



**ACADEMIA DE FARMACIA DE GALICIA**

**Discurso de toma de posesión como**

**ACADEMICO DE HONOR**

**DEL**

**EXCMO. SR. D.  
FRANCISCO JOSE AYALA PEREDA**



**Santiago de Compostela**

**1 de Junio de 2011**

**Imprime:** NINO-Centro de Impresión Digital  
Rosalia de Castro, 58  
Santiago de Compostela

**Maquetación:** Miguel A. Suárez

**Depósito Legal:** C 1066-2011

# INDICE

1.- Nombramiento .....	5
2. Laudatio .....	7
3.- Curriculum Vitae .....	15
3.1.- PREMIOS Y HONORES .....	15
3.2.- LIBROS PUBLICADOS .....	17
3.3.- Lista Parcial de Publicaciones en Revistas .....	22
4.- Discurso de ingreso .....	35
A la Luz de la Evolución .....	35



# 1.- Nombramiento

## ACTA JUNTA GENERAL ORDINARIA DE 22 DE SEPTIEMBRE DE 2010 DE LA ACADEMIA DE FARMACIA DE GALICIA

En Santiago de Compostela, en la sede oficial de la Academia, antiguo Hospital de S. Roque, en la c/ San Roque nº 2, siendo las 17.30 horas del día 22 de Setiembre del año 2.010, se reúnen en Junta General Ordinaria, previa convocatoria reglamentaria, los Académicos Numerarios de la Academia de Farmacia de Galicia, y entre los acuerdos alcanzados en dicha reunión figura la elección por unanimidad, según los estatutos vigentes, del Profesor Francisco José Ayala Pereda como Académico de Honor de la misma.

Santiago de Compostela, a 22 de Septiembre de 2010



## 2. Laudatio

Excmo. Sr. Presidente

Dr. ISAAC ARIAS SANTOS

Hace millones de años que la vida hizo su aparición sobre la Tierra, pero era una vida intrascendente, una sucesión física de alboradas y ocasos, con sus típicos colores producto de fenómenos físicos, sin que nadie pudiera disfrutar de ellos de manera consciente, sin que nadie se hubiera planteado el concepto del tiempo, ni el sentido o sinsentido de lo que pasaba, sin que nadie pudiera inspirarse para hacer una poesía o pintar un cuadro que interpretara los fenómenos que ocurrían. Pero desde hace menos de 15 minutos, en una escala de tiempo figurada, la sucesión de alboradas y ocasos ya no es solo cuestión física, sino que fundamentalmente es intelectual, con unas gotas nada despreciables de emoción.

El resultado de multiplicar la intensidad por el tiempo es una cantidad, por eso el placer es breve, la alegría pasajera, solo la felicidad perdura, porque es un sentimiento prudente, fundamentado, con sentido, que deja el espacio adecuado a la emoción, por ello es, además, equilibrado y, en consecuencia, la cantidad de bienestar que produce es de mucha mayor magnitud que los anteriores, ese es hoy mi estado de ánimo, nunca mejor dicho, animado, con alma, con fuerza, lejos del desánimo, por ello tampoco necesito eones para que la cantidad sea muy grande. Estamos en este momento asistiendo a una magnífica alborada, evidentemente no se trata de un fenómeno físico sino intelectual, pues el *homo sapiens* tiene capacidad para imaginársela, para disfrutar de ella, para saborearla con deleite y para darse cuenta de la trascendencia que tiene

para una institución tan joven como la nuestra, que gracias a ella, cuenta desde hoy con un miembro tan destacado en la evolución biológica como el Prof. Ayala.

Todos sabemos que la felicidad compartida es mayor, y no me equivocaré si digo que todos nosotros lo experimentamos así, pero también estoy en lo cierto si añado que, recíprocamente, el Prof. Ayala se encuentra muy a gusto hoy entre nosotros y en esta ciudad universal, a la que admira.

El protocolo especifica que la Laudatio del recipiendario como Académico de Honor debe hacerla el propio Presidente de la Academia, lo cual añade a la felicidad que siento, el honor de tener esta oportunidad.

Nunca he tenido en mis manos un curriculum como el que posee el Prof. Ayala, por ello no es posible abordarlo desde este atril, me ha parecido más prudente incluirlo en el texto del que luego dispondrán, para que puedan degustarlo con tranquilidad en sus detalles, a pesar de ello también lo encontrarán en forma resumida. Es este momento solo citaré unos pocos ítems para encuadrar lo que a continuación diré.

Nace en Madrid en 1934 y estudia en Salamanca donde adquiere una sólida formación humanística.

Se va a la Universidad de Columbia en 1961 para estudiar Genética con el Prof. Dobzhansky, su maestro, y allí se doctora en 1964. Se traslada a la Universidad Rockefeller y en 1971 a la de California en Irvine, donde continúa.

Medalla Nacional de la Ciencia de EE.UU., presentada por el Presidente George W. Bush.

Miembro del Comité de asesores de Ciencia y Tecnología del Presidente Clinton.

Medalla de Honor de Oro de Mendel.



Presidente de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, que edita la revista Science.

***“Premio Templeton, 2010, para el progreso hacia la investigación o descubrimientos sobre realidades espirituales”***, el de mayor dotación económica del mundo, presentado por su Alteza Real el Príncipe Philip de Edimburgo, en Buckingham Palace, ***por descubrimientos científicos que han contribuido de manera extraordinaria al progreso y bienestar de la humanidad***, galardón que comparte con varios Premios Nobel y con la Madre Teresa de Calcuta, la primera en recibirlo.

Es Donald Bren Professor of Biological Sciences, pero además es **University Professor**, el título más elevado de cualquier universidad americana, y solo uno de los profesores puede ostentarlo. En la Universidad de California en Irvine lo ostenta el Prof. Ayala, a pesar de que tres profesores de su universidad son Premios Nobel.

Como dije hace un momento, en 1961 se hace alumno del Prof. Theodosius Dobzhansky, precisamente el autor de mi primer libro de Genética, *Principios de Genética 3ª Edición*, libro de texto en la Licenciatura de Ciencias Biológicas, que compré en 1969 por 495 pts, en aquella institución que era la Librería González de la Rúa del Villar. Evidentemente los 5 billetes de cien pesetas fueron directamente al bolsillo de Manuel que era el dueño, el interlocutor, el dependiente y ... la caja registradora.

Han reconocido la valía del Prof. Ayala políticos de diversas tendencias, llegando a formar parte de sus asesores y habiendo obtenido la Medalla Nacional de la Ciencia del país más científico del mundo, los EE.UU.

Quizá el cargo más relevante puede ser el de Presidente de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, que edita la revista Science, que junto con Nature, lideran la literatura científica mundial.

Desde mi humilde punto de vista el penúltimo Premio, decía Lain Entralgo que solo lo penúltimo es cierto, lo último es incertidumbre, el premio Templeton es el que resume, y reconoce al más alto nivel, toda una vida dedicada a la feliz combinación de contribuir al notable avance de la Ciencia y a su diálogo amigable con la parte espiritual y emocional del hombre, por eso podemos decir con propiedad que el Prof. Ayala es un hombre del Renacimiento, un humanista que destaca en todos los ámbitos del saber en los que se involucra.

Sus estudios en Salamanca le hacen un experto del discernimiento, es decir de “*cerner*”, para separar el grano de la paja, lo útil de lo inútil, hay que separar para analizar, para ver claro y acertar así con el siguiente paso. ¿Es quizá esta virtud la que distingue a los buenos investigadores?, me preguntaba yo hace pocas fechas en mi discurso de ingreso en la Real Academia de Farmacia de España. Hoy no tengo duda de que la respuesta es afirmativa, pues convencido estoy de que el Prof. Ayala ha aplicado con notable éxito la virtud del discernimiento aprendida en sus tiempos jóvenes, y la ha aplicado *bien*, pues las cotas científicas alcanzadas le acreditan como *buen* investigador, siendo además un investigador *bueno*. Pienso que los versos de Machado cuando dice:

*“y más que un hombre al uso que sabe su doctrina  
soy, en el buen sentido de la palabra, bueno”*

sintetizan perfectamente lo que quiero decir. Precisamente por esa sublime síntesis, entiendo, ha sido merecedor del Templeton.

A todos esos premios permítanme decir, quizá con poca humildad pero satisfecho de ello, desde hoy añadirá el no menos valioso de Académico de Honor de la Academia de Farmacia de Galicia.

Conocí al Prof. Ayala en el verano del año 2000 durante un curso que realicé sobre Ética, Genética y Política en la Universidad Internacional Menéndez y Pelayo de Santander (España).

Desde entonces se han encadenado una serie de hechos que nos han llevado hasta el día de hoy. En el verano de 2004, Iria Blanco, a la sazón F.I.R. en nuestro Servicio de Farmacia del Hospital Xeral-Cíes de

Vigo, realiza una estancia en el Departamento que dirige el Prof. Ayala en California y desde entonces la relación se hace más fluida, hasta que en marzo de 2008, con motivo de una estancia en Pontevedra, la Academia de Farmacia de Galicia le invita a pronunciar una conferencia, invitación que amablemente acepta, y que se celebra en la Facultad de Farmacia el día 28, con un lleno histórico en el Aula Magna. En los preparativos de la conferencia, cuando estaba confeccionando las invitaciones no sabía que aspecto destacar, pues sus méritos y cargos son innumerables y, conociendo su sencillez y amabilidad, virtudes que adornan a los grandes hombres, le pregunté qué debía poner, me contestó que Profesor de Ciencias Biológicas, eso es precisamente lo que acabo de destacar en el último de los items citados de su curriculum, porque efectivamente eso es lo que siente, es lo que le reconoce de manera tan exclusiva su Universidad, porque “profesa”, es decir, ha adquirido un compromiso vital, con lo profesado.

En este rápido recorrido quiero citar con especial satisfacción el acuerdo tomado en el Monasterio de Samos, Lugo (España), el día 15 de julio de 2010. Ese día, con motivo de la inauguración de la recreada Botica del Monasterio, y bajo los auspicios de la Academia de Farmacia de Galicia, se reúnen por primera vez todas las Academias de Farmacia de España: Real Academia de Farmacia de España, Real Academia de Farmacia de Cataluña, Academia de Farmacia Iberoamericana, Academia de Farmacia de Santa María de España de la Región de Murcia, Academia de Farmacia del Reino de Aragón y Academia de Farmacia de Castilla y León. En esa reunión, la Academia de Farmacia de Galicia hace la propuesta, defendida por el Prof. Izco, de que todas las Academias de Farmacia de España apoyen la candidatura del Prof. Ayala al Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2011, propuesta que es apoyada por unanimidad, convirtiéndose así en la primera, y estimo que magnífica, acción conjunta de las Academias de Farmacia de España. No sabemos en este momento lo que la *evolución azarosa* de los acontecimientos nos tendrá reservado, tampoco cual será la *selección natural* de la *especie* elegida, pero sea cual fuere el resultado, hemos hecho justicia con un científico español universal al proponerle para el

máximo galardón que España concede en esta materia. También es de justicia señalar, y agradecer, que nuestra propuesta ha sido apoyada por las Universidades de Vigo, País Vasco y Santiago de Compostela, de las dos primeras Dr. Honoris Causa.

Consecuencia de todos estos antecedentes, el día 22 de Setiembre de 2010 la Academia de Farmacia de Galicia elige al científico “evolucionista” más destacado, Académico de Honor por unanimidad, el año siguiente en que se cumplen los 150 años de la publicación por Darwin del libro “El origen de las especies”. Hoy estamos haciendo realidad el acuerdo entonces tomado.

No quiero terminar esta Laudatio sin unos breves apuntes personales, puesto que la inteligencia sola no hace al hombre completo, y el Prof. Ayala lo es, necesita las emociones y evidentemente están a la altura de su intelecto.

Está casado con Hana Lostakova, de origen Checo, una mujer inteligente, comunicativa, políglota y alegre, además de poseer una gran iniciativa, una ecologista sensible, que ha creado un ambicioso proyecto, Pangea Worl, para el desarrollo sostenible de la ciencia y el ambiente. Le ha dado dos hijos, pero sobre todo eso ha hecho posible la existencia de Evalina, una preciosidad de criatura de 4 años que hace las delicias de los abuelos, sin que se paren a pensar en los mecanismos de la evolución que se hayan puesto en funcionamiento. Evalina tiene desde hace unos meses un competidor en el ambiente, su hermano Andrew, que pondrá en funcionamiento la selección natural, una buena prueba para el juicio equilibrado de los abuelos.

El Prof. Ayala admira el arte, cualquier tipo de arte, por ello entre sus numerosos amigos hay artistas con los que suele reunirse. Es buen aficionado a la ópera, gusto que comparte con su mujer. Como es abonado, cuando no pueden ir, manda aviso a una “lista de espera” de estudiantes para que aprovechen la entrada, pues 500 \$ más o menos no están al alcance estudiantil y tampoco se pueden perder.

Madrugador, lector infatigable y de comida ligera, pues mantiene que hay que comer para vivir, pero no vivir para comer, valora especialmente la buena educación, la creatividad y la inteligencia. Confirma que el hombre es un ser dialógico, pues disfruta con la conversación, mejor paseando que sentado, lo que trae a mi memoria la escuela peripatética griega fundada por Aristóteles, cuando paseaban dialogando bajo los altos enramados, semejantes a los que rodean al *peripatos* diario que el Prof. Ayala recorre desde su casa al despacho en la Facultad, lleno de árboles, flores y colibríes.

Como una pincelada más para pintar a un hombre polifacético, decir que en 1981 compró una finca en los alrededores de Sacramento como lugar de descanso los fines de semana, pero aplicando sus profundos conocimientos de genética, mezclados con su creatividad, comenzó a obtener nuevas variedades de uva a las que aplicaba sistemas de cultivo y de riego innovadores, obteniendo frutos de excelentes características que vendía a los bodegueros. Pero lo que se inició como una curiosidad, ha acabado dando lugar a cientos de hectáreas de viñedo en los condados de Sacramento y San Joaquín, así como a la elaboración de vinos de alta calidad, que no pongo en duda, pero permítame que le diga que ha de probar el Prieto Picudo de mi tierra de Los Oteros en León y luego *peripateamos* sobre ello.

Queda claro que tanto Francisco José como Hana son aficionados a “pensar fuera de la caja”.

El discurso que pronunciará en breves minutos, *A la luz de la evolución*, me recuerda las palabras que pronuncié en su presentación en la Facultad de Farmacia en 2008. Esa luz es la que proyecta la “auctoritas” del Prof. Ayala sobre la evolución biológica, desde la ciencia, y sobre el sentido del hombre, desde la religión. En uno de sus últimos libros *Darwin y el Diseño Inteligente: Creacionismo, Cristianismo y Evolución* termina con este aserto: “*La evolución y la fe religiosa no son incompatibles*”, que enriquece en páginas precedentes al decir que: “*una vez que la ciencia ha dicho su parte, quedan muchos aspectos de la realidad que son de interés, como las cuestiones de valor, sentido y propósito, que siempre estarán más allá del ámbito de la ciencia*”.

Ya para terminar, con enorme satisfacción y un poco emocionado, diré que en el protocolo de toma de posesión de un Académico, por primera vez en nuestra corta pero intensa y creativa historia, para cerrar solemnemente el acto quizá más solemne que hemos celebrado, sonará el himno de la Academia de Farmacia de Galicia, obra de nuestro Académico Prof. Tomás González Villa.

He dicho. Muchas gracias por su atención.

## 3.- Curriculum Vitae

### 3.1.- PREMIOS Y HONORES

Francisco J. Ayala es Profesor de Ciencias Biológicas en la Universidad de California, Irvine. Nacido en Madrid, ha vivido en Estados Unidos desde 1961. Es ciudadano de España y de Estados Unidos.

