

EL ORIGEN DE LA MENTE • VEINTICINCO AÑOS DE CIENCIA QUIMICA

INVESTIGACION y CIENCIA

NOVIEMBRE 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

Nanocircuitos
Nanotécnica en medicina
Nanotécnica y química

Leyes nanoescalares
Nanotécnica y robots
Nanomáquinas

NANOTECNICA

LA NUEVA INGENIERIA



SECCIONES

3

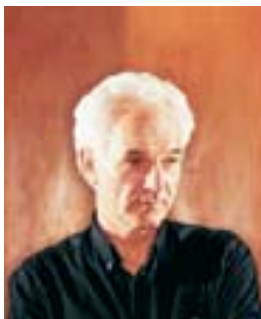
HACE...

50, 100 y 150 años.

19

PERFILES

Peter H. Duesberg:
¿Disidente o quijote?



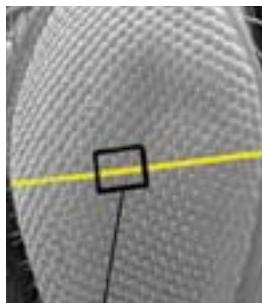
22

CIENCIA Y SOCIEDAD

Nobel de física...

Pino canario, ejemplo
de adaptación... Enfermedad
de Tangier... Identificación
genética de desaparecidos...

Drosophila melanogaster,
polaridad ocular.



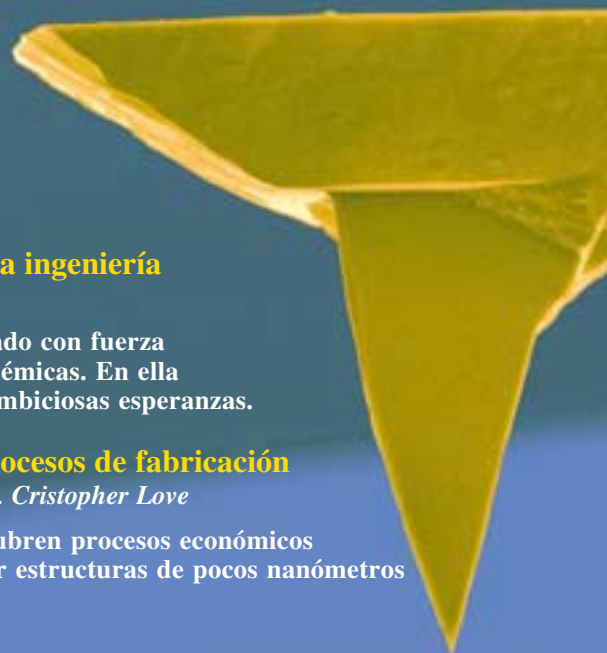
28

DE CERCA

Espuma marina.



ESPECIAL NANOTECNICA



30 Nanotécnica, la nueva ingeniería

Gary Stix

La nanotécnica ha entrado con fuerza en las instituciones académicas. En ella la industria ha puesto ambiciosas esperanzas.

36 Nanotécnica y sus procesos de fabricación

George M. Whitesides y J. Christopher Love

Los investigadores descubren procesos económicos y eficaces para construir estructuras de pocos nanómetros de anchura.

46 Leyes nanoescalares

Michael Roukes

Hay sitio sobrado para innovaciones prácticas nanoescalares. Pero antes será necesario comprender las leyes físicas que rigen la materia a escala nanométrica.

54 Nanocircuitos

Charles M. Lieber

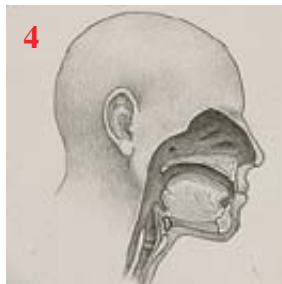
Se han construido ya nanotransistores y filamentos nanométricos. Falta encontrar ahora la manera de ensamblarlos.

62 Nanotécnica en medicina

A. Paul Alivisatos

La nanotécnica, en formas muy refinadas, acabará por introducirse en la investigación biomédica, el diagnóstico de enfermedades y en su terapéutica.

