreno más firme cuando abordamos la filogenia de grupos determinados. Un caso estudiado ha sido el de los pterosaurios, el primer grupo vertebrado conocido que ha adquirido en el curso de la evolución un vuelo poderoso, adelantándose varios millones de años a aves y murciélagos. De un tamaño que oscilaba entre el del gorrión y un aeroplano pequeño, los pterosaurios vivieron durante el período entero de los dinosaurios y se extinguieron con ellos. Poseían picnofibras, filamentos pequeños, en la cabeza, cuero y extremidades. Estas estructuras podrían compartir un origen evolutivo con las plumas de dinosaurios y aves. El antepasado común de pterosaurios, dinosaurios y aves podría haber sido capaz de producir picnofibras.

En la definición de vertebrado entra la presencia de una cabeza conformada, distinta, con un rostro dotado de un ojo a cada lado y una boca central. En los invertebrados hallamos todo un repertorio de ojos, tentáculos, partes bucales, cuando no un extremo frontal sin ojos ni rasgos distintivos. También los insectos poseen cabeza, pero su construcción difiere de la de los vertebrados. Los ojos de los insectos, por botón de muestra, constan de numerosas unidades repetidas, no de un cristalino flexible y único. Los oídos se encuentran en las patas y respiran a través de finos poros repartidos por el cuerpo. Por tanto, la cabeza de los insectos siguió un curso distinto del de la encefalización de los vertebrados, lo que no obsta para que se den fenómenos de convergencia entre unos y otros.

Los vertebrados se conforman alrededor de un esqueleto interno de cartilago que, en muchos casos, se refuerza con tejidos más duros (como el tejido óseo, la dentina y el esmalte). Aunque encontramos tejido cartilaginoso en distintos organismos del reino animal, hueso, dentina y esmalte son tejidos exclusivos de los vertebrados. El principal mineral constituyente de los tejidos duros de los vertebrados es el hidroxapatito, una forma de fosfato de calcio. Las conchas y otros tejidos duros de los invertebrados están hechos de una sustancia diferente, el carbonato cálcico.

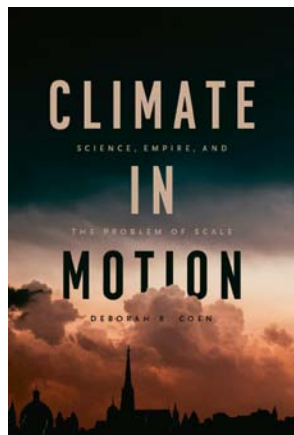
La diferencia fundamental, sin embargo, hay que buscarla en el genoma, que explica todas las otras. Todos los vertebrados comparten múltiples rasgos morfológicos y genómicos peculiares. Les caracteriza una profunda reelaboración del plano

corporal de los cordados, y adquirieron unos genomas exclusivos merced a una doble duplicación del genoma entero. En efecto, la diferencia genómica más prominente entre vertebrados y cordados no vertebrados es la reconformación del

complemento génico que siguió a las dos tandas de duplicación del genoma (lo que se conoce como «hipótesis 2R») que aconteció en la base del linaje de los vertebrados. Esos episodios mutacionales de gran escala posibilitaron, a buen seguro,

la adquisición de innovaciones evolutivas en la morfología. En efecto, si se producen dos genes donde antaño solo había uno, cada gen puede tomar su propio rumbo.

—Luis Alonso



**CLIMATE IN MOTION
SCIENCE, EMPIRE, AND THE PROBLEM OF SCALE**

Deborah Coen
The University of Chicago Press, 2018

Las raíces imperiales de la climatología

De cómo el Imperio austrohúngaro dio forma a una disciplina científica con vocación transnacional para fundamentar la unidad de una amalgama multicultural

El Imperio austrohúngaro, una potencia mundial regida por la excéntrica monarquía de los Habsburgo, era una fuerza a tener en cuenta durante los frenéticos cincuenta años que precedieron a 1918. En su exhaustivo y ampliamente documentado *Climate in motion*, la historiadora Deborah Coen explora una faceta menos conocida de aquel imperio tan aparatoso: su función como crisol de la climatología moderna. Los científicos imperiales formaban un brillante elenco, desde el meteorólogo Julius Hann, que estudió las relaciones entre los vientos dominantes, las lluvias y las temperaturas medias, hasta el geógrafo Alexander Supan, que estableció el sistema de clasificación de las zonas climáticas a escala mundial.