En 2001 recibió la Medalla Nacional de Ciencia de los Estados Unidos, presentada por el Presidente George W. Bush. En 2010 recibió el Premio Templeton, el de mayor dotación económica en el mundo, presentado por Su Alteza Real, Príncipe Philip, en Buckingham Palace, por descubrimientos científicos que han contribuido de manera extraordinaria al progreso y bienestar de la humanidad. De 1994 a 2001 fue miembro del Comité de Asesores de Ciencia y Tecnología del Presidente Clinton.

En 2003 fue nombrado “University Professor,” el título más alto otorgado por la Universidad de California, siendo el único que posee tal título en la Universidad de California en Irvine. Ha sido Presidente de la AAAS, American Association for the Advancement of Science (1993-1996) y de Sigma Xi, The Scientific Research Society de los EE.UU (2003-2006).

Es miembro de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, la Academia Americana de Artes y Ciencias, la Sociedad Filosófica Americana y la Academia de Ciencias de California. Es además miembro honorario de la Real Academia de Ciencias de Madrid, la Academia de Ciencias de Rusia, la Accademia Nazionale dei Lincei de Roma, Académico de Honor electo de la Academia de Farmacia de Galicia y otras Academias extranjeras. Es Doctor Honoris Causa de Universidades de nueve países,

incluyendo en España: Madrid, Barcelona, Salamanca, Valencia, Vigo, León, Las Islas Baleares y País Vasco.

Entre sus muchos honores, Ayala ha recibido la Medalla de Honor de Oro de Mendel, Chequia; el Premio a la Libertad y Responsabilidad Científica, USA; el Premio Presidencial del Institute of Biological Sciences, USA; la Medalla del Collège de France; la Medalla de Oro de la Accademia Nazionale dei Lincei, Roma; el Premio “Distinguished Scientist of the Year,” de la Asociación Científica Nacional de los Estados Unidos SACNAS; la Medalla “Líder de la Ciencia” en el 150 aniversario de la AAAS; y el William Procter Prize for Scientific Achievement from Sigma Xi, the U.S. Scientific Research Society. En 2007 la Fundación Cristóbal Gabarrón le otorgó el Premio Internacional de Ciencia e Investigación. En 2009 recibió el Premio COSCE (Confederación de Sociedades Científicas de España) a la Difusión de la Ciencia.

Ha sido Presidente de la Society for the Study of Evolution; Presidente del Board of Biology del National Research Council; Miembro del Consejo de Gobierno de la National Academy of Sciences; Miembro del Consejo Nacional sobre el Genoma Humano, de los Estados Unidos; del Comité Científico Ejecutivo de la Environmental Protection Agency; la Comisión de Ciencias Biológicas del National Research Council; del Consejo Nacional de Ciencias Médicas Generales de los National Institutes of Health; y del Consejo del Centro Fogarty para Programas Internacionales de los National Institutes of Health.

Ha dado conferencias en universidades y otras instituciones a través del mundo, incluyendo además de los Estados Unidos y España, Alemania, Argentina, Bélgica, Brasil, Canadá, Chile, China, Checoslovaquia, Colombia, Dinamarca, Finlandia, Francia, Gran Bretaña, Grecia, Holanda, Hong Kong, Israel, Italia, Japón, México, Noruega, Panamá, Perú, Portugal, Polonia, Rusia, Suiza, Turquía, Venezuela y Yugoslavia.

Es autor de más de 1.000 artículos y más de 34 libros, entre los que cuentan, en español, *El siglo de los genes. Patrones de explicación en genética* (2009), *Darwin y el Diseño Inteligente* (2007), *La evolución de un evolucionista* (2006), *La piedra que se volvió palabra* (2006), *La*



*genética en México. Institucionalización de una disciplina* (2003), *De Darwin al DNA y el origen de la humanidad* (2002), *Senderos de la evolución humana* (2001), *El método en las ciencias* (1998), *La teoría de la evolución* (1994), *La naturaleza inacabada* (1994), *Genética moderna* (1984), *Estudios sobre filosofía de la biología* (1983), *La Evolución en acción* (1983), *Origen y evolución del hombre* (1980), *Evolución* (1980) y *Evolución Molecular* (1980).

Sus investigaciones científicas están dedicadas a la genética de poblaciones y la evolución biológica, incluyendo el origen de las especies, la diversidad genética de los organismos, la evolución de la malaria, la estructura genética de los parásitos protozoarios, el reloj molecular de la evolución y la evolución humana. Sus publicaciones filosóficas se centran en epistemología, ética y filosofía de la biología.

### 3.2.- LIBROS PUBLICADOS

- 2010 **Ayala, F.J.** *Am I a Monkey? Six Big Questions about Evolution*. Johns Hopkins University Press: Baltimore. *xiii* + 83 pp.
- 2012 **F.J.** *Am I a Monkey? Six Big Questions about Evolution*. (Korean translation) Anima Publishing Co., Gyeonggi-do, Korea.
- 2010 **Ayala, F.J.** and R. Arp, eds. *Contemporary Debates in Philosophy of Biology*. Wiley-Blackwell: Malden, MA. *xii* + 426 pp.
- 2009 Avise, J.C. and **F.J. Ayala**, eds. *In the Light of Evolution. Volume III: Two Centuries of Darwin*. National Academies Press: Washington, DC. *xvi* + 414 pp.
- 2009 **Ayala, F.J.** *L'Evoluzione. Lo Sguardo Della Biología*. Jaca Book: Milan. 200 pp.
- 2009 Barahona, A. and **F.J. Ayala**. *El siglo de los genes. Patrones de explicación en genética*. Alianza Editorial: Madrid. 225 pp.
- 2008 Avise, J.C., S.P. Hubbell, and **F.J. Ayala**, eds. *In the Light of Evolution. Volume II: Biodiversity and Extinction*. National Academies Press: Washington, DC. *xvii* + 414 pp.

- 2007 Avise, J.C. and **F.J. Ayala**, eds. *In the Light of Evolution Volume I: Adaptation and Complex Design*. National Academies Press: Washington, DC. xviii + 360 pp.
- 2007 Cela-Conde, C.J. and **F.J. Ayala**. *Human Evolution. Trails from the Past*. Oxford University Press: Oxford, UK. vii + 437 pp.
- 2008 Cela-Conde, C.J. and **F.J. Ayala**. *Human Evolution. Trails from the Past*. Oxford University Press: Oxford, UK. vii + 437 pp. Second Printing.
- 2007 **Ayala, F.J.** *Darwin y el Diseño Inteligente. Creacionismo, Cristianismo y Evolución*. Alianza Editorial: Madrid, Spain. 231 pp.
- 2010 **Ayala, F.J.** *Darwin y el Diseño Inteligente. Creacionismo, Cristianismo y Evolución*. Alianza Editorial: Madrid, Spain. 231 pp. Fourth Edition.
- 2010 **Ayala, F.J.** *Darwin eta Diseinu Inteligentea. Kreaizionismoa, Kristautasuna eta Eboluzioa* (Basque translation). Gaiak Argitaldaria: Donostia-San Sebastián, Spain. 244 pp.
- 2007 **Ayala, F.J.** *Darwin's Gift to Science and Religion*. Joseph Henry Press: Washington, DC. xi + 237 pp.
- 2009 **Ayala, F.J.** *Il dono di Darwin alla scienza e alla religione* (Italian translation). Edizioni San Paolo: Milano. 307 pp.
- 2009 **Ayala, F.J.** *Dar Karola Darwina dla nauki i religii* (Polish translation). Warsaw University Press: Warsaw, Poland. xi + 216 pp.
- 2006 **Ayala, F.J.** *La Evolución de un Evolucionista. Escritos Seleccionados*. University of Valencia: Valencia, Spain. 441 pp.
- 2006 **Ayala, F.J.** *Darwin and Intelligent Design*. Fortress Press: Minneapolis, MN. xi + 116 pp.
- 2008 **Ayala, F.J.** *Darwin and Intelligent Design* (Japanese translation). Kyo Bun Kwan: Tokyo.
- 2009 **Ayala, F.J.** *Darwin y el Diseño Inteligente* (Spanish translation). Ediciones Mensajero: Bilbao, Spain. 112 pp.
- 2006 **Ayala, F.J.** and C.J. Cela Conde. *La piedra que se volvió palabra. Las claves evolutivas de la humanidad*. Alianza Editorial: Madrid, Spain. 184 pp.

- 2005 Hey, J., W.M. Fitch and **F.J. Ayala**, eds. *Systematics and the Origin of Species. On Ernst Mayr's 100<sup>th</sup> Anniversary*. National Academies Press: Washington, DC. *xiii* + 367 pp.
- 2005 Wuketits, F.M. and **F.J. Ayala**, eds. *Handbook of Evolution: The Evolution of Living Systems (Including Hominids)*, Volume 2. Wiley-VCH: Weinheim, Germany. 292 pp.
- 2005 **Ayala, F.J.** *Le Ragioni dell' Evoluzione*. Di Renzo Editore: Rome. 109 pp.
- 2004 **Ayala, F.J.**, ed. *Ernst Mayr 1904*. Ludus Vitalis, Vol. XII, 245 pp.
- 2003 Barahona, A., S. Pinar, and **F.J. Ayala**. *La genética en México. Institucionalización de una disciplina*. Universidad Nacional Autónoma de México: México. 241 pp.
- 2002 Ruiz, R. and **F.J. Ayala**. *De Darwin al DNA y el origen de la humanidad: la evolución y sus polémicas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica: Mexico City, Mexico. 293 pp.
- 2001 Cela Conde, C.J. and **F.J. Ayala**. *Senderos de la Evolución Humana*. Alianza Editorial: Madrid, Spain. 631 pp.
- 2008 Cela Conde, C.J. and **F.J. Ayala**. *Senderos de la Evolución Humana*. Alianza Editorial: Madrid, Spain. 631 pp. Fifth Printing.
- 2000 **Ayala, F.J.**, W.M. Fitch, and M.T. Clegg, eds. *Variation and Evolution in Plants and Microorganisms. Toward A New Synthesis 50 Years After Stebbins*. National Academy Press: Washington, DC. *xi* + 340 pp.
- 2000 **Ayala, F.J.** *Del A.D.N. a la Humanidad. Homenaje a Francisco José Ayala*. L. Burges, ed. Universitat de Les Illes Balears, Spain; Centro de Estudios Filosóficos, Políticos y Sociales Vicente Lombardo Toledano, Mexico City. *ix* + 253 pp.
- 1998 Russell, R.J., W.R. Stoeger, and **F.J. Ayala**, eds. *Evolutionary and Molecular Biology: Scientific Perspectives on Divine Action*. Vatican Observatory and the Center for Theology and the Natural Sciences: Vatican City State/Berkeley, California. 592 pp.
- 1998 Ruiz, R. and **F.J. Ayala**. *El Método en las Ciencias: Epistemología y darwinismo*. Fondo de Cultura Económica: México. 216 pp.

- 1997 **Ayala, F.J.** and Fitch, W.M., eds. *Genetics and the Origin of Species: From Darwin to Molecular Biology 60 Years after Dobzhansky*. National Academy Press: Washington, D.C. *ii* + 115 pp.
- 1995 Fitch, W.M. and **F.J. Ayala**, eds. *Tempo and Mode in Evolution*. National Academy Press: Washington, D.C. *viii* + 235 pp.
- 1994 **Ayala, F.J.** *La Teoría de La Evolución: De Darwin a los Últimos Avances de la Genética*. Ediciones Temas de Hoy: Madrid, Spain. 237 pp.
- 2001 **Ayala, F.J.** *La Teoría de la Evolución*, 3<sup>rd</sup> edition. Cambio Colección: Madrid, Spain. 216 pp.
- 1999 **Ayala, F.J.** *La teoría de la evolución: De Darwin a los últimos avances de la genética*. Colección “Tanto por Saber”: Madrid, Spain. 215 pp.
- 1997 **Ayala, F.J.** *La Teoría de La Evolución: De Darwin a los Últimos Avances de la Genética*. Bolsistemas (pocket edition): Madrid, Spain. 237 pp.
- 1994 **Ayala, F.J.** *La Naturaleza Inacabada: Ensayos en Torno a la Evolución*, 2<sup>nd</sup> edition. Biblioteca Científica Salvat (new edition): Barcelona. *xiv* + 270 pp.
- 1998 **Ayala, F.J.** *A Natureza Inacabada. Ensaio Acerca da Evolução*. (Portuguese translation.) Dinalivro: Lisbon. 303 pp.
- 1994 **Ayala, F.J.** *La Naturaleza Inacabada: Ensayos en Torno a la Evolución*. Salvat/Ciencia: Barcelona. *xiv* + 270 pp.
- 1987 **Ayala, F.J.** *La Naturaleza Inacabada: Ensayos en Torno a la Evolucion*. Biblioteca Científica Salvat: Barcelona. *xiii* + 270 pp.
- 1986 Gustafson, J.P., G.L. Stebbins, and **F.J. Ayala**, eds. *Genetics, Development, and Evolution*. 17th Stadler Symposium. Plenum Press: New York. *xii* + 361 pp.
- 1984 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Modern Genetics*, 2<sup>nd</sup> edition. Benjamin/Cummings: Menlo Park, California. *xviii* + 1012 pp.
- 1988 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Modern Genetics*, 2<sup>nd</sup> edition, vol. 3 (Russian translation). Mir: Moscow. 335 pp.
- 1988 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Modern Genetics*, 2<sup>nd</sup> edition, vol. 2 (Russian translation). Mir: Moscow. 368 pp.
- 1987 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Genetica Moderna* (Italian translation of *Modern Genetics*, 2<sup>nd</sup> edition). Nicola Zanichelli: Bologna, Italy. *xiii* + 712 pp.

- 1987 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Modern Genetics*, 2<sup>nd</sup> edition, vol. 1 (Russian translation). Mir: Moscow. 295 pp.
- 1987 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Modern Genetics*, 2<sup>nd</sup> edition (Bulgarian translation). Zemizdat Publishers: Sofia. 1031 pp.
- 1987 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Modern Genetics*, 2<sup>nd</sup> edition (Chinese translation). Hunan Science and Technology Publishers: Hunan, PRC. 10 + 890 pp.
- 1984 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Genética Moderna* (Spanish translation of *Modern Genetics*). Omega: Barcelona. xvii + 836 pp.
- 1980 **Ayala, F.J.** and J.A. Kiger. *Modern Genetics*, 1<sup>st</sup> edition. Benjamin/Cummings: Menlo Park, California. xvii + 844 pp.
- 1982 **Ayala, F.J.** *Population and Evolutionary Genetics. A Primer*. Benjamin/Cummings: Menlo Park, California. xiii + 268 pp.
- 1984 **Ayala, F.J.** *Principles of Population and Evolutionary Genetics* (Russian translation). Mir Publishers: Moscow. 230 pp.
- 1982 **Ayala, F.J.** *Biologie Moléculaire et Evolution*. Masson: Paris. viii + 136 pp.
- 1980 **Ayala, F.J.** *El Origen y Evolución del Hombre*. Alianza Universidad: Madrid. 238 pp.
- 1991 *Origen y Evolución del Hombre*. Alianza Universidad: Madrid, 5<sup>th</sup> Edition. 238 pp.
- 1979 **Ayala, F.J.** and J.W. Valentine. *Evolving: The Theory and Processes of Organic Evolution*. Benjamin/Cummings: Menlo Park, California. xii + 452 pp.
- 1983 Ayala, F.J. and J.W. Valentine. *La Evolución en Acción* (Spanish translation of *Evolving: The Theory and Processes of Organic Evolution*). Alhambra Universidad: Madrid. x + 412 pp.
- 1977 Dobzhansky, Th., **F.J. Ayala**, G.L. Stebbins, and J.W. Valentine. *Evolution*. Freeman: San Francisco. 572 pp.
- 1991 Dobzhansky, Th., **F.J. Ayala**, G.L. Stebbins, and J.W. Valentine. *Evolución* (Spanish translation of *Evolution*, paperback edition). Omega: Barcelona, Spain. xvi + 558 pp.
- 1980 Dobzhansky, Th., **F.J. Ayala**, G.L. Stebbins, and J.W. Valentine. *Evolución* (Spanish translation of *Evolution*). Omega: Barcelona, Spain. xvi + 558 pp.