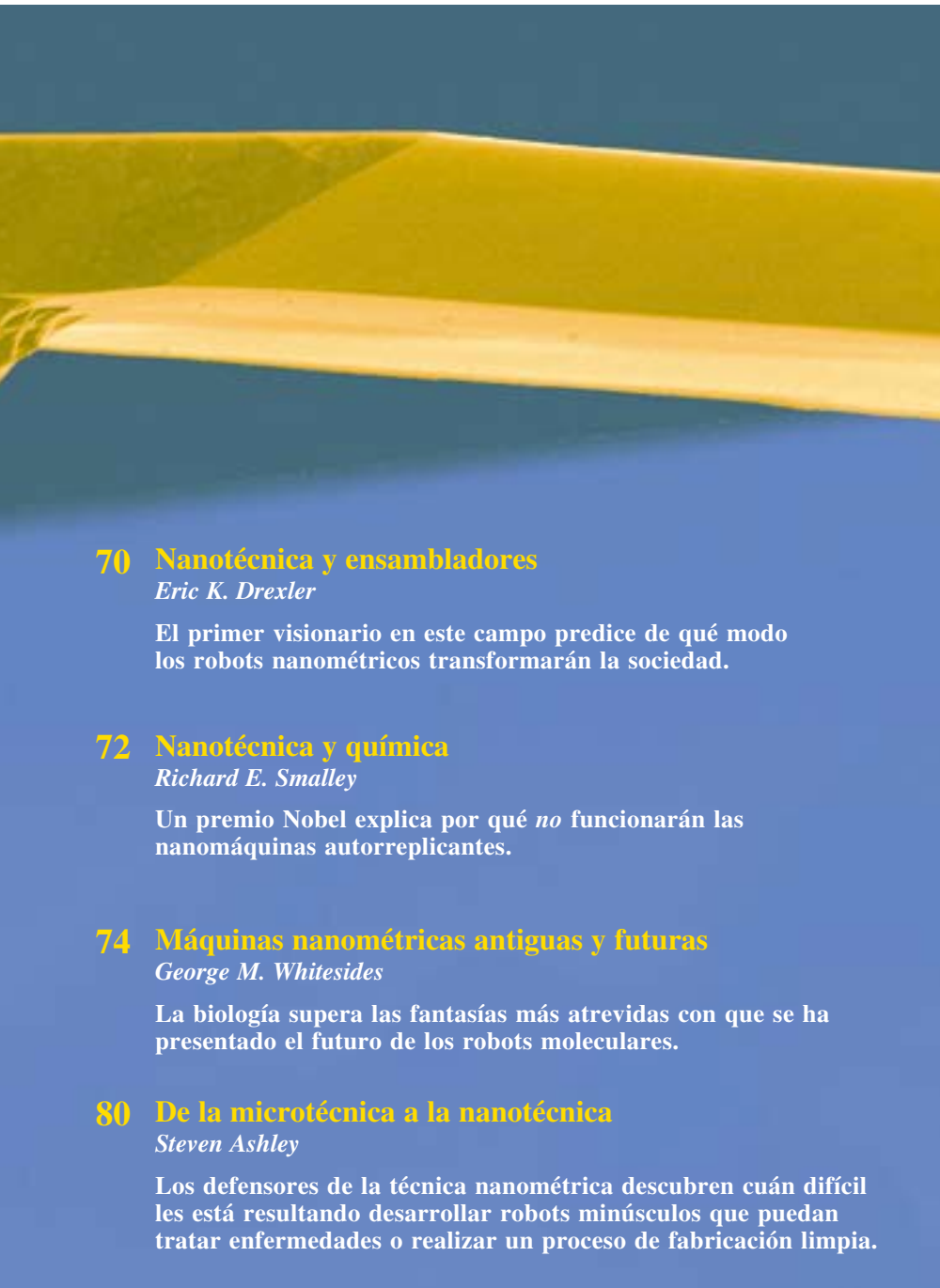
4



El origen de la mente

*Juan Luis Arsuaga Ferreras
e Ignacio Martínez Mendizábal*

Desde Darwin los evolucionistas vienen discutiendo sobre el origen de la consciencia y del lenguaje. Los huesos hioides desenterrados en el yacimiento de Atapuerca constituyen una pieza fundamental para explicar la adquisición del habla.



70 Nanotécnica y ensambladores

Eric K. Drexler

El primer visionario en este campo predice de qué modo los robots nanométricos transformarán la sociedad.

72 Nanotécnica y química

Richard E. Smalley

Un premio Nobel explica por qué *no* funcionarán las nanomáquinas autorreplicantes.

74 Máquinas nanométricas antiguas y futuras

George M. Whitesides

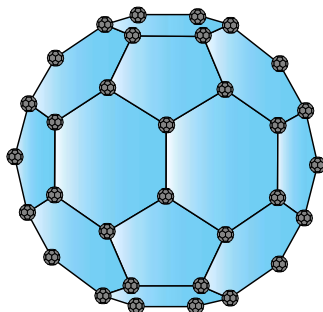
La biología supera las fantasías más atrevidas con que se ha presentado el futuro de los robots moleculares.

80 De la microtécnica a la nanotécnica

Steven Ashley

Los defensores de la técnica nanométrica descubren cuán difícil les está resultando desarrollar robots minúsculos que puedan tratar enfermedades o realizar un proceso de fabricación limpia.

14



Veinticinco años de ciencia química

Pere Molera

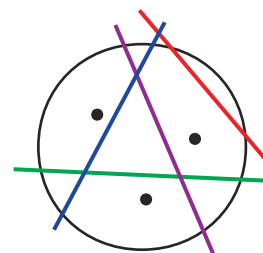
La evolución de la química se ha traducido en la obtención de nuevos elementos, en la producción limpia mediante la síntesis enantiomórfica selectiva y total, y en el desarrollo de supramoléculas y de nuevos materiales.

SECCIONES

82

JUEGOS MATEMÁTICOS

Las matemáticas del aprendizaje y la generalización, por Juan M. R. Parrondo



84

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Agilidad del gato, por Wolfgang Bürger



86

IDEAS APLICADAS

Tratamiento antipulgas, por Mark Fischetti

88

NEXOS

Que empiece el espectáculo, por James Burke

90

LIBROS

Tiempo... Solitones... Física y química de la atmósfera... Aritmética comercial.

96

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Baile de cuadros, por Dennis E. Shasha



Portada: Felice Frankel

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez
6-8	Cortesía de Madrid Scientific Films
9	Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez
10-11	Cortesía de Madrid Scientific Films
12	Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez
14-18	Pere Molera
31	Felice Frankel y J. Christopher Love
32	Scientific American Library ©1982 con permiso de W. H. Freeman and Company
33	Nina Finkel
35	Nanophase Technologies
36	Felice Frankel y Kateri E. Paul, cortesía de George M. Whitesides
39-44	Bryan Christie
47	M. J. Murphy, D. A. Harrington y M. L. Roukes, coloreado por Felice Frankel
49	K. C. Schwab, E. A. Henriksen y M. L. Roukes
50	B. J. Van Wees; Nina Finkel (<i>diagrama</i>)
51	Joe Munroe, cortesía de Caltech Archives
52	T. A. Fulton y G. J. Dolan; Bryan Christie (<i>dibujos</i>)
53	D. A. Harrington y M. L. Roukes
54	Felice Frankel y Yu Huang
57	Slim Films
58	Bryan Christie
60	Slim Films
62	Felice Frankel, K. F. Jensen, M. G. Bawendi, C. Murray, C. Kagan, B. Dabbousi y J. Rodríguez-Viego
65	Jeff Johnson
66	Shuming Nie
69	Jeff Johnson
71	Peter Menzel
73	Pam Francis
75	Jeff Johnson
76	Baldor Electric Company; David DeRosier, ©2000 Instituto Americano de Física (<i>micrografía</i>)
78	Jeff Johnson
79	Michael S. Yamashita
80-81	James Steinberg
82-83	Juan M. R. Parrondo
84-85	Axel Weigend (<i>dibujos</i>); Born, Universität Duisburg (<i>fotografía</i>)
86-87	George Retseck
96	Johnny Johnson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Leyes nanoescalares, Nanocircuitos y Aventuras problemáticas*;
Juan Pedro Campos: *Nanotécnica en medicina*; J. Vilardell: *Nanotécnica y ensambladores, Nanotécnica y química, Hace... e Ideas aplicadas*; Juan Pedro Adrados: *Máquinas nanométricas antiguas y futuras y De la microtécnica a la nanotécnica*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)

Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

MANAGING EDITOR Michelle Press

ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler

EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell,

Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson

PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:

Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

Copyright © 2001 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2001 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