Coen examina la sociedad y la cultura imperiales para entender por qué el Gobierno y los dirigentes científicos austrohúngaros destinaron ingentes recursos a la meteorología y la climatología. Según la autora, la fuerza motriz se halla en la necesidad política y social de apuntalar una incómoda alianza multinacional que comprendía las actuales República Checa y Eslovaquia, así como partes de Polonia, Italia y Rumanía, entre otros territorios. Los historiadores suelen sostener que la ciencia se integra siempre en el contexto de un espacio y un tiempo específicos. Coen lo demuestra aquí de forma inequívoca.

La extensa narración abarca tres cuartas partes de un siglo, desde 1850 has-

ta 1925. Coen ha consultado numerosos archivos para conocer las entrecruzadas trayectorias profesionales de más de una docena de figuras notables: meteorólogos, botánicos, geógrafos, geólogos, pintores y escritores. Anton Kerner, por ejemplo, observó que la distribución geográfica de las plantas servía para determinar el pasado climático. También figuran Adalbert Stifter, novelista, escritor de viajes y pintor de paisajes sumamente popular; Emanuel Purkinyé, pionero checo de la microclimatología; y Wilhelm Schmidt y Felix Exner, que se hallan entre los primeros en simular en un laboratorio la circulación atmosférica y las alteraciones que en ella produce la topografía.

Dos temas principales entrelazan lo que, en esencia, consiste en una colección de ensayos más o menos cronológicos y conectados entre sí. El primero guarda relación con el esfuerzo del imperio por mantener la unidad dentro de la diversidad. El segundo corresponde al problema de la escala: un factor fundamental en climatología que abarca desde los microclimas hasta la circulación global.

Tras una serie de guerras, desde mediados del siglo XVIII hasta la era napoleónica, el joven Imperio austriaco (1804-1867) había sufrido enormes pérdidas territoriales, por lo que invirtió gran parte de su energía en amalgamar el territorio que le quedaba. En 1867, un compromiso alcanzado por los Habsburgo con los

húngaros dio lugar a una colección más extensa y multiétnica de reinos, principalmente centroeuropeos, bajo una única corona imperial.

El nuevo Imperio austrohúngaro incluía más de diez grandes grupos de lenguas, un territorio que abarcaba desde montañas alpinas hasta estepas, y un sistema de transporte y comunicación que se mantuvo rudimentario hasta bien entrado el siglo XIX. Tal y como señala Coen, los sucesivos Gobiernos bajo el largo reinado del emperador Francisco José I de Austria dirigieron a los estudiosos hacia el objetivo de demostrar que todo pertenecía a una sola bandera. Aquello era una cuestión fundamental en una época de consolidación nacional en torno a las unidades lingüísticas. Por ejemplo, las laxas confederaciones entre Alemania, antes de su unificación, e Italia, pudieron unirse en torno a una única lengua nacional y la reivindicación de un origen étnico común. Pero esa idea no podía aplicarse a la mezcla cultural que conformaba el Imperio austrohúngaro.

Universidades, institutos, museos, herbarios, redes de observación, editoriales y departamentos gubernamentales establecieron la climatología, la meteorología y la metáfora de la circulación atmosférica como la prueba científica de la «naturalidad» del imperio. En conjunto, se desarrolló una ciencia diseñada para demostrar la existencia de una interdependencia dinámica entre regiones con una inmensa diversidad topográfica, hidrográfica y botánica. El viento procedente de Austria traía consigo lluvias a la planicie húngara, y las nieves alpinas alimentaban las tierras del Danubio. En otras palabras, cada región proporcionaba algún elemento climático fundamental del que carecían las regiones vecinas.