- 1976 **Ayala, F.J.**, ed. *Molecular Evolution*. Sinauer: Sunderland, Massachusetts. x + 277 pp.
- 1980 **Ayala, F.J.**, ed. *La Evolución Molecular* (Spanish translation of *Molecular Evolution*). Omega: Barcelona, Spain. x + 285 pp.
- 1974 **Ayala, F.J.** and Th. Dobzhansky, eds. *Studies in the Philosophy of Biology* (Introduction by **F.J. Ayala.**). Macmillan/University of California: London/Berkeley.
- 1983 **Ayala, F.J.** and Th. Dobzhansky, eds. *Estudios Sobre la Filosofía de la Biología*. (Spanish translation of *Studies in the Philosophy of Biology*). Ariel: Barcelona, Spain. 487 pp.
- 1960 **Ayala, F.J.** and M. Cuervo, O.P., S.T.M. *Tratado del Verbo Encarnado de St. Thomas Aquinas*, with Spanish Translation and Commentaries. Bilingual edition of the *Summa Theologiae* (BAC: Madrid) XIV: XX+963.

### 3.3.- LISTA PARCIAL DE PUBLICACIONES EN REVISTAS

1024. Duval, L., M.Fourment, E. Nerrienet, D. Rousset, S.A. Sadeuh Mba, S.M. Goodman, N.V. Andriaholinirina, M. Randrianarivejosia, R.E. Paul, V. Robert, **F.J. Ayala**, and F. Ariey. 2010. African apes as reservoirs of *Plasmodium falciparum* and the origin and diversification of the *Laverania* subgenus. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107:10561-10566.
1023. **Ayala, F.J.** 2010. Darwin's explanation of design: From natural theology to natural selection. *Infection, Genetics and Evolution* 10:840-843.
991. Rich, S.M., F.H. Leendertz, G. Xu, M. LeBreton, C.F. Djoko, M.N. Aminake, E.E. Takang, J.L.D. Diffo, B.L. Pike, B.M. Rosenthal, P. Formenty, C. Boesch, **F.J. Ayala**, and N.D. Wolf. 2009. The Origin of Malignant Malaria. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106:14902-14907.
985. Rougeron, V., T. De Meeûs, M. Hide, E. Waleckx, H. Bermudez, J. Arevalo, A. Llanos-Cuentas, J.-C. Dujardin, S. De Doncker, D. Le Ray, **F.J. Ayala** and A.-L. Bañuls. 2009. Extreme inbreeding in *Leishmania braziliensis*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106:10224-10229.

979. Di Fiore, A., T. Disotell, P. Gagneux, and **F.J. Ayala**. 2009. Primate malarias: evolution, adaptation, and species jumping. In: Huffman, M.A. and C.A. Chapman, eds., *Primate Parasite Ecology. The Dynamics and Study of Host-Parasite Relationships* (Cambridge University Press: Cambridge), pp. 141-182.
978. **Ayala, F.J.** 2009. Molecular Evolution vis-à-vis Paleontology. In: Sepkoski, D. and M. Ruse, eds., *The Paleobiological Revolution. Essays on the Growth of Modern Paleontology* (University of Chicago Press: Chicago), pp. 176-198.
974. Haag, K.L., B. Gottstein, and **F.J. Ayala**. 2009. The EG95 Antigen of *Echinococcus* spp. Contains Positively Selected Amino Acids, which May Influence Host Specificity and Vaccine Efficacy. *PLoS ONE* 4(4): e5362. doi:10.1371/journal.pone.0005362.
971. Cela-Conde, C.J., **F.J. Ayala**, E. Munar, F. Maestú, M. Nadal, M.A. Capó, D. del Río, J.J. López-Ibor, T. Ortiz, C. Mirasso, and G. Marty. 2009. Sex-related similarities and differences in the neural correlates of beauty. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106:3847-3852.
963. Koffia, M., T. De Meeüs, B. Bucheton, P. Solano, M. Camara, D. Kaba, G. Cuny, **F.J. Ayala**, and V. Jamonneau. 2009. Population genetics of *Trypanosoma brucei gambiense*, the agent of sleeping sickness in Western Africa. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106:209-214.
951. Balakirev, E.S., V.A. Pavlyuchkov, and **F.J. Ayala**. 2008. DNA variation and endosymbiotic associations in phenotypically-diverse sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. *Natl. Acad. Sci. USA* 105:16218-16223.
950. Long, S., M. Jirků, **F.J. Ayala**, and J. Lukeš. 2008. Mitochondrial localization of human frataxin is necessary but processing is not for rescuing frataxin deficiency in *Trypanosoma brucei*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:13468-13473.
948. Lai, D.-H., H. Hashimi, Z.-R. Lun, **F.J. Ayala**, and J. Lukes. 2008. Adaptations of *Trypanosoma brucei* to gradual loss of kinetoplast DNA: *Trypanosoma equiperdum* and *Trypanosoma evansi* are petite mutants of *T. brucei*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:1999-2004.
944. Rich, S.M., M.U. Ferreira, and **F.J. Ayala**. 2000. The Origin of Antigenic Diversity in *Plasmodium falciparum*. *Parasitology Today* 16:390-396. (Logged out of sequence.)

942. Haag, K.L., B. Gottstein, and **F.J. Ayala**. 2008. Taeniid history, natural selection and antigenic diversity: evolutionary theory meets helminthology. *Trends in Parasitology* 24:96-102.
941. Tarrío, R., **F.J. Ayala**, and F. Rodríguez-Trelles. 2008. Alternative splicing: A missing piece in the puzzle of intron gain. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:7223-7228.
918. Tatarenkov, A. and **F.J. Ayala**. 2007. Nucleotide variation at the dopa decarboxylase (*Ddc*) gene in natural populations of *Drosophila melanogaster*. *Journal of Genetics* 86: 125-137.
911. Lukes, J., I.L. Mauricio, G. Schönian, J.-C. Dujardin, K. Soteriadou, J.-P. Dedet, K. Kuhls, K. W. Quispe Tintaya, M. Jirku, E. Chocholová, C. Haralambous, F. Pratlong, M. Oborník, A. Horák, **F.J. Ayala**, and M.A. Miles. 2007. Evolutionary and geographical history of the *Leishmania donovani* complex with a revision of current taxonomy. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104:9375-9380.
899. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío and **F.J. Ayala**. 2006. Origins and Evolution of Spliceosomal Introns. *Annu. Rev. Genet.* 40:47-76.
898. Balakirev, E.S., M. Anisimova, and **F.J. Ayala**. 2006. Positive and Negative Selection in the  $\beta$ -*Esterase* Gene Cluster of the *Drosophila melanogaster* Subgroup. *J. Mol. Evol.* 62:496-510.
897. Haag, K.L., P.M.A. Zanotto, L. Alves-Junior, R.B. Gasser, A. Zaha, and **F.J. Ayala**. 2006. Searching for antigen B genes and their adaptive sites in distinct strains and species of the helminth *Echinococcus*. *Infection, Genetics and Evolution* 6:251-261.
893. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío and **F.J. Ayala**. 2006. Models of spliceosomal intron proliferation in the face of widespread ectopic expression. *Gene* 366:201-208.
887. Nébavi, F., **F.J. Ayala**, F. Renaud, S. Bertout, S. Eholié, K. Moussa, M. Mallié and T. de Meeüs. 2006. Clonal population structure and genetic diversity of *Candida albicans* in AIDS patients from Abidjan (Côte d'Ivoire). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 103:3663-3668.
875. Lim, C.S., L. Tazi and **F.J. Ayala**. 2005. *Plasmodium vivax*: Recent world expansion and genetic identity to *Plasmodium simium*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102:15523-15528.



870. Balakirev, E.S., V.R. Chechetkin, V.V. Lobzin, and **F. J. Ayala**. 2005. Entropy and GC Content in the  $\beta$ -*esterase* Gene Cluster of the *Drosophila melanogaster* Subgroup. *Mol. Biol. Evol.* 22:2063-2072.
867. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F. J. Ayala**. 2005. Is ectopic expression caused by deregulatory mutations or due to gene-regulation leaks with evolutionary potential? *BioEssays* 27:592-601.
864. **Ayala, F.J.** and M. Coluzzi. 2005. Chromosome speciation: Humans, *Drosophila*, and mosquitoes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102:6535-6542.
848. Haag, K.L., L. Alves-Junior, A. Zaha, and **F.J. Ayala**. 2004. Contingent, non-neutral evolution in a multicellular parasite: natural selection and gene conversion in the *Echinococcus granulosus* antigen B gene family. *Gene* 333:157-167.
842. **Ayala, F.J.** 2004. In William Paley's Shadow: Darwin's Explanation of Design. In: F.J. Ayala, ed., Ernst Mayr 1904. *Ludus Vitalis*, Vol. XII:53-66.
834. Balakirev, E.S. and **F.J. Ayala**. 2004. Nucleotide Variation in the *tinman* and *bagpipe* Homeobox Genes of *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 166:1845-1856.
824. Sáenz-De-Miera, L.E. and **F.J. Ayala**. 2004. Complex evolution of orthologous and paralogous decarboxylase genes. *J. Evol. Biol.* 17:55-66.
817. Balakirev, E.S. and **F.J. Ayala**. 2003. Nucleotide Variation of the *Est-6* Gene Region in Natural Populations of *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 165:1901-1914.
816. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2003. Evolution of cis-regulatory regions versus codifying regions. *Int. J. Dev. Biol.* 47:665-673.
814. Sáez, A.G., A. Tatarenkov, E. Barrio, N.H. Becerra, and **F.J. Ayala**. 2003. Patterns of DNA sequence polymorphism at *Sod* vicinities in *Drosophila melanogaster*. Unraveling the footprint of a recent selective sweep. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100:1793-1798.
813. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2003. Convergent neofunctionalization by positive Darwinian selection after ancient recurrent duplications of the *xanthine dehydrogenase* gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100:13413-13417.
807. Balakirev, E.S. and **F.J. Ayala**. 2003. Molecular population genetics of the  $\beta$ -*Esterase* gene cluster of *Drosophila melanogaster*. *Journal of Genetics* 82:115-131.

806. Balakirev, E.S., V. R. Chechetkin, V.V. Lobzin, and **F.J. Ayala**. 2003. DNA Polymorphism in the  $\beta$ -Esterase Gene Cluster of *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 164:533-544.
805. Balakirev, E.S. and **F.J. Ayala**. 2003. Pseudogenes: Are They “Junk” or Functional DNA? *Annu. Rev. Genet.* 37:123-151.
804. Benton, M.J. and **F.J. Ayala**. 2003. Dating the Tree of Life. *Science* 300:1698-1700.
802. Tarrío, R., F. Rodríguez-Trelles, and **F.J. Ayala**. 2003. A new *Drosophila* spliceosomal intron position is common in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100:6580-6583.
792. **Ayala, F.J.**, E.S. Balakirev, and A.G. Sáez. 2002. Genetic polymorphism at two linked loci, *Sod* and *Est-6*, in *Drosophila melanogaster*. *Gene* 300:19-29.
791. DeFilippis, V.R., **F.J. Ayala**, and L.P. Villarreal. 2002. Evidence of Diversifying Selection in Human Papillomavirus Type 16 E6 But Not E7 Oncogenes. *J. Mol. Evol.* 55:491-499.
786. Zurovcová, M. and **F.J. Ayala**. 2002. Polymorphism Patterns in Two Tightly Linked Developmental Genes, *Idgf1* and *Idgf3*, of *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 162:177-188.
781. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2002. A methodological bias toward overestimation of molecular evolutionary time scales. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99:8112-8115.
775. Machado, C.A. and **F.J. Ayala**. 2002. Sequence variation in the dihydrofolate reductase-thymidylate synthase (*DHFR-TS*) and trypanothione reductase (*TR*) genes of *Trypanosoma cruzi*. *Molecular & Biochemical Parasitology* 121:33-47.
774. Balakirev, E.S., E.I. Balakirev, and **F.J. Ayala**. 2002. Molecular evolution of the *Est-6* gene in *Drosophila melanogaster*: contrasting patterns of DNA variability in adjacent functional regions. *GENE* 288:167-177.

764. Tatarenkov, A. and **F.J. Ayala**. 2001. Phylogenetic Relationships among Species Groups of the *virilis-repleta* Radiation of *Drosophila*. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 21:327-331.
761. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2001. Xanthine Dehydrogenase (XDH): Episodic Evolution of a “Neutral” Protein. *J. Mol. Evol.* 53:485-495.
759. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2001. Erratic overdispersion of three molecular clocks: GPDH, SOD, and XDH. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98:11405-11410.
755. Tatarenkov, A., M. Zurovcova, and **F.J. Ayala**. 2001. *Ddc* and *amd* Sequences Resolve Phylogenetic Relationships of *Drosophila*. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 20:321-325.
754. Tarrío, R., F. Rodríguez-Trelles, and **F.J. Ayala**. 2001. Shared Nucleotide Composition Biases Among Species and Their Impact on Phylogenetic Reconstructions of the Drosophilidae. *Mol. Biol. Evol.* 18:1464-1473.
753. Machado, C.A. and **F.J. Ayala**. 2001. Nucleotide sequences provide evidence of genetic exchange among distantly related lineages of *Trypanosoma cruzi*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98:7396-7401.
740. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2000. Evidence for a High Ancestral GC Content in *Drosophila*. *Mol. Biol. Evol.* 17:1710-1717.
738. **Ayala, F.J.** and S.M. Rich. 2000. Genetic variation and the recent worldwide expansion of *Plasmodium falciparum*. *GENE* 261:161-170.
727. Tarrío, R., F. Rodríguez-Trelles, and **F.J. Ayala**. 2000. Tree Rooting with Outgroups When They Differ in Their Nucleotide Composition from the Ingroup: The *Drosophila saltans* and *willistoni* Groups, a Case Study. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 16:344-349.
719. Rich, S.M. and **F.J. Ayala**. 2000. Population structure and recent evolution of *Plasmodium falciparum*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 97:6994-7001.

717. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2000. Disparate Evolution of Paralogous Introns in the *Xdh* Gene of *Drosophila*. *J. Mol. Evol.* 50:123-130.
716. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 2000. Fluctuating Mutation Bias and the Evolution of Base Composition in *Drosophila*. *J. Mol. Evol.* 50:1-10.
709. Tibayrenc, M. and **F.J. Ayala** 1999. Evolutionary genetics of *Trypanosoma* and *Leishmania*. *Microbes and Infection* 1:465-472.
703. Kwiatowski, J. and **F.J. Ayala**. 1999. Phylogeny of *Drosophila* and Related Genera: Conflict between Molecular and Anatomical Analyses. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 13:319-328.
702. Balakirev, E.S., E.I. Balakirev, F. Rodríguez-Trelles, and **F.J. Ayala**. 1999. Molecular Evolution of Two Linked Genes, *Est-6* and *Sod*, in *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 153: 1357-1369.
700. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 1999. Molecular Evolution and Phylogeny of the *Drosophila saltans* Species Group Inferred from the *Xdh* Gene. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 13:110-121.
699. Rodríguez-Trelles, F., R. Tarrío, and **F.J. Ayala**. 1999. Switch in codon bias and increased rates of amino acid substitution in the *Drosophila saltans* species group. *Genetics* 153:339-350.
693. Tatarenkov, A., A.G. Sáez, and **F.J. Ayala**. 1999. A compact gene cluster in *Drosophila*: the unrelated *Cs* gene is compressed between duplicated *amd* and *Ddc*. *Gene* 231:111-120.
692. Tatarenkov, A., J. Kwiatowski, D. Skarecky, E. Barrio and **F.J. Ayala**. 1999. On the Evolution of *Dopa decarboxylase (Ddc)* and *Drosophila* Systematics. *J. Mol. Evol.* 48:445-462.
667. Rich, S.M. and **F.J. Ayala**. 1998. The Recent Origin of Allelic Variation in Antigenic Determinants of *Plasmodium falciparum*. *Genetics* 150:515-517.