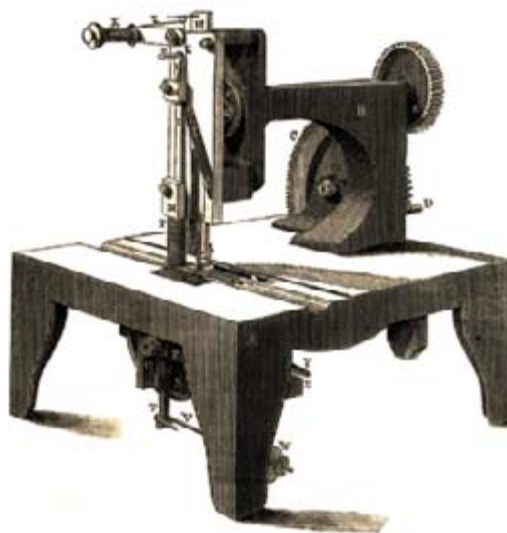
NIÑO POBRE, NIÑO ENFERMO. «En Gran Bretaña una encuesta sobre la salud infantil descubrió que la alta mortalidad guardaba una manifiesta relación con tres de las grandes aflicciones de los pobres: altas tasas de nacimientos prematuros, neumonía y gastroenteritis. Aunque todos los grupos socioeconómicos han mostrado descensos apreciables en la mortalidad infantil desde 1939, donde más se ha notado la mejora es en las categorías más acomodadas; así, los avances médicos de la última década han ensanchado la brecha. En todos los grupos la principal causa de muerte durante el primer mes es el nacimiento prematuro. Se sugiere que ese exceso se debe al parto en edad precoz, nacimientos poco espaciados, cuidados prenatales deficientes y exceso de trabajo durante el último mes del embarazo.»

BACTERIAS PÚRPURAS. «Estudiando las respuestas de las células a estímulos sencillos podemos aclarar el comportamiento de organismos más complejos. La bacteria púrpura *Rhodospirillum* reacciona de un modo muy claro ante la luz. Ese microorganismo, de forma de sacacorchos, puede nadar hacia adelante y hacia atrás con igual facilidad. Cuando baja la iluminación ambiente, se limita a invertir el sentido de su desplazamiento. Si todos los sistemas vivos excitables poseen un mecanismo físico común para la irritabilidad (o sea, la reacción ante un cambio en el entorno), las relaciones esenciales entre estímulo y reacción deberán ser las mismas en cada caso. Por tanto, debe ser de sumo interés comprobar si las reacciones de las bacterias púrpuras son cuantitativamente similares a las de las fibras nerviosas. — Roderick K. Clayton y Max Delbrück»

...cien años

UN HITO AERONÁUTICO, TAL VEZ. «El comité responsable del premio Deutsch decidió el 4 de noviembre concedérselo a M. Santos-Dumont por su logro del 19 de octubre: su vuelo en dirigible alrededor de la Torre Eiffel. Si bien M. Santos-Dumont ha ejecutado una proeza notable, ello no supone necesariamente que haya realizado nada de gran valor. Ha demostrado que, con un aparato muy costoso y delicado, un aeronauta experto puede, bajo condiciones favorables, elevarse desde un punto dado, dibujar un círculo y volver, sin matarse. El acontecimiento, pese a lo agradable, no señala un paso adelante hacia la consecución práctica de la navegación aérea. Probablemente la solución para el vuelo aéreo de interés comercial nunca se alcanzará hasta que se abandone la idea del globo dirigible y sea sustituida por la de un mecanismo construido sobre bases estrictamente mecánicas.»

¿PRIMER PERISCOPIO NÁUTICO? «Un ingeniero italiano, el señor Triulzi, ha concebido un instrumento especial, el 'cleptoscopio', que permite a la tripulación de un buque submarino sumergido averi-



Máquina de coser SINGER, 1851

guar lo que pasa en la superficie. Consta de un tubo dotado con prismas de vidrio. Se efectuaron experimentos a bordo del submarino *Il Delphino* en presencia del ministro de Marina italiano. Se obtuvieron con éxito fotografías de objetos en la superficie. [Nota de la redacción: La invención del periscopio, en 1902, suele atribuirse a Simon Lake.]»

...ciento cincuenta años

LA MÁQUINA DE COSER DE SINGER. «En el grabado adjunto se ilustra la máquina de coser de Isaac M. Singer, patentada el 8 de agosto pasado. Las puntadas se ejecutan mediante dos hilos, uno facilitado por una lanzadera y el otro por la aguja. Sin dos hilos, hasta ahora ninguna máquina de coser ha dado buenas puntadas. Esta máquina trabaja bien. [Nota de la redacción: Hacia 1913 las ventas anuales de máquinas de coser Singer llegaban a 2,5 millones.]»

REVÓLVERES COLT. «Carta a la Redacción. 'Muy señor mío: Mucho se ha dicho últimamente acerca de la pretensión del señor Colt sobre la invención de la pistola revólver; quizás arrojemos luz sobre el tema si le decimos que en el año 1822, para un caballero de nombre Collier, hicimos los cañones de 200 mosquetes y 200 pistolas basándonos precisamente en los mismos principios que los expuestos por el señor Colt. —John Evans e Hijo, Londres.' Respuesta de la Redacción: 'No es infrecuente reclamar un origen inglés para muchos inventos norteamericanos. No creemos lo anterior; sin duda, el señor Colt es un inventor original.' [Nota de la redacción: Es probable que Samuel Colt realmente viera y copiara algunas características de la pistola de pedernal de 1818 de Elisha Collier en su pistola de 1836.]»

El origen de la mente

Desde Darwin los evolucionistas vienen discutiendo sobre el origen de la consciencia y del lenguaje. Los huesos hioides desenterrados en el yacimiento de Atapuerca constituyen una pieza fundamental para explicar la adquisición del habla

Juan Luis Arsuaga Ferreras e Ignacio Martínez Mendizábal

Charles Darwin y Alfred Russell Wallace concibieron de forma independiente la teoría de la evolución a través de la selección natural. Ambos creyeron posible explicar el origen de las especies por medio de ese mecanismo. Pero mientras Darwin llevó la teoría hasta su última consecuencia, Wallace se detuvo a un paso del final.

La última consecuencia no era otra que el origen de las capacidades cognitivas. Para Darwin se trataba de un producto más de la selección natural, en tanto que Wallace atribuía su origen a una intervención externa, divina según parece. La mente sería para Darwin una función del cerebro, mientras que Wallace la consideraba una entidad totalmente diferente, con un substrato no material.

Pese a su adscripción evolucionista, son muchos los que siguen viendo algo especial en el origen de nuestras facultades superiores. Darwin fundaba la aparición de órganos nuevos en la lenta acumulación de muchos cambios pequeños a lo largo de dilatados períodos de tiempo. En *El origen de las especies* escribió: “La psicología se basará seguramente sobre los cimientos, bien echados ya por míster Herbert Spencer, de la necesaria adquisición gradual de cada una de las facultades y aptitudes mentales. Se proyectará mucha luz sobre el origen del hombre y sobre su historia”. En cambio, los autores modernos en

línea con los planteamientos de Wallace afirman que la mente humana, simbólica y consciente, se originó de modo súbito. Tan extraordinario fenómeno se habría producido cuando surgió nuestra especie, o aun después (según Richard Klein al menos 50.000 años más tarde).