Tales ideas impregnaron la sociedad y fueron recogidas por economistas como Emanuel Hermann, que consideraba la climatología como un modelo para el análisis espacial de la economía imperial. El concepto, a su vez, fue desarrollado por liberales como el socialdemócrata Karl Renner, quien argumentaba que, en realidad, la diversidad generaba unidad y

que el comercio crecía por medio del intercambio de mercancías sobrantes entre regiones. Implícita y explícitamente, las interdependencias climáticas se utilizaban para establecer las bases de la unidad política y económica en un alborotado imperio polígloa.

Muy ligado a ello, se insistía en estudiar el clima tanto a micro- como a macroescala. La topografía y la hidrografía de una región generan climas en áreas cuya extensión abarca desde escasos kilómetros hasta continentes, y buena parte del trabajo de la climatología consiste en integrar esas zonas tan diversas. Pero aquel énfasis en la escala nacía de una necesidad de unidad a nivel político, económico y social.

En primer lugar, los investigadores estudiaron las condiciones a escalas muy pequeñas con el fin de satisfacer necesidades económicas y aspiraciones políticas regionales. Más tarde estas se integrarían en un

marco imperial más amplio, en especial en los datos y mapas de la enorme colección de volúmenes *Climatography of Austria*, publicada entre 1904 y 1919, una descendiente mucho más detallada del tratado *Cosmos*, escrito en 1845 por el polímata alemán Alexander von Humboldt. En tal contexto, la política, lejos de entrometerse, estableció una lógica para desarrollar un tipo determinado de ciencia: descriptiva, dinámica y centrada en la interdependencia. Aquella labor investigadora fue el semillero de la climatología moderna. Después de que el imperio colapsara en 1918, catastróficamente debilitado por la Primera Guerra Mundial, la disciplina fue retomada por Alemania, Rusia, Austria, Gran Bretaña y Norteamérica.

Pero el complejo y reflexivo estudio de Coen trata muchos más aspectos. La historiadora analiza la manera en que el imperio promovió la popularización de la

ciencia, dirigiendo a expertos y apoyando la investigación a gran escala. Un enfoque que enfatizaba la utilidad patriótica, económica, cultural e incluso recreacional de la ciencia. Pero el hecho de que la climatología naciera a partir de un contexto de políticas y normativas, de las que nunca se alejó mucho durante su desarrollo, merece precisamente este tipo de estudio en un momento en el que lidiamos con las ramificaciones de la climatología actual.

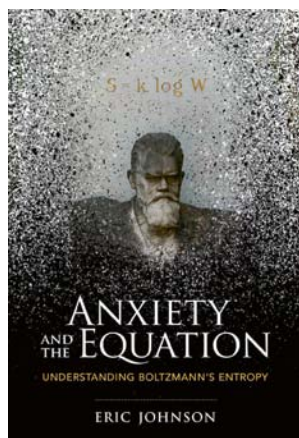
—Mott Greene

Departamento de Ciencias de la Tierra
y del Espacio
Universidad de Washington

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 559,
págs. 178-179, 12 de julio de 2018.

Traducido con el permiso
de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de **nature**



ANXIETY AND THE EQUATION
UNDERSTANDING BOLTZMANN'S ENTROPY

Eric Johnson
The MIT Press, 2018

**La entropía, o una
cuestión de ignorancia**

Un excelente ejercicio de divulgación sobre uno de los grandes protagonistas y una de las grandes ideas de la historia de la física

El 5 de septiembre de 1906, Ludwig Boltzmann —la estrella de la física teórica austríaca del momento— ponía fin a su vida durante unas vacaciones en el pintoresco pueblo de la costa adriática que años después inspiraría a Rainer Maria Rilke uno de sus mejores poemarios, las *Elegías de Duino*. El trágico suceso probablemente no sorprendió a los que mejor le conocían. Sus problemas psicológicos, agravados por múltiples achaques físicos, le habían perseguido durante décadas, llevándole ya a un intento de suicidio durante su breve período como profesor de la Universidad de Leipzig.