664. Escalante, A.A., A.A. Lal, and **F.J. Ayala**. 1998. Genetic Polymorphism and Natural Selection in the Malaria Parasite *Plasmodium falciparum*. *Genetics* 149:189-202.
660. Rich, S.M., M.C. Licht, R.R. Hudson, and **F.J. Ayala**. 1998. Malaria's Eve: Evidence of a recent population bottleneck throughout the world populations of *Plasmodium falciparum*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95:4425-4430.
655. Ayala, F. José, A. Rzhetsky, and **F.J. Ayala**. 1998. Origin of the metazoan phyla: Molecular clocks confirm paleontological estimates. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95:606-611.
654. Pascual, M. L. Serra, and **F.J. Ayala**. 1998. Interspecific Laboratory Competition of the Recently Sympatric Species *Drosophila subobscura* and *Drosophila pseudoobscura*. *Evolution* 52:269-274.
651. Tarrío, R., F. Rodríguez-Trelles, and **F.J. Ayala**. 1998. New *Drosophila* introns originate by duplication. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95:1658-1662.
646. Rich, S.M., R.R. Hudson, and **F.J. Ayala**. 1997. *Plasmodium falciparum* antigenic diversity: Evidence of clonal population structure. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94:13040-13045.
643. Hudson, R.R., A.G. Sáez, and **F.J. Ayala**. 1997. DNA variation at the *Sod* locus of *Drosophila melanogaster*: An unfolding story of natural selection. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94:7725-7729.
638. Barrio, E. and **F.J. Ayala**. 1997. Evolution of the *Drosophila obscura* Species Group Inferred from the *Gpdb* and *Sod* Genes. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 7:79-93.
636. Kwiatowski, J., M. Krawczyk, M. Jaworski, D. Skarecky, and **F.J. Ayala**. 1997. Erratic Evolution of Glycerol-3-Phosphate Dehydrogenase in *Drosophila*, *Chymomyza*, and *Ceratitis*. *J. Mol. Evol.* 44:9-22.
631. Balakirev, E.S. and **F.J. Ayala**. 1996. Is Esterase-P Encoded by a Cryptic Pseudogene in *Drosophila melanogaster*? *Genetics* 144:1511-1518.

630. **Ayala, F.J.** 1996. HLA Sequence Polymorphism and the Origin of Humans. *Science* 274:1554.
624. **Ayala, F.J.**, E. Barrio, and J. Kwiatowski. 1996. Molecular clock or erratic evolution? A tale of two genes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93:11729-11734.
619. Wang, D., J.L. Marsh and **F.J. Ayala**. 1996. Evolutionary changes in the expression pattern of a developmentally essential gene in three *Drosophila* species. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93:7103-7107.
616. **Ayala, F.J.** 1996. Gene Lineages and Human Evolution. *Science* 272:1363-1364.
612. **Ayala, F.J.** and A.A. Escalante. 1996. The Evolution of Human Populations: A Molecular Perspective. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 5:188-201.
599. Kwiatowski, J., M. Krawczyk, M. Kornacki, K. Bailey, and **F.J. Ayala**. 1995. Evidence against the exon theory of genes derived from the triose-phosphate isomerase gene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92:8503-8506.
595. Escalante, A.A., E. Barrio, and **F.J. Ayala**. 1995. Evolutionary Origin of Human and Primate Malaria: Evidence from the Circumsporozoite Protein Gene. *Mol. Biol. Evol.* 12:616-626.
594. Escalante, A.A. and **F.J. Ayala**. 1995. Evolutionary origin of *Plasmodium* and other Apicomplexa based on rRNA genes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92:5793-5797.
576. Kwiatowski, J., A. Latorre, D. Skarecky, and **F.J. Ayala**. 1994. Characterization of a Cu/Zn superoxide dismutase-encoding gene region in *Drosophila willistoni*. *Gene* 147:295-296.
564. Fitch, W.M. and **F.J. Ayala**. 1994. The superoxide dismutase molecular clock revisited. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 91:6802-6807.

563. **Ayala, F.J.**, A. Escalante, C. O'hUigin, and J. Klein. 1994. Molecular genetics of speciation and human origins. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 91:6787-6794.
554. Hudson, R.R., K. Bailey, D. Skarecky, J. Kwiatowski, and F.J. Ayala. 1994. Evidence for Positive Selection in the Superoxide Dismutase (*Sod*) Region of *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 136:1329-1340.
547. **Ayala, F.J.** 1993. *Trypanosoma* and *Leishmania* have clonal population structures of epidemiological significance. *Biological Research* 26:47-63.
542. Klein, J., N. Takahata, and **F.J. Ayala**. 1993. MHC Polymorphism and Human Origins. *Scientific American* 269:46-51.
527. Barrio, E., A. Latorre, A. Moya, and **F.J. Ayala**. 1992. Phylogenetic reconstruction of the *Drosophila obscura* group, on the basis of the mitochondrial DNA. *Mol. Biol. Evol.* 9:621-635.
518. Guo, P., L.D. Mueller, and **F.J. Ayala**. 1991. Evolution of behavior by density-dependent natural selection. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 88:10905-10906.
512. Tibayrenc, M. and **F.J. Ayala**. 1991. Towards a population genetics of microorganisms: the clonal theory of parasitic protozoa. *Parasitology Today* 7:228-232.
500. Tibayrenc, M., F. Kjellberg, and **F.J. Ayala**. 1990. A clonal theory of parasitic protozoa: The population structure of *Entamoeba*, *Giardia*, *Leishmania*, *Naegleria*, *Plasmodium*, *Trichomonas*, and *Trypanosoma*. Medical and taxonomical consequences. *Proc. Nat. Acad. Sci., USA* 87:2414-2418.
489. Chang, H.-Y. and **F.J. Ayala**. 1989. On the origin of incipient reproductive isolation: The case of *Drosophila albomicans* and *D. nasuta*. *Evolution* 43:1610-1624.
473. **Ayala, F.J.**, L. Serra, and A. Prevosti. 1989. A grand experiment in evolution: The *Drosophila subobscura* colonization of the Americas. Proceedings of XVI International Genetics Congress. *Genome* 31:246-255.

459. Lenski, R.E., M. Slatkin, and **F.J. Ayala**. 1989. Another alternative to directed mutation. *Nature* 337:123-124.
445. Latorre, A., E. Barrio, A. Moya, and **F.J. Ayala**. 1988. Mitochondrial DNA evolution in the *Drosophila obscura* group. *Mol. Biol. Evol.* 5(6):717-728.
396. Latorre, A., A. Moya, and **F.J. Ayala**. 1986. Evolution of mitochondrial DNA in *Drosophila subobscura*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 83:8649-8653.
377. Tibayrenc, M., P. Ward, A. Moya, and **F.J. Ayala**. 1986. Natural populations of *Trypanosoma cruzi*, the agent of Chagas' disease, have a complex multiclonal structure. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 83:115-119.
364. Mueller, L.D., L.G. Barr, and **F.J. Ayala**. 1985. Natural selection *vs.* random drift: evidence from temporal variation in allele frequencies in nature. *Genetics* 111:517-554.
342. **Ayala, F.J.** 1984. Molecular polymorphism: How much is there and why is there so much? *Developmental Genetics* 4:379-391.
328. **Ayala, F.J.** 1983. Genetic polymorphism: from electrophoresis to DNA sequences. *Experientia* 39:813-823.
308. Mueller, L.D. and **F.J. Ayala**. 1982. Estimation and interpretation of genetic distance in empirical studies. *Genetical Research*, Cambridge 40:127-137.
294. **Ayala, F.J.** 1982. Genetic variation in natural populations: Problem of electrophoretically cryptic alleles. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 79:550-554.
280. Mueller, L.D. and **F.J. Ayala**. 1981. Dynamics of single-species population growth: experimental and statistical analysis. *Theoretical Population Biology* 20:101-117.
279. Stebbins, G.L. and **F.J. Ayala**. 1981. Is a new evolutionary synthesis necessary? *Science* 213:967-971.



257. **Ayala, F.J.** and J.F. McDonald. 1980. Continuous variation: Possible role of regulatory genes. *Genetica* 52/53:1-15.
222. Bruce, E.J. and **F.J. Ayala**. 1978. Humans and apes are genetically very similar. *Nature* 276:264-265.
213. McDonald, J.F. and **F.J. Ayala**. 1978. Genetic and biochemical basis of enzyme activity variation in natural populations. I. Alcohol dehydrogenase in *Drosophila melanogaster*. *Genetics* 89:371-388.
177. **Ayala, F.J.** 1976. Protein evolution in related species: Adaptive foci. *Johns Hopkins Med. J.* 138:262-278.
160. Avise, J.C. and **F.J. Ayala**. 1975. Genetic change and rates of cladogenesis. *Genetics* 81:757-773.
150. Gilpin, M.E. and **F.J. Ayala**. 1975. Adaptive foci in protein evolution. *Nature* 253:725-726.
142. **Ayala, F.J.** and M.E. Gilpin. 1974. Gene frequency comparisons between taxa: support for the natural selection of protein polymorphisms. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 71:4847-4849.
139. **Ayala, F.J.** and C.A. Campbell. 1974. Frequency dependent selection. *Ann. Rev. Ecology & Systematics* 5:115-138.
133. McDonald, J.F. and **F.J. Ayala**. 1974. Genetic response to environmental heterogeneity. *Nature* 250:572-574.
129. **Ayala, F.J.** and M.L. Tracey. 1974. Genetic differentiation within and between species of the *Drosophila willistoni* group. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 71:999-1003.
117. **Ayala, F.J.**, M.E. Gilpin, and J. Ehrenfeld. 1973. Competition between species: theoretical models and experimental tests. *J. Theor. Pop. Biol.* 4:331-356.
110. Dobzhansky, Th. and **F.J. Ayala**. 1973. Temporal frequency changes of enzyme and chromosomal polymorphisms in natural populations of *Drosophila*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 70:680-683 (also appears in *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 70:2176).

97. **Ayala, F.J.** and J.R. Powell. 1972. Enzyme variability in the *Drosophila willistoni* group. VI. Levels of polymorphism and the physiological function of enzymes. *Biochem. Genetics* 7:331-345.
90. **Ayala, F.J.**, J.R. Powell, and Th. Dobzhansky. 1971. Polymorphisms in continental and island populations of *Drosophila willistoni*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 68:2480-2483.
83. **Ayala, F.J.** 1971. Environmental fluctuations and population size. *Nature* 231:112-114.
77. **Ayala, F.J.** 1971. Competition between species: frequency dependence. *Science* 171:820-824.
70. **Ayala, F.J.** 1970. Population fitness of geographic strains of *Drosophila serrata* as measured by interspecies competition. *Evolution* 24:483-494.
59. **Ayala, F.J.** 1969. Experimental invalidation of the principle of competitive exclusion. *Nature* 224:1076-1079.
55. **Ayala, F.J.** 1969. An evolutionary dilemma: fitness of genotypes versus fitness of populations. *Canad. J. Genetics and Cytology*. 11:439-456.
54. **Ayala, F.J.** 1969. Evolution of fitness. IV. Genetic evolution of interspecific competitive ability in *Drosophila*. *Genetics* 61:737-747.
46. **Ayala, F.J.** 1968. Genotype, environment, and population numbers. *Science* 162:1453-1459.
20. **Ayala, F.J.** 1965. Evolution of fitness in experimental populations of *Drosophila serrata*. *Science* 150:903-905.

## 4.- Discurso de ingreso

A la Luz de la Evolución

Excelentísimo Señor Presidente, Doctor Isaac Arias Santos,

Excelentísimos Señores Académicos,

Señoras y Señores:

Para un español que zarpó para Estados Unidos como estudiante hace cincuenta años y que ha desarrollado allí toda su carrera científica, es un gran placer y un gran honor estar hoy aquí, en el seno de la Academia de Farmacia de Galicia, en la histórica y bellísima ciudad de Santiago de Compostela, para ser investido como Académico de Honor de esta Academia. Por este placer y este honor, y por muchos otros favores con los que el Sr. Presidente de la Academia y otros de sus miembros me han regalado, ¡Muchas Gracias! Recuerdo aquí, como detalle histórico, que Manuel Murguía, fundador de la Real Academia Galega y esposo de Rosalía de Castro, estudio farmacia, además de filosofía, en Santiago de Compostela.

### **Santiago de Compostela en la escala de la evolución**

Según las fuentes históricas más fiables, partes de Galicia, incluyendo el área de Santiago de Compostela, fueron colonizadas primero por tribus celtas y, más adelante, a principios del siglo V por suevos, durante los primeros años de la caída del Imperio Romano. La parte de la historia que nos interesa comienza antes del 814, año cuando, según la leyenda, el eremita Pelayo, impresionado por luces extrañas en el cielo, descubre una tumba que se atribuye a los restos del apóstol

Santiago el Mayor. Teodomiro, obispo de Iría Flavia, reconoce el descubrimiento como un milagro y pasa a informar de ello a Alfonso II, rey de Asturias y Galicia.

La leyenda narra que el Apóstol Santiago el Mayor, predicó el evangelio a las tribus celtas de Galicia. En el año 44 sería decapitado en Jerusalén, pero sus restos fueron traídos a Galicia más adelante. El rey Alfonso II ordenó que se construyera una capilla en el sitio donde Pelayo había descubierto los restos del apóstol y fue el primer peregrino del santo lugar. Algo más de diez años más tarde, en 829, todavía durante el reinado de Alfonso II, se construye una iglesia, que en el 899 fue reemplazada por una iglesia más importante, pre-románica, construida por orden de Alfonso III, rey de León, cuando el sitio se había ya convertido en un destino importante de peregrinos cristianos. Esta iglesia pre-románica fue reducida a cenizas en el año 997 por Almanzor, comandante general del Califa de Córdoba. La iglesia destruida por Almanzor fue sustituida por la Catedral actual, una iglesia románica, que cuenta entre las más bellas y más grandes de Europa, además de ser la más importante como destino de peregrinos, a partir de la Edad Media y hasta el presente.

Como se sabe, la construcción de la catedral románica comienza en el año 1075, bajo el patronazgo del obispo Diego Peláez, durante el reinado de Alfonso VI de Castilla (1040-1109). La “última piedra” es colocada en 1122, aunque la catedral se termina de hecho años más tarde. La catedral fue consagrada en 1128 en presencia del rey Alfonso IX de León. La iglesia se había ya convertido en catedral o sede episcopal en 1075. En 1100 el Papa Urbano II la hace sede arzobispal. No hace falta para la audiencia presente añadir más sobre Santiago de Compostela que, junto con Roma y Jerusalén, ha sido el foco de peregrinos cristianos más importante del mundo durante más de diez siglos.

Sí quiero añadir un detalle histórico importante, la fundación de la Universidad de Santiago de Compostela en 1495, porque tuve el honor, en 1995, de ser uno de los conferenciantes invitados para celebrar el 500 aniversario de la Universidad. Entre los honores y regalos que

recibí en esa ocasión, cuenta de manera muy especial como recuerdo una réplica en miniatura, en plata de ley, del cetro de la Universidad.