Noam Chomsky, pese a defender la existencia de un “órgano para el lenguaje” en el cerebro humano, niega que ese “órgano” haya surgido por selección natural. Para Stephen Jay Gould y Ian Tattersall la mente y el lenguaje no son producto de la selección natural ordinaria, sino un efecto colateral de la evolución. El cerebro se habría desarrollado en los homínidos para cumplir misiones diferentes de las funciones que luego asumió en nuestra especie. Una explicación parecida ofrece Steven Mithen con su teoría de una inteligencia que primero es modular (o sea, compartimentada) y luego se vuelve fluida (unificada y global) en el *Homo sapiens* moderno.

Otros autores, así Lewis Bidford o Clive Gamble, no conceden a las especies fósiles diferentes de la nuestra (los neandertales, por ejemplo) la capacidad de manejar símbolos, ni siquiera la de planificar el futuro a medio plazo.

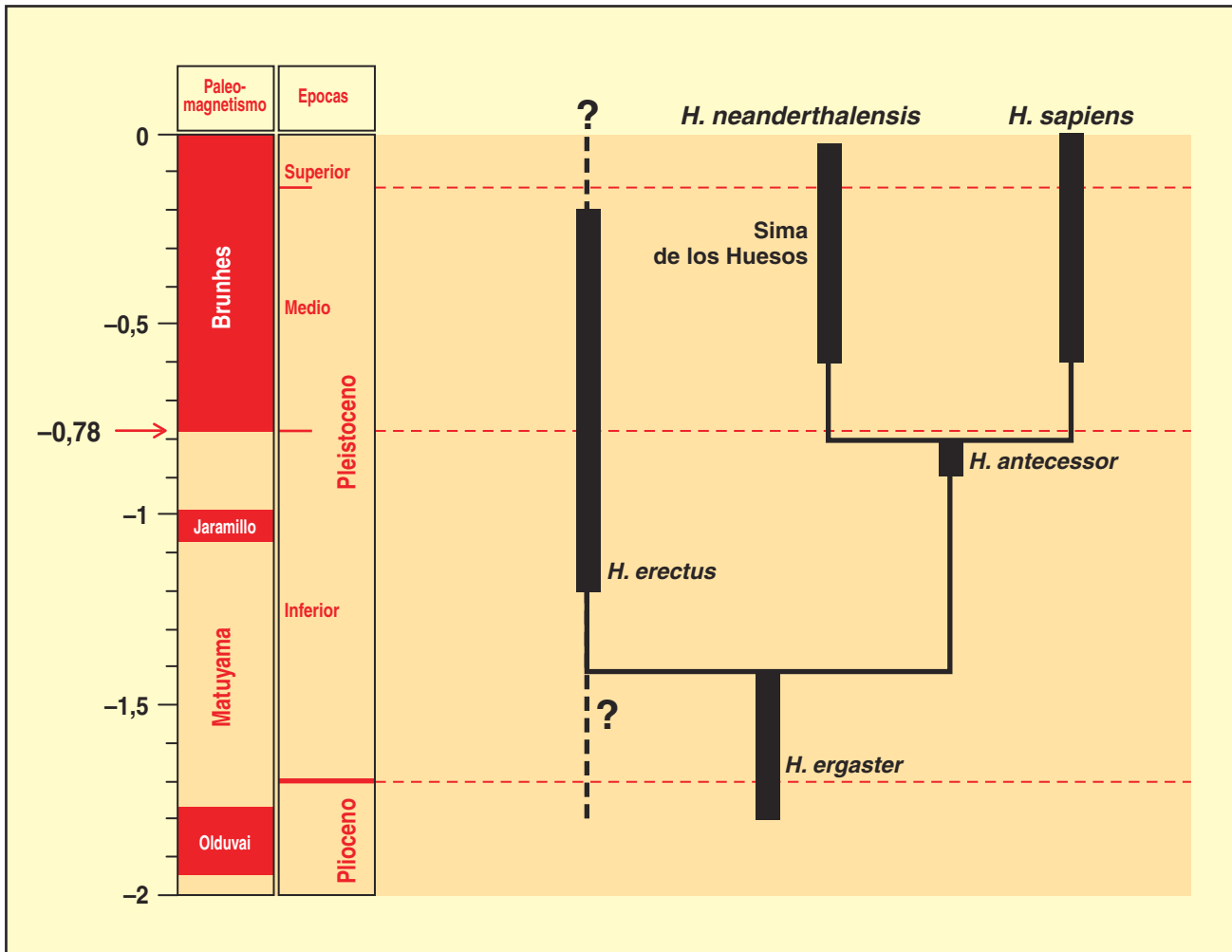
Nosotros creemos, por el contrario, que la hipótesis darwinista de la adquisición gradual de las facultades superiores no carece de apoyo. Nos basamos en la interpretación de los datos suministrados por la arqueología, o pruebas indirectas, y por la anatomofisiología, o pruebas directas.

Los primeros utensilios de piedra se remontan a hace 2,5 millones de años. De algo más de 1,5 millones de años hay hachas líticas, simétricas. Ejemplos inequívocos del uso general del fuego se fechan en un cuarto de millón de años. Los neandertales lo dominaban; podían, pues, encenderlo y mantenerlo especies sin nuestro desarrollo cerebral.

Avancemos hasta las primeras expresiones de arte y adorno personal, el nivel de las formas simbólicas. Los primeros testimonios que no ofrecen dudas de interpretación tienen 35.000 años. A mayor

Los autores

JUAN LUIS ARSUAGA e IGNACIO MARTINEZ MENDIZABAL son paleontólogos. Arsuaga, catedrático de paleontología de la Universidad Complutense de Madrid, dirige el equipo de investigación de los yacimientos cuaternarios de la Sierra de Atapuerca. Martínez, docente de la Universidad de Alcalá de Henares, es miembro del equipo de Atapuerca. Ambos investigadores han abordado en diversos trabajos el problema del origen del lenguaje y de las capacidades mentales modernas.