La muerte de Boltzmann es el punto de partida que Eric Johnson toma en *Anxiety and the equation* para embarcar al lector en un apasionante viaje que le permitirá

profundizar tanto en la atormentada personalidad del científico austríaco como en el significado físico de la entropía, uno de sus grandes logros intelectuales.

Para valorar la importancia de este resultado tenemos que viajar a los tiempos de la Revolución Industrial. El desarrollo y perfeccionamiento de las máquinas de vapor había puesto el estudio de los fenómenos térmicos en el centro del interés de científicos e ingenieros. El resultado fue la formulación de una nueva rama de la física, la termodinámica, basada en dos principios cuya validez era considerada universal.

El funcionamiento de una máquina térmica reside en la producción de trabajo mecánico a partir de calor. En 1842, Julius Robert von Mayer había propuesto que el calor no era más que una forma de

energía. Su intuición sería demostrada en una serie de experimentos realizados por James Prescott Joule durante la década de 1840, que además le permitieron medir el factor de conversión entre calor y trabajo mecánico. El primer principio de la termodinámica simplemente afirma que la energía total siempre se conserva. Por tanto, las máquinas térmicas transforman energía calorífica en energía mecánica con una cierta eficiencia.

El segundo principio, por otra parte, establece algo que nos es familiar: si ponemos en contacto dos objetos a diferente temperatura y no ejercemos ninguna acción sobre ellos, el calor siempre fluirá del cuerpo caliente al frío, nunca al revés. Rudolf Clausius dio en 1865 con una forma más general a este enunciado. Para ello introdujo una nueva magnitud física, la entropía, que junto con la energía caracterizaba el sistema. Así, el segundo principio de la termodinámica nos dice que, en un sistema aislado, la entropía nunca puede disminuir. Y, en particular, si el proceso es irreversible (como cuando diluimos sal en agua), la entropía siempre aumenta.

La formalización de la física de los fenómenos térmicos coincidió temporalmente con el debate sobre la realidad de los átomos. El atomismo tenía ya una larga historia, desde sus inicios en la Antigüedad, pasando por su importante papel durante la Revolución Científica a través de autores como Pierre Gassendi, Robert Boyle e Isaac Newton, y culminan-

do con su introducción en la química por John Dalton a principios del siglo XIX. La cuestión que se discutía ahora era si los átomos eran meros artificios teóricos, útiles para explicar heurísticamente algunas leyes físicas o químicas, o por el contrario existían como entidades físicas reales aunque inobservables. Este problema rebasaba los límites científicos para convertirse en una cuestión epistemológica. En el bando atomista militaban figuras de la talla de James Clerk Maxwell, Clausius y el propio Boltzmann. Los que negaban la existencia de los átomos, por su parte, contaban con personalidades como el químico Wilhelm Ostwald y una de las grandes figuras de la filosofía de la ciencia decimonónica, Ernst Mach.

Un aspecto que hacía interesante la termodinámica era que su validez parecía ser independiente de la estructura microscópica de la materia, algo que impresionaría al joven Albert Einstein. Pero si, como Boltzmann y otros afirmaban, los átomos realmente existían, debía ser posible deducir los principios de la termodinámica a partir de las leyes de la mecánica newtoniana, las cuales gobiernan el movimiento de los constituyentes fundamentales. De hecho, ya en el siglo XVIII, Daniel Bernoulli, uno de los pioneros de la teoría cinética de los gases, había interpretado la presión de un gas como el efecto de las colisiones de las moléculas que lo forman contra las paredes del recipiente, explicando además la ley de Boyle de los gases ideales.

La primera ley de la termodinámica podía ser fácilmente entendida en el contexto de la teoría cinética de la materia, dado que la conservación de la energía es un principio central de la mecánica clásica. La situación es mucho más complicada en el caso de la segunda ley, y en concreto en el de la entropía. El obstáculo radica en que, en la mecánica newtoniana, el tiempo no tiene ninguna dirección preferente: para revertir la evolución temporal de cualquier sistema mecánico basta con invertir simultáneamente las velocidades de todas las partículas que lo constituyen. El segundo principio de la termodinámica, sin embargo, establece una «flecha del tiempo» clara, la definida por el aumento de la entropía. ¿Cómo es posible, pues, obtener irreversibilidad a partir de la mecánica clásica?