El tema de mi conferencia en esa ocasión fue “Biología molecular y origen de la humanidad”. He querido volver al tema de la evolución en mi discurso de hoy. Y he elegido introducir el tema con una comparación histórica temporal entre Santiago de Compostela y la evolución biológica, para dar una medida un tanto palpable de la escala de la evolución.

El origen de la vida sobre la Tierra ocurrió hace unos 3.500 millones de años. Durante más del ochenta por ciento del tiempo transcurrido, solo existen organismos microscópicos. Hace 800 millones de años aparecen los primeros organismos multicelulares y hace 700 millones de años aparecen los primeros animales. Animales con esqueleto (vertebrados) aparecen hace unos 500 millones de años. Los mamíferos aparecen hace 200 millones de años; el linaje de los primates hace 60 millones de años. Los homínidos se separan de los simios hace unos siete millones de años. Nuestra especie, *Homo sapiens*, aparece en África tropical hace unos 150.000 años.

Es difícil pensar en miles de millones o cientos de millones de años y comparar su escala con cientos o miles de años. Aquí entra en juego la historia de Santiago de Compostela y de su Catedral. Para ello voy a transformar la historia de la vida a la escala de un año. Es decir, la vida aparece sobre la Tierra el 1 de enero de ese año y hoy es el 31 de diciembre a las 24 horas.

En esa escala, los primeros organismos multicelulares aparecen sobre la Tierra el 4 de octubre, los primeros vertebrados aparecen el 29 de noviembre, los mamíferos el 15 de diciembre, los primates el 26 de diciembre, los homínidos el 31 de diciembre a mediodía, y *Homo sapiens*, nuestra especie aparece sobre la Tierra el 31 de diciembre a las 23:45. En esta escala anual, los humanos llevamos 15 minutos sobre la Tierra, el sepulcro de Santiago se descubre hace nueve segundos; la Catedral románica se consagra hace seis segundos y la Universidad de Santiago es fundada hace tres segundos.

Mi propósito es mostrar lo reciente que es nuestra especie, 15 minutos de existencia en la escala anual de la historia de la vida y que el enorme desarrollo cultural, científico y tecnológico de la humanidad ha ocurrido en los últimos tres segundos. Si la humanidad no se destruye a si misma, ¿cuáles serán los avances a que llegará durante los próximos 15 segundos, o 15 minutos? Para muchos, esta consideración está llena de esperanza; para otros, es aterradora.

### **Argumento a partir del diseño**

Los filósofos de la Grecia Clásica argüían que la armonía y diseño del universo manifiestan la existencia de un creador o autor. Platón (470-399 a.C.) postula un Demiurgo que da cuenta del orden y racionalidad del mundo. Anteriormente, entre los filósofos presocráticos, Anaxagoras de Clazomenae (500-428 a.C.) postulaba la existencia de una Mente que daba cuenta de “todas las cosas que existían, habían existido, o llegarían a existir en el futuro”. Diógenes de Apolonia, contemporáneo de Anaxagoras, escribía que los “humanos y demás seres vivos pueden vivir porque respiran el aire, que es para ellos alma e inteligencia y que es de hecho como un Dios que llega a todos y dispone de todo”. Xenophon atribuye a Sócrates (470-399 a.C.) el argumento de que el diseño del universo demuestra la existencia de una Mente, que no crea de la nada, pero da cuenta del orden racional en el mundo.

Entre los Romanos de la antigüedad es particularmente Marcus Tullius Cicero (106-43 a.C.), el gran orador y hombre de estado, quien arguye que la complejidad del mundo viviente, tal como la vemos en el diseño del ojo, no puede ser resultado del azar, sino de diseño. Lucretius (99-55 a.C.) arguye por el contrario que “el mundo vino a existir por procesos naturales, sin diseño intencional”.

El cristianismo, el judaísmo, el islam, y otras religiones monoteístas explican el origen del universo, la tierra, los humanos, y todos los seres vivos como la obra de un Dios omnipotente y omnisciente. En los primeros siglos de la era cristiana, los Padres de la Iglesia argumentaron que el diseño del universo es una prueba de la

existencia de Dios. San Agustín (354-430) afirma en *La ciudad de Dios* que “El propio mundo, por el perfecto orden de sus cambios y movimientos y por la gran belleza de todas las cosas visibles, proclama...” que ha sido creado, y asimismo que su creador no podría haber sido otro que un Dios inefable e invisible en grandeza, y...en belleza”.

En la *Suma Teológica* Santo Tomás de Aquino (1224-1274) formula cinco argumentos o vías de demostrar la existencia de Dios. La “quinta vía” es un argumento a partir del diseño que se basa en la organización y armonía del universo: “Vemos que cosas que carecen de inteligencia actúan para un fin, lo cual no es fortuito sino que resulta del diseño [...] dirigido por cierto ser dotado de conocimiento e inteligencia... Por consiguiente existe un ser inteligente por el cual todas las cosas naturales son dirigidas a su fin; y a este ser le llamamos Dios”. El argumento de Santo Tomás se fundamenta en el universo y sus partes, en el armonioso ajuste de todas ellas, lo cual da pruebas de un diseño.

El argumento de Santo Tomás sería repetido, con ligeras variantes, a lo largo de la Edad Media y en tiempos modernos y ha sido incorporado durante siglos en libros de texto de teología.

La teología natural fue desaprobada por la Reforma. Martín Lutero y Juan Calvino negaron que la naturaleza humana, corrompida tras la Caída, tuviese el poder, sin la Revelación, de adquirir conocimiento de Dios y sus atributos.

La formulación más elaborada y contundente del argumento a partir del diseño, antes del siglo XVIII, fue *The Wisdom of God Manifested in the Works of Creation* [*La sabiduría de Dios se manifiesta en las obras de la Creación*] (1691) de John Ray (1627-1705), un clérigo y naturalista inglés. Ray consideraba una incontrovertible prueba de la Sabiduría de Dios que todos los componentes del universo – las estrellas y los planetas así como todos los organismos – estén tan sabiamente ideados desde el principio y sean perfectos en su funcionamiento. El “argumento más convincente de la Existencia de una Divinidad”, escribe Ray, “es el Arte y la Sabiduría admirables que se manifiestan en la Forma, el Orden y la

Disposición, los Fines y usos de todas las partes y los miembros de este majestuoso tejido que constituyen el Cielo y la Tierra”.

En el Continente, Voltaire (1694-1778), al igual que otros filósofos de la Ilustración, aceptó el argumento a partir del diseño. Voltaire afirmaba que, del mismo modo que la existencia de un reloj demuestra la existencia de un relojero, el diseño y propósito evidentes en la naturaleza demuestran que el universo fue creado por una Inteligencia Suprema.

### **William Paley**

En su *Natural Theology* (1802) el clérigo inglés William Paley (1743-1805) formuló la defensa más fuerte posible del diseño inteligente, basada en un amplio y preciso conocimiento biológico, tan detallado y preciso como era posible en la época. Paley estaba intensamente comprometido con la abolición del comercio de esclavos y se había convertido en la década de 1780 en un muy solicitado orador público contra la esclavitud. Asimismo fue un influyente autor de obras sobre filosofía cristiana, ética y teología. *The Principles of Moral and Political Philosophy* (1785) y *A View of the Evidence of Christianity* (1794) le granjearon prestigio y considerables beneficios eclesiásticos, que le permitieron llevar una vida cómoda. En 1800 la enfermedad obligó a Paley a abandonar su carrera de orador público, lo que le proporcionó tiempo para estudiar ciencia, biología en particular, y escribir *Natural Theology; or, Evidences of the Existence and Attributes of the Deity* [*Teología Natural; o, Pruebas de la Existencia y Atributos de la Divinidad*] (1802), el libro por el cual ha sido más conocido por la posteridad y que influiría enormemente en Darwin. Con *Natural Theology*, Paley pretendía actualizar la *Wisdom of God Manifested in the Works of the Creation* de John Ray, aprovechando un siglo de conocimiento científico adicional.

La declaración clave de Paley es que: “No puede haber diseño sin diseñador; invención sin inventor; orden, sin elección; [...] medios apropiados para un fin, y que ejecutan su función en el cumplimiento de ese fin, sin que el fin haya sido jamás contemplado”. *Natural Theology* es



un argumento sostenido que infiere la existencia de Dios a partir del obvio diseño de los seres humanos y sus órganos, así como el diseño de toda clase de organismos, en sí mismos, y en sus relaciones entre ellos y con su entorno.

El argumento tiene dos partes: primero, que los organismos dan prueba de ser diseñados; segundo, que sólo un Dios Omnipotente podría dar explicación de la perfección, multitud y diversidad de los diseños. Hay capítulos dedicados al complejo diseño del ojo humano; al esqueleto humano, que exhibe un preciso orden mecánico de huesos, cartílagos, y articulaciones; a la circulación de la sangre y la disposición de los vasos sanguíneos; a la anatomía comparada de humanos y animales; al tracto digestivo, riñones, uretras y vejigas; a las alas de las aves y las aletas del pez; y mucho más. Tras detallar la exacta organización y la exquisita funcionalidad de cada entidad, relación o proceso biológico, Paley extrae una y otra vez la misma conclusión: que sólo una Divinidad Omnisciente y Omnipotente podría explicar estas maravillas de perfección mecánica, sentido y funcionalidad, y la enorme diversidad de invenciones que acarrearán.

Paley resume su argumento estableciendo la compleja anatomía funcional del ojo: El ojo se compone, “primero, de una serie de lentes transparentes. Muy diferentes, por cierto, incluso en su sustancia, de los materiales opacos de los que se compone el resto del cuerpo, al menos en general”. En segundo lugar, el ojo tiene la retina, que según señala Paley es la única membrana del cuerpo que es negra, extendida detrás de la lente, para recibir la imagen formada por los haces de luz que se transmiten a través de ella, y “situada a la precisa distancia geométrica en la cual, y sólo en la cual, podría formarse una imagen clara, a saber, en la confluencia de los rayos refractados”. En tercer lugar, escribe, el ojo posee “un gran nervio que comunica esta membrana [la retina] con el cerebro; sin el cual, la acción de la luz sobre la membrana, aún modificada por el órgano, se perdería a los propósitos de la sensación”.

¿Podría haberse producido el ojo sin un diseño a propósito preconcebido, como resultado del azar? Los productos del azar no

muestran relación entre las partes o, como podríamos decir, no muestran una complejidad organizada. Paley escribe que “un lobanillo, una verruga, un lunar, un grano”, podrían salir por azar, pero nunca un ojo; “un terrón, un guijarro, una gota de líquido podría ser”, pero nunca un reloj o un telescopio.

## **Charles Darwin**

Charles Robert Darwin (1809-1882) nació el 12 de febrero de 1809 en Shrewsbury, Inglaterra. Darwin fue hijo y nieto de médicos. Se matriculó como estudiante de medicina en la Universidad de Edimburgo. Sin embargo, después de dos años abandonó Edimburgo y se trasladó a la Universidad de Cambridge para proseguir sus estudios y prepararse para ser clérigo. No fue un estudiante excepcional, pero estaba profundamente interesado en la historia natural. El 27 de diciembre de 1831, unos meses después de su graduación en la Universidad de Cambridge, Darwin zarpó, como naturalista, a bordo del navío de la marina británica *HMS Beagle* en un viaje alrededor del mundo que duró hasta octubre de 1836. Con frecuencia desembarcaba en las costas para realizar viajes prolongados al interior con el objeto de recoger especímenes de plantas y animales. El descubrimiento de huesos fósiles en Argentina pertenecientes a grandes mamíferos extinguidos, y la observación de numerosas especies de pájaros pinzones en las Islas Galápagos, estuvieron entre los acontecimientos que se considera estimularon el interés de Darwin en cómo se originan las especies.

Las observaciones que efectuó en las islas Galápagos quizá hayan sido las que tuvieron más influencia sobre el pensamiento de Darwin. Las islas, en el Ecuador, a 900 kilómetros de la costa oeste de Sudamérica, habían sido llamadas Galápagos por los descubridores españoles debido a la abundancia de tortugas gigantes, distintas en diversas islas y diferentes de las conocidas en cualquier otro lugar del mundo. Las tortugas se movían perezosamente con un ruido metálico, alimentándose de la vegetación y buscando las escasas charcas de agua fresca existentes. Habrían sido vulnerables a los depredadores, pero estos brillaban por su

ausencia en las islas. En las Galápagos, Darwin encontró grandes lagartos, que a diferencia de otros ejemplares de su especie se alimentaban de algas, así como sinsontes, bastante diferentes de los hallados en el continente sudamericano. Los pinzones variaban de una isla a otra en diversas características, sobre todo la forma del pico, adaptados para hábitos alimentarios dispares: cascar nueces, escarbar en busca de insectos, atrapar gusanos.

Además de *El Origen de las especies*, su libro mejor conocido, Darwin publicó numerosos libros, en especial *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex* (1871), que extiende la teoría de la selección natural a la evolución humana.

Darwin es justamente reconocido como el autor original de la teoría de la evolución. En *El Origen de las especies*, publicado en 1859, acumuló pruebas que demostraban la evolución de los organismos. Pero Darwin logró algo mucho más importante para la historia intelectual que demostrar la evolución. De hecho, acumular pruebas de la descendencia común con diversificación fue un objetivo subsidiario de la obra maestra de Darwin. *El Origen de las especies* es, primero y ante todo, un esfuerzo sostenido por resolver el problema de explicar de manera científica el diseño de los organismos. Darwin trata de explicar las adaptaciones de los organismos, su complejidad, diversidad y maravillosos ingenios como resultado de procesos naturales. La evidencia de la evolución surge porque la evolución es una consecuencia necesaria de la teoría del diseño.

La Introducción y los capítulos I a VIII del *Origen* explican de qué modo la selección natural justifica las adaptaciones y los comportamientos de los organismos, su “diseño”. El prolongado argumento comienza en el capítulo I, donde Darwin describe la exitosa selección de las plantas y los animales domésticos y, con considerable detalle, el éxito de los criadores de palomas que buscan “mutaciones” exóticas. El éxito de los criadores de plantas y animales manifiesta cuánta selección se puede llevar a cabo aprovechando las variaciones espontáneas que ocurren en los organismos, pero que casualmente cumplen los objetivos de los criadores. Una mutación que aparece

primero en un individuo se puede multiplicar por medio de la crianza selectiva, de modo que tras unas cuantas generaciones esa mutación se vuelve fija en una variedad, o “raza”. Las razas conocidas de perros, ganado, pollos y plantas comestibles han sido obtenidas por este proceso de selección practicado por personas con objetivos particulares.

Los siguientes capítulos (II-VIII) del *Origen* extienden el argumento a las variaciones propagadas por medio de la selección natural para beneficio de los propios organismos, más que por selección artificial de rasgos deseados por los humanos. A consecuencia de la selección natural, los organismos exhiben diseño, esto es, exhiben órganos y funciones adaptativas. Pero el diseño de los organismos tal como estos existen en la naturaleza no es “diseño inteligente”; más bien, es el resultado de un proceso natural de selección, que fomenta la adaptación de los organismos a sus entornos. Así es como funciona la selección natural: los individuos que tienen variaciones beneficiosas, es decir, variaciones que mejoran su probabilidad de supervivencia y reproducción, dejan más descendientes que los individuos de la misma especie que tienen menos variaciones beneficiosas. En consecuencia, las variaciones beneficiosas se incrementarán en frecuencia a lo largo de las generaciones; las variaciones menos beneficiosas o perjudiciales serán eliminadas de la especie. Con el paso del tiempo, todos los individuos de la especie poseerán las características beneficiosas; nuevas características continuarán acumulándose durante eones de tiempo.