1. ARBOL EVOLUTIVO DEL GENERO HOMO. A partir de la especie africana *Homo ergaster* la evolución humana se escindió en dos líneas. Una, exclusivamente asiática, es la de *Homo erectus* (en sentido estricto) y la otra incluye el linaje de los neandertales y el de los humanos modernos. Los neandertales proceden de una evolución lo-

cal europea a partir de una población fundadora de *Homo antecessor*, oriunda de África, y a través de formas intermedias como la representada por la población de la Sima de los Huesos. Nuestra propia especie se originó a partir de la población de *Homo antecessor* que permaneció en África.

abundamiento, los neandertales enterraban en ocasiones a sus muertos. Nosotros retrotraemos ese tipo de expresión simbólica mucho más atrás; en la Sima de los Huesos, un yacimiento de hace 300.000 años de la Sierra de Atapuerca, se produjo una acumulación intencionada de una treintena de cadáveres. Por último, la paleoeconomía de hace medio millón de años corrobora que los homínidos no pertenecientes a la especie *Homo sapiens* moderno estaban capacitados para organizarse y planificar sus actividades.

La investigación anatomofisiológica nos permite abordar de un modo directo el problema de la adquisición de las facultades mentales. Aunque no se trata de una opinión compartida, sobre todo en las conclusiones, vale la pena ensayar esa vía. ¿Qué se puede decir, a partir de los fósiles, sobre la evolución del cerebro y del aparato fonador, responsable del lenguaje articulado?

Paleontología del cerebro

Por ser parte blanda el cerebro no fosiliza. El endocráneo retiene, sin embargo, la forma del encéfalo. En las paredes del cráneo quedan también grabados algunos de los relieves de la superficie cerebral. ¿Qué información aportan? Pese a la abundancia de restos, es muy poco lo que se ha conseguido averiguar.

Dean Falk y otros han estudiado los moldes endocraneales de homínidos sudafricanos pertenecientes a la especie *Australopithecus africanus* (la mayoría comprendidos entre 3 y 2,5 millones de años). Aunque el volumen de estos encéfalos (con una media de 450 centímetros cúbicos) es ligeramente mayor que el de los chimpancés (media de 390 cc) y algo inferior que el de los gorilas (media de 500 cc), la organización cerebral parece ser bastante diferente. En los australopitecos se observa, respecto de chim-



pancés y gorilas, una expansión del sector orbital del lóbulo frontal y del polo anterior del lóbulo temporal. Estas regiones guardan en el cerebro humano relación con algunas de las funciones denominadas superiores; la parte anterolateral del lóbulo temporal, por ejemplo, se activa cuando se reconocen y nombran caras conocidas.

Dos regiones del cerebro asociadas al lenguaje humano son el área de Broca y el área de Wernicke. Ambas han sido localizadas en algunos de los primeros fósiles del género *Homo*, de alrededor de 1,8 millones de años. Ahora bien, lo mismo que en el caso anterior del lóbulo temporal, ésta es una prueba muy débil en favor de un cerebro funcionalmente evolucionado. Algo similar debe decirse de la asimetría del cerebro humano, rasgo que se ha detectado en fósiles muy anteriores a los primeros fósiles de características modernas: no hay pruebas tajantes de la asociación entre asimetría cerebral y presencia de lenguaje.

¿Qué decir del volumen encefálico? Existe una fórmula alométrica que relaciona el peso (o el volumen) del encéfalo con el peso corporal; se expresa por la función $y = bx^a$, donde x es el peso corporal e y representa el peso cerebral. Es fácil calcular los valores de los coeficientes a y b a partir de un conjunto de especies, tal como hizo Robert Martin para los mamíferos (véase “Capacidad cerebral y evolución humana”, por Robert D. Martin, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1994). Cuando se sustituye en la ecuación la incógnita x por el peso corporal de un ser humano se obtiene un valor de y (peso cerebral) que resulta ser muy inferior al real. Eso quiere decir que los humanos estamos mucho más encefalizados de lo normal (para ser mamíferos). El

2. LA SIERRA DE ATAPUERCA se encuentra muy cerca de la ciudad de Burgos. Es un monte de extraordinaria importancia en los estudios de prehistoria. En sus entrañas conserva el más completo registro fósil de Eurasia, que nos permite investigar la evolución de los ecosistemas y de los seres humanos a lo largo del último millón de años. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)

cociente entre peso real del encéfalo de una especie de mamífero y el que le “correspondería” según la ecuación se denomina cociente de encefalización (EQ). En nuestra especie alcanza el mayor valor de todos los conocidos (EQ = 5,4). Nos siguen los chimpancés, nuestros parientes más cercanos, con un cociente de encefalización de 2,3. Como grupo, los primates llamados “superiores” (platirrinos y catarrinos) aparecen más encefalizados que el resto de los mamíferos, con la excepción nada sorprendente de los delfines.

Podemos pensar en calcular coeficientes de encefalización de los homínidos fósiles, siempre que tengamos un registro lo bastante bueno como para estimar con fiabilidad los pesos encefálico y corporal. Pero surge un problema cuando se trabaja con los niveles taxonómicos inferiores: el peso del encéfalo y el del cuerpo no siguen ninguna relación lógica; por ejemplo, el cerebro de un mastín es, en proporción, menor que el de un caniche, sin que por ello se muestre menos capaz. Con el gorila asistimos a una curiosa paradoja: pese a dar un valor muy bajo de encefalización (la mitad que un chimpancé), su grado de inteligencia no es menor que el de los chimpancés. Y puesto que todas las especies de homínidos se hallan estrechamente emparentadas cabe cuestionarse la utilidad del enfoque alométrico.

De esa dificultad puede salirse si atendemos a la filogenia (las relaciones evolutivas entre especies). Chimpancés, gorilas y humanos compartimos un antepasado común que vivió hace unos seis o siete millones de años. Debía de ser éste de la talla de un chimpancé actual, que por otro lado es aproximadamente la misma de los primeros homínidos. Chimpancés y primeros homínidos eran más frugívoros (comedores de frutos) que folívoros (comedores de hojas y tallos). En nuestra opinión, los gorilas se volvieron folívoros para aprovechar un recurso muy abundante, lo que les permitió aumentar el peso corporal, pero su cerebro no creció en la misma medida (aunque, como a fin de cuentas el cerebro es un órgano del cuerpo, algo aumentó al hacerse el cuerpo tres veces mayor). Semejante desarrollo dispar puede atribuirse a la enorme inversión energética que requieren la producción y el mantenimiento del cerebro; sólo crece cuando es absolutamente necesario. Por ese motivo los gorilas tienen un cociente de encefalización bajo, sin merma de su inteligencia.

No parece que los australopitecos (EQ en torno a 2,4) alcanzaran un grado de encefalización mucho mayor que los actuales chimpancés, de talla similar también. Se admite que hubo cierta expansión del cerebro, sin cambio en la talla, hace entre 2,5 y 2 millones de años. Esta ganancia encefálica neta podría ir acompañada de un progreso en inteligencia, vinculada a la aparición de las primeras formas del género *Homo*.