Esta es la pregunta a la que *Anxiety and the equation* da respuesta. Utilizando ejemplos sencillos y en un estilo llano no exento de humor, el libro nos muestra paso a paso cómo Boltzmann consiguió

interpretar la entropía como una medida de nuestra ignorancia acerca de la configuración microscópica de un sistema físico. La aparente irreversibilidad termodinámica es meramente estadística, ya que los estados macroscópicos con alta entropía son mucho más probables que aquellos con entropía baja. Esto hace que las violaciones del segundo principio sean posibles, aunque altamente improbables. Observarlas requeriría esperar muchas veces la edad del universo. Este hecho dará lugar a un intenso debate entre Boltzmann y Ernst Zermelo, asistente por entonces de Max Planck en Berlín.

Para hacer la lectura de libro más amena y situar el problema en su contexto histórico, los capítulos dedicados a las ideas de Boltzmann sobre la entropía están intercalados con otros en los que el autor nos describe las vicisitudes científicas y vitales del protagonista. Así, a la vez que aprendemos conceptos como microestado y macroestado, o simplemente qué es un logaritmo, asistimos a los problemas de adaptación de Boltzmann a la encorsetada vida social y académica berlinesa, sus controversias con Zermelo o sus incisivas impresiones de la sociedad californiana en lo que él mismo llamó su «viaje a El Dorado».

La interpretación estadística de la entropía tiene una importancia radical en la física moderna, también en el mundo cuántico, de ahí la pertinencia de un libro que pone una idea tan central al alcance del gran público. Asimismo, ha encontrado su lugar en otros campos, como la teoría de la información. Por ejemplo, en la física de los agujeros negros, el famoso problema de la información se basa en la idea de que la «entropía de Bekenstein-Hawking», definida por el área del horizonte de sucesos de un agujero negro, es, en el espíritu de Boltzmann, una medida del número de sus estados microscópicos.

Anxiety and the equation es una buena muestra de cómo usar la historia de la ciencia como vehículo para la divulgación científica. No se trata de un libro de historia de la física ni de una biografía científica de Boltzmann. Es simplemente una estupenda obra de divulgación sobre un tema fascinante, en el que el lector también aprenderá sobre la vida, los logros y la tragedia personal de uno de los grandes nombres de la historia de la física.

—Miguel Á. Vázquez-Mozo
 Instituto Universitario de Física
 Fundamental
 Universidad de Salamanca

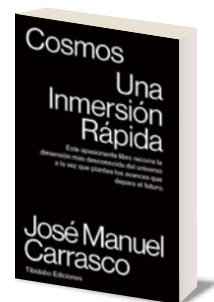
NOVEDADES

Una selección de los editores
 de *Investigación y Ciencia*



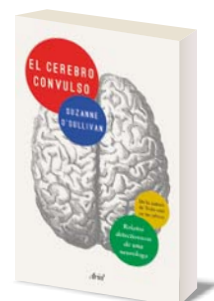
LOS FÓSILES DE NUESTRA EVOLUCIÓN
 UN VIAJE POR LOS YACIMIENTOS
 PALEONTOLÓGICOS QUE EXPLICAN
 NUESTRO PASADO COMO ESPECIE

Antonio Rosas
 Ariel, 2019
 ISBN: 978-84-344-2964-2
 304 págs. (20,90 €)



COSMOS
 UNA INMERSIÓN RÁPIDA

José Manuel Carrasco
 Tibidabo Ediciones, 2019
 ISBN: 978-84-9117-927-6
 180 págs. (15 €)



EL CEREBRO CONVULSO
 RELATOS DETECTIVESCOS
 DE UNA NEURÓLOGA

Suzanne O'Sullivan
 Ariel, 2019
 ISBN: 978-84-344-2967-3
 336 págs. (19,90 €)