Los organismos exhiben un diseño complejo, pero el diseño más bien ha surgido de forma gradual y acumulativa, paso a paso, impulsado por el éxito reproductivo de los individuos con elaboraciones cada vez más complejas. La evolución es una consecuencia de que los organismos se adapten a diversos entornos en distintos lugares, y de las condiciones siempre cambiantes del entorno a lo largo del tiempo, y a que las variaciones hereditarias estén disponibles en un momento determinado y mejoren las oportunidades de los organismos de sobrevivir y reproducirse. La evidencia de la evolución biológica del *Origen* se halla en el centro de la explicación que Darwin da del “diseño,” porque esta

explicación, la selección natural, implica que la evolución biológica ocurre.

Darwin dedica a la evidencia de la evolución cinco capítulos (IX-XIII), dos capítulos a la geología y paleontología, dos capítulos a la biogeografía y un capítulo al estudio comparativo de la anatomía y embriología de los organismos. En el concluyente capítulo XIV del *Origen*, Darwin regresa al tema dominante de la adaptación y el diseño. En un elocuente párrafo final, afirma la “grandeza” de su visión: “Así, la cosa más elevada que somos capaces de concebir, es decir la producción de los animales superiores, es una consecuencia directa de la guerra de la naturaleza, del hambre y la muerte. Hay grandeza en esta visión de que la vida, con sus diversos poderes, ha sido originalmente alentada en unas pocas formas o en una sola; y que, mientras este planeta ha ido girando de acuerdo a la constante ley de la gravedad, a partir de un comienzo tan simple se han desarrollado y se están desarrollando *un sinnúmero de formas las más bellas y más maravillosas*”.

## **De Copérnico a Darwin**

Existe una versión de la historia de las ideas que establece un paralelismo entre la revolución copernicana y la darwiniana. Según esta visión, la revolución copernicana consistió en desplazar a la Tierra de su lugar anteriormente aceptado como centro del universo, situándola en un lugar subordinado como un planeta más que gira alrededor del Sol. De manera congruente, se considera que la revolución darwiniana consistió en el desplazamiento de la especie humana de su eminente posición como centro de la vida sobre la Tierra, con todas las demás especies creadas al servicio de la humanidad y convirtiéndola en una especie más, entre miles y miles de ellas.

Según esta versión de la historia intelectual, Copérnico había llevado a cabo su revolución con la teoría heliocéntrica del sistema solar. La contribución de Darwin se debe a su teoría de la evolución orgánica. Esta versión de las dos revoluciones es inadecuada: lo que dice es cierto, pero pasa por alto lo que es más importante respecto a estas dos

revoluciones intelectuales, es decir, que anunciaron el comienzo de la ciencia en el sentido moderno de la palabra. Estas dos revoluciones deben verse conjuntamente como una única revolución científica, con dos etapas, la copernicana y la darwiniana.

La llamada “Revolución Copernicana” dio comienzo propiamente con la publicación en 1543, el año de la muerte de Nicolás Copérnico, de su *De revolutionibus orbium caelestium* (“Sobre las revoluciones de las esferas celestiales”), y culminó con la publicación en 1687 de la *Philosophiae naturalis principia mathematica* (“Los principios matemáticos de filosofía natural”) de Isaac Newton. Los descubrimientos de Copérnico, Kepler, Galileo, Newton, y otros, en los siglos XVI y XVII, habían avanzado gradualmente una concepción del universo como materia en movimiento gobernada por leyes naturales. Se demostró que la Tierra no es el centro del universo, sino un pequeño planeta que gira alrededor de una estrella mediana; que el universo es inmenso en espacio y en tiempo; y que los movimientos de los planetas en torno al Sol se pueden explicar por las mismas leyes sencillas que explican el movimiento de los objetos físicos en nuestro planeta. Leyes como  $f = m \times a$ , fuerza = masa x aceleración; o la ley de atracción,  $f = g (m_1 \cdot m_2) / r^2$ , la fuerza de atracción entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas, pero inversamente relacionada al cuadrado de la distancia que los separa.

Estos y otros descubrimientos expandieron enormemente el conocimiento humano. La revolución conceptual que trajeron consigo fue aún más fundamental: un compromiso con el postulado de que el universo obedece leyes inmanentes que explican los fenómenos naturales. Los funcionamientos del universo fueron llevados al dominio de la ciencia: explicación a través de leyes naturales. Los fenómenos físicos podrían ser explicados cuando las causas se conociesen adecuadamente.

Los avances de la ciencia física, llevados a cabo por la revolución copernicana, habían llevado la concepción que la humanidad tiene del universo a un estado de cosas esquizofrénico, que persistió hasta bien

mediado el siglo XIX. Las explicaciones científicas, derivadas de las leyes naturales, dominaban el mundo de la materia inanimada, así en la Tierra como en el Cielo. Las explicaciones sobrenaturales dependientes de las insondables acciones del Creador, explicaban el origen y la configuración de las criaturas vivas: las realidades más diversificadas, complejas e interesantes del mundo. Así, por ejemplo, como he citado anteriormente, el clérigo inglés William Paley (1743-1805) en su *Natural Theology* (“Teología Natural”) de 1802 argüía que: “No puede haber diseño sin diseñador; invención sin inventor; orden, sin elección; [...] medios apropiados para un fin, y que ejecutan su función en el cumplimiento de ese fin, sin que el fin haya sido jamás contemplado”.

Con *El Origen de las especies*, Darwin resolvió esta esquizofrenia conceptual. Darwin completó la revolución copernicana al extender a la biología la noción de la naturaleza como un sistema de materia en movimiento que la razón humana puede explicar sin recurrir a agentes extranaturales. El enigma enfrentado por Darwin difícilmente podría sobrestimarse. El argumento a partir del diseño para demostrar el papel del Creador había sido planteado por Paley de forma contundente. Allí donde hay función o diseño, buscamos a su autor. El mayor logro de Darwin fue demostrar que la compleja organización y funcionalidad de los seres vivos se puede explicar como resultado de un proceso natural, la selección natural, sin ninguna necesidad de recurrir a un Creador u otro agente externo. El origen y la adaptación de los organismos en su profusión y su maravillosa diversidad fueron así traídos al dominio de la ciencia.

Darwin aceptaba que los organismos están “diseñados” para ciertos cometidos, es decir, están organizados desde un punto de vista funcional. Los organismos están adaptados a ciertas formas de vida y sus partes están adaptadas para realizar ciertas funciones. Los peces están adaptados para vivir en el agua, los riñones están diseñados para regular la composición de la sangre, la mano humana está hecha para manejar objetos. Pero Darwin pasó a proporcionar una explicación natural del diseño. Los aspectos aparentemente diseñados de los seres vivos ahora se podían explicar, al igual que los fenómenos del mundo inanimado, por

medio de los métodos de la ciencia, como el resultado de leyes naturales manifestadas en los procesos naturales.

Darwin consideraba el descubrimiento de la selección natural (y no su demostración de la evolución) como su principal descubrimiento y lo designó como “mi teoría”, una designación que nunca usaba cuando se refería a la evolución de los organismos. El descubrimiento de la selección natural; la conciencia de Darwin de que se trataba de un descubrimiento de enorme importancia porque era la respuesta de la ciencia al argumento a partir del diseño; y la designación que Darwin hacía de la selección natural como “mi teoría”, se pueden rastrear en sus *Red and Transmutation Notebooks B to E*, unos cuadernos comenzados en marzo de 1837, no mucho después de su regreso el 2 de octubre de 1836 de su viaje de cinco años alrededor del mundo en el *HMS Beagle*, y completados a finales de 1839.

La evolución de los organismos era un hecho comúnmente aceptado por los naturalistas en las décadas centrales del siglo XIX. La distribución de especies exóticas por Sudamérica, en las islas de los Galápagos, y en otras partes, y el descubrimiento de restos de animales extinguidos hace mucho tiempo, confirmaron la realidad de la evolución en la mente de Darwin. El desafío intelectual era descubrir la explicación que daría cuenta del origen de las especies, cómo nuevos organismos habían llegado a adaptarse a sus medio ambientes.

Al comienzo de sus *Notebooks* de 1837 a 1839, Darwin registra su descubrimiento de la selección natural y se refiere ya a él como “mi teoría”. A partir de entonces y hasta su muerte en 1882, su vida estaría dedicada a sustanciar la selección natural y sus postulados acompañantes, principalmente la difusión de la variación hereditaria y la enorme fertilidad de los organismos, que sobrepasan con mucho la capacidad de los recursos disponibles. La selección natural se convirtió para Darwin en “una teoría por la cual trabajar”. De forma incesante prosiguió sus observaciones y realizó experimentos para poner a prueba la teoría y resolver posibles objeciones.



## **Diseño sin diseñador**

Es difícil sobreestimar el problema enfrentado por Darwin. Es muy fácil exponer el argumento del diseño para demostrar la existencia de un Creador. Donde quiera que haya función o diseño buscamos a su autor, como había explicado Paley. Un cuchillo se hace para cortar y un reloj para marcar las horas; sus diseños funcionales han sido concebidos por un cuchillero y un relojero. El diseño exquisito y grandioso del Pórtico de la Gloria, despliega el arte extraordinario del Maestro Mateo, no una acumulación casual de piedras a la entrada de la Catedral Románica que hubiera ocurrido entre 1168 y 1188. El naturalismo y belleza de las figuras en las tres puertas que dan a las naves proclaman que el conjunto fue creado por un artista genial siguiendo un propósito preconcebido. De manera similar, las estructuras, órganos y comportamientos de los seres vivos están directamente organizados para realizar ciertas funciones. Por lo tanto, el diseño funcional de los organismos y sus rasgos parecen argumentar a favor de la existencia de un diseñador. El mayor logro de Darwin fue mostrar que la organización directiva de los seres vivos puede explicarse como resultado de un proceso natural, la selección natural, sin ninguna necesidad de recurrir a un Creador o un agente externo. El origen y adaptación de los organismos y sus variaciones profusas y maravillosas fueron trasladados al dominio de la ciencia.

Darwin aceptaba que los organismos estaban "diseñados" para ciertos propósitos, o sea, que están organizados funcionalmente. Los organismos están adaptados a ciertos estilos de vida y sus partes están adaptadas para realizar ciertas funciones. Los cactus están adaptados para vivir en el desierto, las alas están diseñadas para volar, la mano humana está hecha para agarrar. Pero Darwin procede a dar una explicación natural del diseño. Con ello, trasladó al dominio de la ciencia los aspectos de los seres vivos que parecen indicar diseño o propósito.

El logro extraordinario de Darwin es que extendió la revolución copernicana al mundo de los seres animados. El origen y la naturaleza adaptativa de los organismos se podía explicar ahora, igual que los

fenómenos del mundo inanimado, como resultado de las leyes naturales manifestadas en los procesos naturales. La teoría de Darwin encontró oposición en algunos círculos religiosos, no tanto porque proponía el origen evolutivo de los seres vivos (que ya se había propuesto y aun aceptado anteriormente por teólogos cristianos) sino porque el mecanismo causal, la selección natural, excluía a Dios de la explicación del diseño obvio de los organismos. La oposición de la Iglesia Católica Romana a Galileo en el siglo XVII ya había sido motivada, de manera similar, no sólo por la aparente contradicción entre la teoría heliocéntrica y la interpretación literal de la Biblia, sino también por el intento indecoroso de comprender el funcionamiento del universo, la "mente de Dios". Desde entonces, la configuración del universo ya no fue percibida como el resultado del Diseño Divino, sino simplemente como el resultado de procesos inmanentes y ciegos.

Sin embargo, hubo muchos teólogos, filósofos y científicos que no vieron ninguna contradicción, ni entonces ni ahora, entre la evolución de las especies y la fe cristiana. Algunos ven la evolución como el "método de la divina inteligencia", en palabras del teólogo del siglo XIX A. H. Strong. Otros, como el contemporáneo norteamericano de Darwin, Henry Ward Beecher (1818-1887), hicieron de la evolución la piedra angular de su teología. Estas tradiciones han persistido hasta el presente. El Papa Juan Pablo II dijo en octubre de 1996: "la teoría de la evolución ya no es una mera hipótesis. Está [...] aceptada por los investigadores, tras una serie de descubrimientos en diversos campos del conocimiento".

El argumento de selección natural de Darwin trata de explicar el carácter adaptativo de los organismos. Darwin sostiene que las variaciones adaptativas ("variaciones útiles en algún sentido a cada ser") aparecen ocasionalmente y que éstas probablemente incrementarán las posibilidades reproductivas de sus portadores. Las variaciones favorables serán preservadas a través de las generaciones mientras que las perjudiciales serán eliminadas. Darwin añade: "No alcanzo a ver un límite para este poder [la selección natural] que *adapta* lenta y hermosamente cada forma a las más complejas relaciones de la vida". La selección

natural fue propuesta por Darwin en primer lugar para explicar la organización adaptativa, o "diseño", de los seres vivos; es un proceso que promueve o mantiene la adaptación. El cambio evolutivo a lo largo del tiempo y la diversificación evolutiva (multiplicación de las especies) no están promovidos directamente por la selección natural (y así se da la llamada "estasis evolutiva", los numerosos ejemplos de organismos con una morfología que ha cambiado poco, si es que ha cambiado, durante millones de años). Pero el cambio y la diversificación a menudo surgen como subproductos de la selección natural impulsando la adaptación.

### **Selección natural**

La comprensión moderna del principio de la selección natural está formulada en términos genéticos y estadísticos como reproducción diferencial. La selección natural implica que ciertos genes y combinaciones genéticas se transmiten a las generaciones siguientes en promedio más frecuentemente que sus alternativas. Tales unidades genéticas serán más comunes en cada generación siguiente y sus alternativas lo serán menos. La selección natural es un sesgo estadístico en la tasa relativa de reproducción de unidades genéticas alternativas.

La selección natural ha sido comparada con un cedazo que retiene los genes útiles que raramente aparecen y que deja pasar los mutantes dañinos que aparecen con mayor frecuencia. La selección natural actúa de ese modo, pero es mucho más que un proceso puramente negativo, pues es capaz de generar novedad incrementando la probabilidad de combinaciones genéticas que de otro modo serían altamente improbables. En cierto sentido la selección natural es creativa. No "crea" las entidades sobre las que actúa sino que produce combinaciones genéticas adaptativas que de otro modo no hubiesen existido.

El papel creativo de la selección natural no se debe entender en el sentido de la creación "absoluta" que la teología cristiana tradicional predica del acto divino por el cual el universo fue creado *ex nihilo*. La selección natural puede más bien ser comparada con un pintor que crea

un cuadro mezclando y distribuyendo los pigmentos sobre el lienzo de diversas maneras. El lienzo y los pigmentos no son creados por el artista, el cuadro sí. Es concebible que una combinación por azar de pigmentos o piedras pudiese dar como resultado un todo ordenado como lo son una obra de arte o un edificio. Pero la probabilidad de que el Pórtico de la Gloria del Maestro Mateo, o que la gran Fachada del Obradoiro, consumada por Fernando Casas y Nóvoa a mediados del siglo XVIII, hayan resultado de la combinación al azar de piedras, o que toda la Catedral de Santiago haya resultado de la asociación al azar del mármol, los ladrillos y otros materiales, es infinitamente pequeña. Del mismo modo, la combinación de unidades genéticas que portan la información hereditaria responsable de la formación de un ojo de vertebrado no se habría podido producir jamás simplemente por un proceso al azar como el de la mutación, ni siquiera si consideramos los más de tres mil millones de años de existencia de la vida en la Tierra. La complicada anatomía del ojo, lo mismo que el funcionamiento exacto del riñón, es el resultado de un proceso que no es al azar, la selección natural.

### **De monos y pintores**

A veces los críticos han alegado, como argumento en contra de la teoría de la evolución de Darwin, ejemplos que muestran que los procesos al azar no pueden dar lugar a resultados organizados, con sentido. Así se señala que un grupo de monos mecanografiando al azar jamás escribirían *El Origen de las especies*, ni siquiera si dejamos que muchas generaciones de monos, durante millones de años, se sienten ante unas máquinas de escribir.