Homo ergaster, una especie africana y asiática (encontrada también en la georgiana Dmanisi), surgió hace poco menos de dos millones de años. Presentaba aumentados su encéfalo y su cuerpo, que alcanzó el porte del nuestro. Como resultado del crecimiento a la vez encefálico y corporal, el cociente encefálico no cambió respecto de los primeros representantes de *Homo* (EQ de aproximadamente 2,7). ¿Aumentó su inteligencia? No se sabe. Pero fue el autor de los primeros bifaces. Quizás el crecimiento del encéfalo (con una media cercana a los 900 cc) fue mucho más allá de lo que correspondería a un

simple cambio de tamaño corporal. La altura era, sin duda, como la nuestra, mas para certificar la anchura del cuerpo necesitaríamos disponer de una cadera bien conservada.

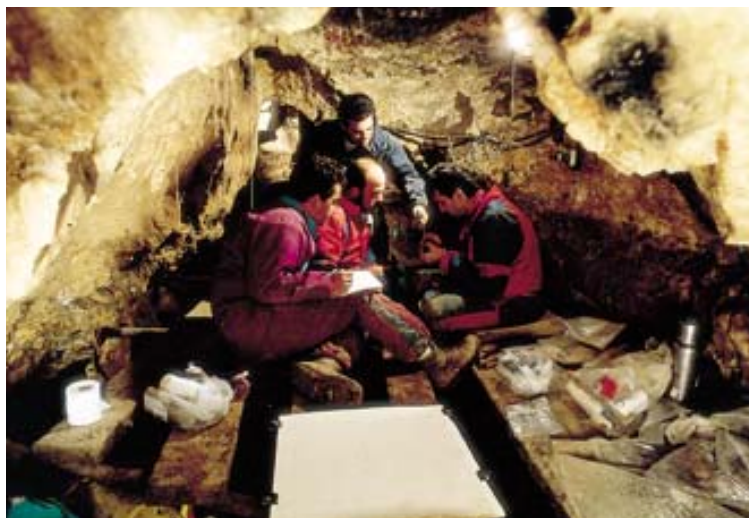
El yacimiento de la Sima de los Huesos nos ha proporcionado una pelvis muy completa de *Homo heidelbergensis* macho cuya estatura alcanzaría unos 176 cm. Por otros restos no tan completos hallados allí sabemos que se trataba de un varón cercano al promedio. La pelvis presenta una robustez y una anchura mucho mayores que la de cualquier varón actual, de modo que el peso del individuo debía superar los 90 kilogramos. Aunque el peso corporal de las mujeres de la Sima de los Huesos sería menor, hemos encontrado que la diferencia entre los sexos no era entonces mayor que ahora.

El esqueleto recuperado en Jinniushan (China), de antigüedad parecida, muestra características similares. Alan Walker y Chris Ruff creen que la anchura de caderas de *Homo ergaster* era como la nuestra, basados en la reconstrucción, a nuestro juicio errónea, que hicieron del esqueleto de un niño de hace 1,6 millones de años encontrado en Nariokotome (Kenia).

En la población de la Sima de los Huesos el volumen del encéfalo varía entre 1100 cc y casi 1400 cc. Es probable que la media estuviera por debajo del hombre moderno, cifrada entre 1300 cc y 1400 cc (varía con las poblaciones). Pero como el peso del cuerpo era muy superior al de nuestra especie, el cociente de encefalización se hallaría sólo en torno a 3,5.

Más recientemente, hace entre 200.000 y 100.000 años surgieron dos especies humanas que han coexistido hasta hace menos de 30.000 años: los neandertales y nosotros. En ambas líneas se produjeron aumento del encéfalo y reducción del peso corporal. En el caso de los neandertales, la estatura se redujo porque antebrazos y tibias se acortaron en un proceso de adaptación al frío, un fenómeno que se observa también en las poblaciones humanas actuales. Nuestra especie conservó la estatura alta

3. ENCLAVADA en el interior de la cueva mayor de la Sierra de Atapuerca, la Sima de los Huesos es el yacimiento más rico en fósiles humanos del planeta. Aquí se han encontrado, hasta 1999, cerca de 3000 fósiles humanos de una antigüedad próxima a los 300.000 años. Los restos corresponden a una treintena de individuos de todas las edades y ambos sexos, que pertenecieron a una población antecesora de los neandertales. Este hallazgo extraordinario permite, por primera vez en la historia de la paleoantropología, estudiar un grupo humano. La hipótesis considerada por los investigadores del equipo de Atapuerca como la más plausible para explicar el origen de tal acumulación de cadáveres es la de una práctica funeraria, la más antigua conocida. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)



4. LA PELVIS I de la Sima de los Huesos es la mejor conservada del registro fósil de los homínidos. El estudio de su morfología permite determinar la mecánica del parto y la biomecánica de la locomoción en los homínidos de la Sima de los Huesos. Merced a ella podemos reconstruir la forma del cuerpo y, junto con otros restos fósiles del esqueleto de las piernas, estimar con gran rigor el peso del cuerpo. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)



pero estrechó las caderas, en una adaptación biomecánica que aproxima entre sí las cabezas de los dos fémures y permite economizar energía en cada paso, aunque, entre otros inconvenientes, dificulta el parto.

En las dos líneas evolutivas, neandertales y “cromañones”, se asiste a un aumento del cerebro con disminución del tamaño del cuerpo. La encefalización fue mayor en los neandertales, mientras que la pérdida de peso del cuerpo se notó más en los estrechos “cromañones”, razón por la cual los segundos revelan un cociente de encefalización superior (5,3 frente a 5).

Ese proceso de encefalización se produjo, nos lo revela el registro fósil, de una manera gradual. Y si encefalización no es sinónimo obligado de mayor

inteligencia, ¿podría hallarse la clave de ésta en el habla?