La crítica sería válida si la evolución dependiese únicamente de procesos al azar. Pero la selección natural no es un proceso al azar sino que promueve la adaptación seleccionando combinaciones que "tienen sentido", o sea, combinaciones que son útiles para los organismos. La analogía de los monos sería más apropiada si existiese un proceso por el cual, primero las palabras con sentido se eligieran cada vez que apareciesen en la máquina de escribir; y después también tuviésemos

máquinas de escribir con teclas con las palabras previamente seleccionadas en lugar de simples letras y que, de nuevo, hubiese un proceso de selección de las frases con sentido cada vez que apareciesen en este segundo tipo de máquina de escribir. Si cada vez que palabras como "el", "origen", "especies", y así sucesivamente, apareciesen en el primer tipo de máquina, se convirtiesen en teclas del segundo tipo de máquina, ocasionalmente éstas producirían algunas frases con sentido. Si tales frases se incorporasen a las teclas de un tercer tipo de máquina, en la que se seleccionara un párrafo con sentido cada vez que apareciese, está claro que al final se podrían producir páginas e, incluso, capítulos "con sentido".

No necesito llevar la analogía tan lejos, puesto que ésta no es totalmente satisfactoria, pero la cuestión está clara. La evolución no es el resultado de procesos puramente al azar, sino más bien es un proceso "selectivo", que escoge las combinaciones adaptativas porque éstas se reproducen más efectivamente y, por tanto, acaban por establecerse en las poblaciones. Estas combinaciones adaptativas constituyen, a su vez, nuevos niveles de organización sobre los que actúa de nuevo la mutación (al azar) y la selección (direccional y no al azar).

La analogía entre un pintor o un arquitecto y la selección natural es deficiente en un sentido importante. Normalmente un pintor o arquitecto parte de una preconcepción de lo que quiere pintar o construir y modificará la pintura para que represente lo que quiere o construirá el edificio imaginado. La selección natural no tiene previsión, ni opera de acuerdo con ningún plan preconcebido. Más bien es un proceso puramente natural que resulta de las propiedades de las entidades fisicoquímicas y biológicas que interaccionan. La selección natural es simplemente una consecuencia de la multiplicación diferencial de los seres vivos. De alguna manera puede parecer que tiene un propósito porque está condicionada por el ambiente: qué organismos se pueden reproducir de manera más efectiva depende de qué variaciones posean que sean útiles en el ambiente en el que viven. Pero la selección natural no anticipa los ambientes del futuro; los cambios ambientales drásticos pueden ser insuperables para los organismos que antes tenían éxito.

El equipo de monos mecanógrafos también es una mala analogía de la evolución por selección natural, porque asume que hay "alguien" que selecciona las combinaciones de letras y de palabras que tienen sentido. En la evolución no hay nadie que seleccione las combinaciones adaptativas. Éstas se seleccionan a sí mismas porque se multiplican más efectivamente que las menos adaptativas.

La analogía de los monos mecanógrafos es mejor que la del artista en un sentido, al menos si aceptamos que no se tienen que obtener de los esfuerzos mecanográficos de los monos frases concretas, sino simplemente cualquier frase o párrafo con sentido. La selección natural no trata de obtener tipos de organismos predeterminados, sino sólo organismos que están adaptados a sus ambientes presentes. Qué características se seleccionarán depende de qué variaciones ocurran en un momento y sitio dados. A su vez esto depende del proceso de mutación al azar, así como de la historia previa de los organismos (en otras palabras, del perfil genético que tienen como consecuencia de su evolución previa). La selección natural es un proceso "oportunista". Las variables que determinan en qué dirección irá son el ambiente, la constitución preexistente de los organismos y las mutaciones que emergen al azar.

### **Oportunismo y diversidad**

Por tanto, la adaptación a un ambiente dado puede ocurrir de diversas maneras. Se puede tomar un ejemplo de las adaptaciones de la vida vegetal a un clima desértico. La adaptación fundamental es a la condición de sequedad, que implica el riesgo de desecación. Durante la mayor parte del año, a veces durante varios años seguidos, no llueve. Las plantas han satisfecho la urgente necesidad de ahorrar agua de diferentes maneras. Los cactus han transformado sus hojas en espinas, convirtiendo sus tallos en barriles que contienen una reserva de agua; la fotosíntesis se efectúa en la superficie del tallo en lugar de en las hojas. Otras plantas no tienen hojas durante la estación seca, pero tras las lluvias les brotan hojas y flores y producen semillas. Las plantas efímeras germinan a partir de

semillas, crecen, florecen y producen semillas, todo en el espacio de pocas semanas mientras está disponible el agua de lluvia; el resto del año las semillas permanecen quiescentes en el suelo.

El carácter oportunista de la selección natural también es evidente en el fenómeno de la radiación adaptativa. La evolución de las moscas *Drosophila* en Hawái es una radiación adaptativa relativamente reciente. Hay unas 3.000 especies de *Drosophila* en el mundo. Casi 1.000 de ellas han evolucionado en el archipiélago, aunque se trata de un área pequeña, aproximadamente la quinta parte de la superficie de España. Además, la diversidad morfológica, ecológica y etológica de las *Drosophila* hawaianas excede a las del resto del mundo.

¿Por qué ha ocurrido en Hawái tal evolución "explosiva"? La sobreabundancia de las drosófilas allí contrasta con la ausencia de muchos otros insectos. Los ancestros de las drosófilas hawaianas llegaron al archipiélago antes de que lo hicieran otros insectos y, por tanto, encontraron una multitud de oportunidades para vivir sin explotar. Respondieron con una radiación adaptativa rápida; aunque todas se deriven probablemente de una única especie colonizadora, se adaptaron a la diversidad de oportunidades a su disposición en diferentes lugares y momentos desarrollando las adaptaciones apropiadas, que varían de una especie a otra.

El proceso de selección natural puede explicar la diversidad y evolución de los organismos como consecuencia de su adaptación a las múltiples y siempre cambiantes condiciones de vida. El registro fósil muestra que la vida ha evolucionado de una manera azarosa. Las radiaciones, las expansiones, las sustituciones de una forma por otra, las tendencias ocasionales pero irregulares a cambiar en cierta dirección y las omnipresentes extinciones, se explican mejor por la selección natural de los organismos sometidos a los caprichos de las mutaciones genéticas y de los desafíos ambientales. La explicación científica de estos eventos no necesita recurrir a un plan organizado de antemano, sea impreso desde fuera por un diseñador omnisciente y todopoderoso, sea resultado de alguna fuerza inmanente que impulsa el proceso hacia metas definidas.

La evolución biológica difiere de un cuadro o de un monumento en que no es el resultado de un diseño preconcebido por un artista o arquitecto. La selección natural da cuenta del diseño de los organismos, porque las variaciones adaptativas tienden a incrementar la probabilidad de supervivencia y reproducción de sus portadores a expensas de aquéllas que son poco o nada adaptativas.

### **Azar y necesidad**

No obstante, el azar es una parte integral del proceso evolutivo. Las mutaciones que dan lugar a variaciones hereditarias disponibles para la selección natural se originan al azar, independientemente de si son beneficiosas o perjudiciales para sus portadores. Pero este proceso al azar (así como otros que participan en el gran drama de la vida) está contrarrestado por la selección natural, que preserva aquello que es útil y elimina lo perjudicial. Sin mutación, la evolución no ocurriría porque no habría variaciones que pudiesen ser transmitidas de manera diferencial de una generación a otra. Pero sin selección natural, el proceso de mutación daría lugar a la desorganización y la extinción porque la mayoría de las mutaciones son perjudiciales. La mutación y la selección han impulsado conjuntamente el maravilloso proceso que, iniciado en los organismos microscópicos, ha generado orquídeas, aves y humanos.

La teoría de la evolución muestra al azar y a la necesidad entrelazados, el meollo de la vida; azar y determinismo están entrelazados en un proceso natural que ha dado lugar a las entidades más complejas, diversas y bellas del universo: los organismos que pueblan la Tierra, incluyendo los humanos que piensan y aman, están dotados de libre albedrío y poderes creativos, y son capaces de analizar el mismo proceso evolutivo que les ha otorgado la existencia. Éste es el descubrimiento fundamental de Darwin: que hay un proceso que es creativo aunque no sea consciente. Y ésta es la revolución conceptual que Darwin completó: que todo en la naturaleza, incluyendo el origen de los organismos vivos, puede explicarse como el resultado de procesos naturales gobernados por leyes naturales. Esto no es sino una visión fundamental que ha



cambiado para siempre la forma en que los humanos nos percibimos a nosotros mismos y nuestro lugar en el universo.

### **Un proceso creativo**

Como he señalado anteriormente, a veces se tiene la idea de que la selección natural es un proceso puramente negativo, la eliminación de mutaciones perjudiciales. Pero la selección natural es mucho más que eso, pues es capaz de generar novedad al incrementar la probabilidad de combinaciones genéticas que de otro modo serían extremadamente improbables. La combinación de unidades genéticas que contiene la información hereditaria responsable de la formación del ojo de los vertebrados no se hubiera producido jamás por un mero proceso aleatorio. La evolución no es un proceso gobernado por acontecimientos fortuitos. La complicada anatomía del ojo, al igual que el exacto funcionamiento del riñón se deben, como ya se ha dicho, al resultado de un proceso no azaroso: la selección natural.

La selección natural produce combinaciones de genes que de lo contrario serían muy improbables porque es un proceso que avanza por etapas. El ojo humano no apareció súbitamente en toda su perfección actual. Nuestros antepasados tuvieron durante más de quinientos millones de años órganos sensibles a la luz. La percepción de luz, y más tarde la visión, eran importantes para la supervivencia de estos organismos y su éxito reproductivo. En consecuencia, la selección natural favoreció los genes y las combinaciones genéticas que aumentaban la eficacia funcional del ojo. Dichas unidades genéticas se acumularon de forma gradual, conduciendo finalmente al ojo de los vertebrados, de alta complejidad y eficacia. La selección natural es un proceso creativo, aunque no crea los materiales en bruto – las mutaciones genéticas – sobre las cuales actúa.

Como se ha dicho anteriormente, la selección natural no se anticipa a los medio ambientes del futuro; los cambios medioambientales drásticos pueden ser insuperables para organismos que anteriormente estuvieron bien adaptados. La extinción de especies es un resultado

habitual del proceso evolutivo. Las especies hoy existentes representan el equilibrio entre la aparición de nuevas especies y su eventual extinción. El inventario disponible de especies vivas incluye casi dos millones de especies, aunque se calcula que ahora hay en existencia al menos diez millones. Pero sabemos que más del noventa y nueve por ciento de todas las especies que han vivido sobre la Tierra se han extinguido sin dejar descendencia. Así, desde el comienzo de la vida sobre la Tierra hace más de tres mil quinientos millones de años, el número de especies diferentes que han vivido sobre nuestro planeta probablemente supere los mil millones.

El registro fósil muestra que la vida ha evolucionado de una forma azarosa. Las radiaciones de algunos grupos de organismos; las expansiones numéricas y territoriales de otros grupos; los relevos de una forma por otra; la ocasional pero irregular ocurrencia de tendencias hacia un incremento del tamaño u otras formas de cambio; y las siempre presentes extinciones, se explican por la selección natural de los organismos sometidos a los caprichos de la mutación genética, el desafío medioambiental y la historia pasada. El relato científico de estos acontecimientos es incompatible con un plan predeterminado, ya sea impreso desde el principio o a través de sucesivas intervenciones por un Diseñador omnisciente y todopoderoso. La evolución biológica difiere de una pintura o un monumento en que no es el resultado de un diseño preconcebido. El diseño de los organismos no es inteligente, sino imperfecto y, a veces, disfuncional.

Los argumentos de los defensores del “diseño inteligente” contra la increíble improbabilidad de una explicación aleatoria de las adaptaciones de los organismos son irrelevantes porque la evolución no está gobernada por mutaciones fortuitas. Los rasgos que los organismos adquieren en sus historias evolutivas no son fortuitos, sino que están determinados por su utilidad funcional para los organismos, diseñados, por así decirlo, para servir a sus necesidades vitales.

## **Diversidad y complejidad**

El punto que merece la pena subrayar una vez más es que la evolución no es el resultado de procesos aleatorios, sino que hay un proceso selectivo, que “escoge” combinaciones adaptativas porque éstas se reproducen de manera más eficaz y así llegan a predominar en las poblaciones de organismos. Las combinaciones adaptativas constituyen, a su vez, nuevos niveles de organización sobre los cuales vuelven a operar los procesos de mutación (aleatoria) más selección (no aleatoria o direccional). La complejidad de organización de los animales y las plantas ha surgido como consecuencia de la selección natural y su lento y progresivo avance, a lo largo de eones de tiempo.

Varios cientos de millones de generaciones separan a los animales modernos de los animales primitivos del período geológico cámbrico (hace 542 millones de años). El número de mutaciones que pueden ocurrir, y las finalmente seleccionadas, en millones de individuos a lo largo de millones de generaciones es difícil de comprender para una mente humana. Pero podemos entender fácilmente que la acumulación de millones de pequeños cambios funcionalmente ventajosos pudo producir órganos adaptativos de notable complejidad, como el ojo. Paleontólogos y biólogos han acumulado evidencia de la evolución gradual del ojo, como de otros órganos y, también, organismos.

A lo largo de eones de tiempo, multitudes de organismos complejos han aparecido sobre la Tierra. Mayor complejidad no es una consecuencia necesaria de la selección natural, pero aparece de forma ocasional como un resultado estadístico. Ocasionalmente, una mutación que aumenta la complejidad será favorecida por la selección natural, por encima de las mutaciones que no incrementan la complejidad. Mutaciones que incrementan la complejidad se acumulan así con el paso del tiempo, pero solo en algunos grupos de organismos. Las clases de organismos más longevos que hay sobre la Tierra son las bacterias microscópicas, que han existido de forma continuada en nuestro planeta durante más de tres mil millones de años y sin embargo no muestran mayor complejidad que sus antiguos antepasados. Organismos más

complejos aparecieron mucho después, sin la eliminación de sus antepasados más simples. Por ejemplo, los primates aparecieron sobre la tierra sólo hace sesenta millones de años; nuestra especie, el *Homo sapiens*, apareció hace menos de doscientos mil años.

### **Evolución: ¿hecho o teoría?**

Críticos de la evolución y, frecuentemente el público, declaran que la evolución es sólo una teoría y no un hecho. La ciencia, dicen, se basa en la observación y la experimentación, pero nadie ha visto el origen del universo o la evolución de las especies, ni estos acontecimientos han sido reproducidos en el laboratorio o por medio de experimentos. Estas críticas se basan en una concepción errónea acerca de la naturaleza de la ciencia y cómo se prueban y validan las teorías científicas.

Quando los científicos hablan de la “teoría” de la evolución, utilizan la palabra de modo distinto a como lo hace la gente en el lenguaje habitual. En la forma de hablar cotidiana, “teoría” con frecuencia significa “conjetura” o “corazonada”, como en: “Tengo una teoría sobre dónde se esconde Osama Bin Laden”. En la ciencia, sin embargo, una teoría es una explicación elaborada, acerca de algún aspecto del mundo natural que incluye observaciones, hechos, leyes, inferencias, e hipótesis comprobadas. Los científicos a veces emplean la palabra teoría para explicaciones provisionales que carecen de pruebas de apoyo sustanciales. Dichas explicaciones provisionales son llamadas de forma más precisa “hipótesis.”

Según la teoría de la evolución, los organismos están emparentados por ascendencia común. Hay una multiplicidad de especies porque los organismos cambian de generación en generación, y los linajes diferentes cambian de forma diferente. Las especies que comparten un antepasado reciente son por tanto más parecidas que las que tienen antepasados remotos. Así, los humanos y los chimpancés son, en configuración y constitución genética, más similares entre sí de lo que lo son respecto a los babuinos o los elefantes.