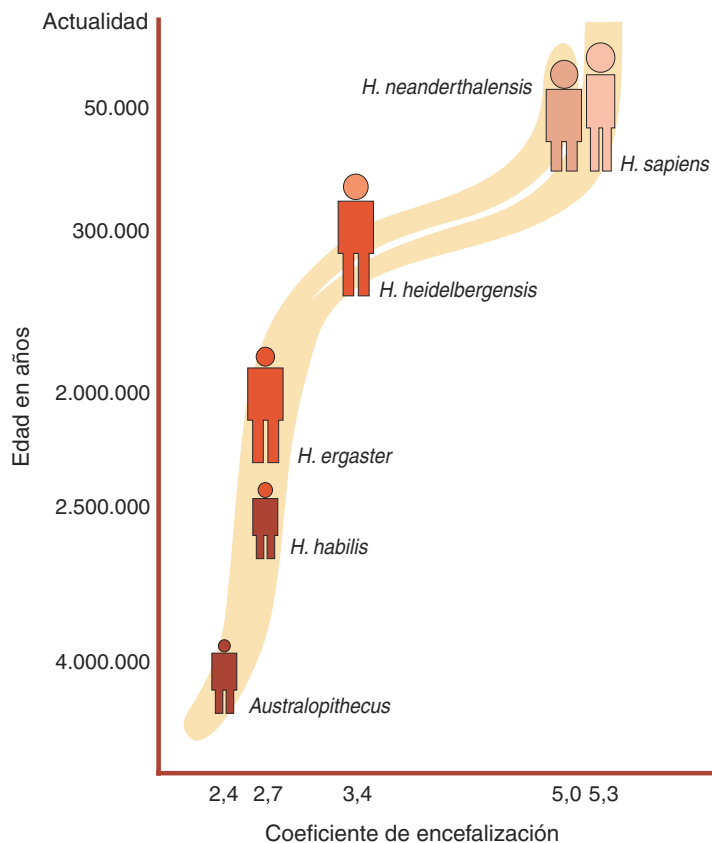
El origen del habla

Entre las características que nos distinguen del resto de los mamíferos destaca la anatomía de nuestras vías aéreas superiores, en particular la posición peculiar de la laringe en el cuello. La laringe es una caja formada por cartílagos que se encuentra justo a la entrada de la tráquea. El mayor de estos cartílagos, el tiroideos, está situado en la parte anterior de la laringe y forma la protuberancia que llamamos nuez o bocado de Adán. La laringe alberga las cuerdas vocales, fuente emisora de los sonidos.

Entre la orofaringe y la laringe de las personas adultas queda un intervalo libre, el espacio supralaríngeo, que es una vía común al tubo respiratorio y al tubo digestivo; por ese tracto transitan el aire hacia la laringe y el alimento y los líquidos hacia el esófago. El espacio supralaríngeo resta eficacia al desempeño de algunas de las funciones de las vías aéreas superiores. Además, hace menos eficiente el mecanismo que impide que el alimento se introduzca en el tubo respiratorio, con el consiguiente riesgo de atragantamiento. También hemos perdido la capacidad de respirar por la nariz mientras bebemos. La posibilidad de respirar al tiempo que se traga un líquido es fundamental para la lactancia. Por ello, nuestros bebés tienen la laringe alta en el cuello, en la misma posición que el resto de los mamíferos, y pueden mamar sin necesidad de interrumpir la res-



5. EL CRANEO 5 fue hallado en 1992 en el yacimiento de la Sima de los Huesos. La mandíbula apareció al año siguiente. Se trata del cráneo fósil más completo del registro mundial; corresponde a un individuo adulto. Sobre el maxilar izquierdo se observan las trazas de un proceso infeccioso que pudo derivar en una septicemia grave. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)



6. CAMBIOS EN EL COEFICIENTE de encefalización (EQ) a lo largo de la evolución humana. El término *Homo heidelbergensis* se utiliza aquí en el sentido más amplio, que incluye tanto a fósiles europeos como africanos del Pleistoceno medio. Los primeros son antepasados de los neandertales y los segundos de nuestra especie, aunque en la época del yacimiento de la Sima de los Huecos las diferencias eran todavía muy pequeñas y no afectaban al EQ.

establecieron las conclusiones que durante más de veinte años predominaron en ese campo.

Señalaron, en primer lugar, una serie de rasgos anatómicos en los que la base del cráneo de los humanos recién nacidos y la de los chimpancés, cuyas laringes están situadas altas en el cuello, eran muy similares entre sí y diferentes de la morfología de la base del cráneo de los humanos adultos. En esencia, estos rasgos, comunes a humanos recién nacidos y chimpancés, eran los siguientes: base del cráneo poco flexionada entre el final del paladar óseo y el *foramen magnum*; extensa orofaringe, es decir, un amplio espacio situado detrás del paladar duro, y marcada separación entre los huesos basioccipital y vómer. Rasgos que, advirtieron, iban cambiando en el curso del crecimiento hasta alcanzar la morfología típica de los adultos, a la vez que descendía la situación de la

piración. En principio, para el adulto resultaría ventajoso respirar mientras bebe, ya que reduce considerablemente el tiempo dedicado a este menester, que suele ser una situación delicada y expuesta a los depredadores.

¿Por qué se perdió, en el curso de la evolución, semejante capacidad tan vital? Darwin admitía que, cuando se trataba de órganos que desempeñaban varias funciones, la selección natural podía especializarlos en una, aun a costa de disminuir su eficacia en el cumplimiento de las demás tareas, si con dicha especialización aumentaban las posibilidades de supervivencia. La especialización de las vías aéreas superiores humanas, con su laringe baja y su amplio espacio supralaríngeo, favorece una de sus funciones: la producción de la amplia gama de sonidos en los que se basa nuestro lenguaje. Parece evidente que la facultad de hablar, esto es, de comunicarse eficazmente, compensa con creces tanto la pérdida de la capacidad de beber y respirar al mismo tiempo, como el riesgo de atragantarse.

Pero la laringe, formada por cartílagos y sostenida por músculos, no fosiliza. Ahora bien, ciertas estructuras óseas relacionadas con ella sí se conservan fósiles. Se trata de la base del cráneo y del hueso hioides.

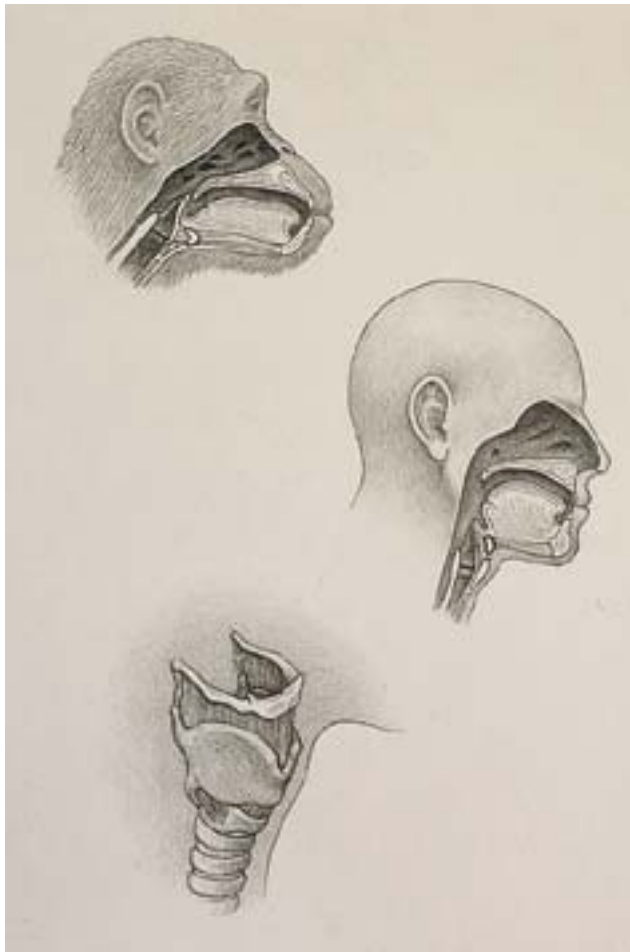
Hasta hace algo más de una década no se conocía ningún hueso hioides fósil de homínido. La investigación debía, pues, centrarse en la anatomía de la base del cráneo. Edmund Crelin, Jeffrey Laitman y Philip Lieberman, trabajando juntos o por separado,

laringe en el cuello. Asociaron la posición de la laringe con dichas características anatómicas.

De la investigación sobre fósiles dedujeron que la laringe de los primeros homínidos (*Australopithecus afarensis*, *Australopithecus africanus*, *Homo habilis* y *Paranthropus*) ocupaba la misma posición que en los chimpancés, razón por la cual aquéllos y éstos desarrollarían similares capacidades lingüísticas. Por otra parte, en fósiles del Pleistoceno medio de África (Broken Hill) y Europa (Steinheim) encontraron una anatomía basicraneal mucho más próxima a la de los humanos modernos adultos, de la que podía inferirse una posición baja de la laringe.

Fundados en esos resultados, expusieron que la evolución habría seguido dos líneas. En la que llegaba hasta nosotros, el aparato fonador habría sufrido sólo ligeros “retoques”, que lo habrían perfeccionado. En la otra línea, el aparato fonador habría experimentado un proceso de regresión hasta una anatomía convergente de nuevo con la de los chimpancés. A esta rama pertenecerían los neandertales.

Para justificar la pérdida neandertal de la capacidad del habla, aducían que sus vías aéreas superiores habrían cambiado con el fin de especializarse en la función de calentar y humedecer el frío y seco aire de la Europa glacial. Habrían sacrificado una facultad incipiente y quizá todavía no muy importante, el habla, ante una presión de selección más apremiante, la de poder respirar y seguir viviendo. Pero los cráneos neandertales estudiados por Laitman, Crelin y Lieberman conservaban sólo parte de sus



7. ESQUEMA DE LA LARINGE, las vías aéreas superiores de un chimpancé y un humano moderno. La parte anterior de la laringe está constituida por el cartílago tiroideo, que forma una protuberancia en el cuello, fácil de distinguir ("nuez" o "bocado de Adán"). En el interior de la laringe se encuentran las cuerdas vocales. La epiglotis es un cartílago con forma de cuchara situado por encima de la laringe y que actúa como una lengüeta, cerrando a los alimentos el paso a la laringe. En las personas adultas la laringe se halla en una posición baja en el cuello, que es la base anatómica de nuestro lenguaje oral. (Cortesía de Madrid Scientific Films.)

autores, una inferencia arriesgada. Máxime cuando no ha sido posible establecer ninguna relación funcional entre la anatomía del hioides y la posición de la laringe, el aspecto más determinante de nuestro aparato fonador.

Así las cosas, en el mes de julio de 1992 encontramos en el yacimiento de la Sima de los Huesos el cráneo humano fósil más completo del registro, que conserva casi intacta su base; se trata del espécimen designado con el nombre de Cráneo 5. Perteneció a un individuo adulto que vivió hace cerca de 300.000 años y que formó parte de una población precursora de los neandertales. Dos años más tarde desenterrábamos la mayor parte de un hueso hioides humano, lo que convertía al yacimiento en el único en el mundo que aportaba todas las pruebas anatómicas relacionadas con el aparato fonador: la base del cráneo y el hueso hioides. En 1997 recuperamos un segundo hueso hioides.

Cuando se dispone de un material fósil tan excepcional se hace preciso retomar los problemas desde el principio. Nos propusimos evaluar la validez de los rasgos anatómicos de la base del cráneo que se venían usando para la reconstrucción del aparato fonador de los homínidos fósiles. El proyecto, ambicioso, requería realizar mediciones y examinar un número suficiente de cráneos de humanos modernos y de antropoides. Estudiamos la práctica totalidad de las bases de cráneo fósiles.

Y llegamos a una primera conclusión: para reconstruir la posición de la laringe en el cuello no resulta imprescindible la flexión basicraneal; no existe una relación directa entre ambas variables. Daniel Lieberman y Robert McCarthy han respaldado nuestra tesis en un trabajo reciente sobre el descenso en la posición de la laringe y la flexión de la base del cráneo a lo largo del crecimiento, en una muestra amplia de niños. Observamos, además, que la existencia de una amplia orofaringe no era un carácter exclusivo de los humanos recién nacidos y de los chimpancés.

En el curso de nuestra investigación, reparamos en un elemento de interés en el estudio del aparato fonador, el músculo constrictor superior de la faringe. Desempeña éste una importante función en la deglución de los alimentos y en los cambios que experimenta la sección de la faringe al producir los sonidos vocálicos, que son la base de nuestro lenguaje oral. Christopher Dean ha puesto de manifiesto que

bases. Partían, pues, de reconstrucciones. Ahí residía el talón de Aquiles de sus trabajos. Jean-Louis Heim y David Frayer no tardaron en objetarles que la reconstrucción del cráneo neandertal La Chapelle-aux-Saints, el fósil más representativo de la muestra estudiada, era incorrecta; en particular, subestimaba su flexión basicraneal.

En 1989 apareció, en el yacimiento israelí de Kebara, el primer hueso hioides fósil del registro de los homínidos. El yacimiento de Kebara data de hace unos 60.000 años y en él se ha hallado un esqueleto bastante completo de un ejemplar neandertal, aunque le falta el cráneo y los huesos de las piernas. Del hioides, situado en la región posterior del suelo de la boca, arrancan varios músculos de la lengua y otros que elevan la laringe. Nuestros parientes vivos más próximos, los chimpancés, tienen un hueso hioides cuya morfología difiere bastante de la forma adquirida en los humanos modernos. Puesto que el hioides de Kebara es esencialmente idéntico al del hombre moderno, sus descubridores, encabezados por Baruj Arensburg, supusieron que el resto del aparato fonador de los neandertales, posición de la laringe incluida, hubo de ser similar al de los humanos modernos.

Sin embargo, el afirmar que a partir de la morfología del hueso hioides puede establecerse la del conjunto del aparato fonador constituye, para muchos