Los científicos coinciden en que el origen evolutivo de los animales y las plantas es una conclusión científica más allá de toda duda razonable. Lo sitúan junto a semejantes conceptos establecidos como que la Tierra es redonda y gira alrededor del Sol, y la composición molecular de la materia. Que la evolución ha ocurrido es, en lenguaje corriente, un hecho.

¿Cómo es compatible esta declaración con la idea establecida de que la ciencia se basa en la observación y la experimentación, dado que nadie ha observado la evolución de las especies, y mucho menos la haya reproducido por medio de experimentos?. Lo que los científicos observan no son los conceptos o las conclusiones generales de las teorías, sino sus consecuencias. La teoría heliocéntrica de Copérnico afirma que la Tierra gira alrededor del Sol. Nadie ha observado este fenómeno, pero lo aceptamos debido a las numerosas confirmaciones de sus consecuencias predichas.

Aceptamos que la materia está compuesta de átomos, aunque nadie los haya visto, debido a las observaciones y los experimentos que así lo confirman en física y química. Lo mismo sucede con la teoría de la evolución. Por ejemplo, la declaración de que los humanos y los chimpancés están más estrechamente emparentados entre sí de lo que lo están con los babuinos conduce a la predicción de que el ADN es más parecido entre los humanos y los chimpancés que entre los chimpancés y los babuinos. Para comprobar esta predicción, los científicos seleccionan un gen particular, examinan su estructura de ADN en cada especie, y de ese modo corroboran la inferencia. Experimentos de esta clase se repiten de formas muy diversas para obtener mayor seguridad en la conclusión. Y así es en lo que respecta a miríadas de predicciones e inferencias entre toda clase de organismos.

El hecho de la evolución -es decir, que los organismos están emparentados por una ascendencia común y que los organismos cambian y se diversifican a través del tiempo en larga escala- está establecido con toda certidumbre. Darwin reunió muchas pruebas en su apoyo, pero las pruebas no han dejado de acumularse continuamente

desde entonces, procedentes de todas las disciplinas biológicas. El origen evolutivo de los organismos es hoy una conclusión científica establecida más allá de la duda razonable, dotada de la clase de certidumbre que los científicos atribuyen a teorías científicas bien establecidas en física, astronomía, química y biología molecular. Este grado de certidumbre más allá de la duda razonable es lo que se implica cuando los biólogos dicen que la evolución es un “hecho”; el origen evolutivo de los organismos es algo que aceptan prácticamente todos los biólogos.

Darwin y otros biólogos del siglo XIX hallaron pruebas convincentes de la evolución biológica en el estudio comparativo de los organismos vivos, en su distribución geográfica, y en los restos fósiles de organismos extinguidos. Desde la época de Darwin, la evidencia de estas fuentes se ha vuelto más fuerte y más completa, mientras las disciplinas biológicas que han surgido recientemente – la genética, la bioquímica, la ecología, el comportamiento animal (la etología), la neurobiología y especialmente la biología molecular – han proporcionado potentes pruebas adicionales y confirmación detallada.

A los evolucionistas ya no les preocupa obtener pruebas que apoyen el hecho de la evolución, sino que están más interesados en qué clases de conocimiento se pueden obtener a partir de diferentes disciplinas biológicas para desenredar los diferentes factores, medioambientales y orgánicos, que determinan el cambio evolutivo en diversos linajes y en diferentes épocas.

### **La evidencia de los fósiles**

Los paleontólogos han recuperado y estudiado los restos fósiles de muchos miles de organismos que vivieron en el pasado. Dicho registro fósil muestra que muchas clases de organismos extintos poseían formas muy diferentes a las de cualquiera de los ahora vivos. El registro fósil también muestra sucesiones de organismos que manifiestan a través del tiempo su transición de una forma a otra.

La datación radiométrica indica que la Tierra se formó hace alrededor de cuatro mil quinientos millones de años. Los fósiles más

primitivos se parecen a microorganismos como las bacterias; los más antiguos de estos fósiles aparecen en rocas de tres mil quinientos millones de años. Los fósiles animales más antiguos que se conocen, de unos 700 millones de años, proceden de la llamada fauna Ediacara, pequeñas criaturas con aspecto de gusanos con cuerpos blandos. Numerosos fósiles pertenecientes a muchos filos animales y que exhiben esqueletos mineralizados aparecen en rocas de unos 540 millones de años de antigüedad, durante el período geológico conocido como Cámbrico. (Un “filo” es un gran grupo de organismos, como los moluscos o los cordados). Estos organismos son diferentes de los organismos que viven ahora y de los que vivieron en tiempos intermedios. Algunos son tan radicalmente diferentes que los paleontólogos han creado nuevos filos para clasificarlos. Los primeros vertebrados (filo “cordados”), animales con espina dorsal, aparecieron hace unos 500 millones de años; los primeros mamíferos, hace unos 200 millones de años. La historia de la vida registrada por los fósiles presenta una fuerte evidencia de la evolución.

El registro fósil es incompleto. De la pequeña proporción de organismos conservados como fósiles, sólo una diminuta fracción ha sido recuperada y estudiada por los paleontólogos. En algunos casos la sucesión de formas a lo largo del tiempo ha sido reconstruida con mucho detalle. Un ejemplo es la evolución del caballo, que puede remontarse a un animal del tamaño de un perro con varios dedos en cada pie y dientes apropiados para ramonear (comer brotes tiernos, ramitas y hojas de árboles y arbustos); este animal, llamado el caballo del alba (nombre científico: *Hyracotherium*), vivió hace más de 50 millones de años. La forma más reciente, el caballo moderno (*Equus*), es de un tamaño mucho mayor, tiene un solo dedo en cada pata, y posee dientes apropiados para pastar (comer herbaje en cultivo). Las formas transitorias se conservan bien como fósiles, al igual que otras clases de caballos extintos que evolucionaron en diferentes direcciones y no dejaron descendientes vivos.

A lo largo de los años se han descubierto muchos fósiles intermedios entre diversos organismos, algunos de ellos muy

importantes. Dos ejemplos que han recibido reciente atención en los medios de comunicación son el *Archaeopteryx*, intermedio entre reptiles y aves, y el *Tiktaalik*, intermedio entre peces y tetrápodos (animales con cuatro miembros).

El primer *Archaeopteryx* fue descubierto en Bavaria en 1861, dos años después de la publicación de *El origen* de Darwin, y recibió gran atención porque arrojaba luz sobre el origen de las aves y apoyaba el postulado de Darwin sobre la existencia de eslabones perdidos. Otros especímenes de *Archaeopteryx* se han descubierto en los últimos cien años. El más reciente, el décimo espécimen hasta ahora recuperado, se describió en diciembre de 2005.

El *Archaeopteryx* vivió durante el período Jurásico tardío, hace unos ciento cincuenta millones de años, y exhibía una mezcla de rasgos de ave y reptil. Todos los especímenes conocidos son pequeños, más o menos del tamaño de un cuervo, y comparten muchas características anatómicas con algunos de los dinosaurios bípedos pequeños. El esqueleto del *Archaeopteryx* posee forma de reptil, pero el *Archaeopteryx* tenía plumas, claramente visibles en los fósiles, una calavera parecida a la de las aves y cráneo expandido, grandes cuencas oculares, y un pronunciado pico. Sin embargo, a diferencia de las aves actuales el *Archaeopteryx* tenía dientes y una larga cola, similar en estructura a la de los dinosaurios más pequeños. Las patas traseras son semejantes a las de las aves, pero el bien conservado pie del espécimen más reciente muestra un segundo dedo hiperextensible, parecido a la garra asesina del dinosaurio *Velociraptor*. Los miembros anteriores conservaban características reptilianas primitivas y no habían completado aún su transformación en alas. El *Archaeopteryx* quizá fuese capaz de volar, pero no era capaz de un vuelo sostenido. El espécimen más reciente indica que el *Archaeopteryx* vivió sobre todo en tierra, en vez de en los árboles.

Los paleontólogos han sabido durante más de un siglo que los tetrápodos (animales de cuatro miembros: anfibios, reptiles, aves y mamíferos) evolucionaron a partir de un grupo particular de peces, llamados crossopterigios. Hasta hace poco, el *Panderichthys* era el pez fósil



conocido que se hallaba más próximo a los tetrápodos. El *Panderichthys* tenía algo de forma de cocodrilo, con un esqueleto con aleta pectoral y cintura escapular que posee una forma intermedia entre los de los típicos peces crossopterigios y los de los tetrápodos. Pero este pez de transición todavía tiene branquias cubiertas de láminas, que bombeaban agua sobre las branquias y la calavera estaba fundida a su cintura escapular. Parece que el *Panderichthys* era capaz de “caminar” en aguas poco profundas, pero probablemente no en tierra. El *Panderichthys* fue descubierto en Latvia, donde vivió en torno al período devoniano medio, hace unos 385 millones de años.

Los fósiles de tetrápodos más primitivos y más próximos al aspecto de pez hasta ahora conocidos proceden del Devónico, de unos 376 millones de años de antigüedad, de Escocia y Latvia. El *Ichthyostega* y el *Acanthostega* de Groenlandia, que vivieron más recientemente, hace unos 365 millones de años, son sin duda tetrápodos, con miembros provistos de dedos, aunque conservan de sus antepasados peces algunas características como auténticas colas de pescado con bastoncillos córneos. Así, el vacío temporal entre el pez con más aspecto de tetrápodo y los tetrápodos con más aspecto de peces era de casi diez millones de años, entre hace unos 385 y 376 millones de años.

El recientemente descubierto *Tiktaalik* está muy próximo a cubrir este vacío; es el más cercano al paso intermedio entre los peces y los tetrápodos hasta ahora conocido. El *Tiktaalik* era un animal aplanado, superficialmente con aspecto de salamandra y una calavera de unos 20 centímetros de longitud. Las aletas pectorales son miembros superiores incipientes, con robustos esqueletos internos, pero bordeados de bastoncillos córneos en vez de dedos. Los rasgos pisciformes incluyen pequeñas aletas pélvicas, los ya mencionados bastoncillos córneos en sus apéndices pareados, y arcos branquiales muy desarrollados, que sugieren que eran animales que permanecían en su mayor parte en un medio acuático. Pero la cubierta ósea de las branquias ha desaparecido indicando un reducido flujo de agua a través de la cámara branquial. El hocico alargado sugiere un cambio desde el succionar hacia el agarrar

presas, sobre todo en tierra. Las relativamente largas costillas indican que el *Tiktaalik* podía sostener su cuerpo fuera del agua.

### **Anatomía y desarrollo embrionario**

Los esqueletos de las tortugas, los caballos, los seres humanos, los pájaros, las ballenas y los murciélagos guardan una asombrosa semejanza, a pesar de las diferentes formas de vida de estos animales y la diversidad de sus entornos. La correspondencia, hueso a hueso, se puede ver fácilmente en las extremidades así como en otras partes del cuerpo. Desde un punto de vista meramente práctico, parece incomprensible que una tortuga y una ballena puedan nadar, un caballo galopar, una persona escribir, y un pájaro o murciélago volar con estructuras de miembros superiores hechas de los mismos huesos. Un ingeniero podría diseñar mejores miembros en cada caso. Pero si se acepta que todos estos animales heredaron sus estructuras óseas a partir de un antepasado común y sólo se modificaron al adaptarse a diferentes formas de vida, la similitud de sus estructuras tiene sentido.

La anatomía comparada investiga las homologías, o similitudes heredadas, entre los organismos en su estructura ósea y en otras partes del cuerpo. La correspondencia de estructuras es típicamente muy próxima entre algunos organismos -las diversas variedades de pájaros cantores, por ejemplo- pero no lo es tanto cuando los organismos que se comparan tienen un parentesco más lejano dentro de su historia evolutiva. Las similitudes son menores entre los mamíferos y las aves que las que se dan entre especies de mamíferos, y son todavía menores entre los mamíferos y los peces. Las semejanzas en estructura, por tanto, no sólo manifiestan evolución sino que también ayudan a reconstruir la filogenia, o historia evolutiva, de los organismos.

La anatomía comparada asimismo revela por qué la mayoría de las estructuras de los organismos no son perfectas. Al igual que los miembros superiores de las tortugas, los caballos, los seres humanos, los pájaros y los murciélagos, las partes del cuerpo de un organismo no están ni mucho menos perfectamente adaptadas a su función porque han sido

modificadas a partir de una estructura heredada en vez de estar diseñadas a partir de materiales completamente en bruto para un objetivo específico. La anatomía de los animales refleja que ha sido diseñada para adecuarse a sus estilos de vida. Pero es un diseño “imperfecto”, logrado por selección natural, más que un diseño “inteligente”, como lo sería si fuese diseñado por un ingeniero. La imperfección de las estructuras es una prueba de la evolución y contraria a los argumentos a favor del diseño inteligente.

Darwin y sus seguidores hallaron apoyos adicionales a la evolución en el estudio de la embriología, la ciencia que investiga el desarrollo de los organismos desde el huevo fecundado al momento del nacimiento o salida del cascarón. Los vertebrados, desde los peces, pasando por los lagartos hasta llegar a los humanos, se desarrollan de maneras que son notablemente parecidas durante las primeras etapas, pero se van diferenciando cada vez más a medida que los embriones se acercan a la madurez. Las semejanzas persisten durante más tiempo entre los organismos que están más estrechamente emparentados (por ejemplo, los humanos y los monos) que entre aquellos que lo están menos (los humanos y los tiburones).

Los patrones de desarrollo comunes reflejan un parentesco evolutivo. Los lagartos y los humanos comparten un patrón de desarrollo heredado de su remoto antepasado común; el patrón heredado de cada uno fue modificado gradualmente en direcciones distintas a medida que los linajes descendientes evolucionaban. Las etapas comunes embrionarias de las dos criaturas reflejan las represiones impuestas por esta herencia común, que evita los cambios que no han sido requeridos por sus medio ambientes y sus formas de vida divergentes.

Los embriones de los humanos y otros vertebrados no acuáticos exhiben aberturas de branquias aunque ellos nunca respiran a través de branquias. Estas aberturas se encuentran en los embriones de todos los vertebrados porque tienen como antepasados comunes a los peces en los cuales estas estructuras evolucionaron en primer lugar. Los embriones humanos también exhiben a la cuarta semana de gestación una cola bien

definida, que alcanza su máxima longitud a las seis semanas. Similares colas embrionarias se hallan en otros mamíferos, como los perros, los caballos y los monos; en los humanos, sin embargo, la cola con el tiempo se acorta, persistiendo sólo como un rudimento en el cóccix adulto. Los rudimentos embrionarios son contradictorios con las reclamaciones del diseño inteligente: ¿por qué una estructura sería diseñada para formarse durante la primera gestación si desaparecerá antes del nacimiento?. La evolución da sentido a los rudimentos embrionarios.

Una estrecha relación evolutiva entre organismos que parecen radicalmente diferentes como adultos, a veces puede reconocerse por sus homologías embrionarias. Los percebes, por ejemplo, son crustáceos sedentarios muy poco parecidos a los crustáceos que nadan libremente como las langostas, las gambas o los copépodos. Sin embargo, pasan por un estado larvario de natación libre, el “nauplius”, que es, sin lugar a dudas, muy semejante al de otras larvas de crustáceos.

Los rudimentos embrionarios que nunca se desarrollan del todo, como las aberturas de branquias en los humanos, son comunes en toda clase de animales. Sin embargo, algunos persisten como rudimentos adultos, reflejando la ascendencia evolutiva. Un conocido órgano rudimentario en los humanos es el apéndice vermiforme. Esta estructura con forma de gusano se une a una breve sección del intestino llamada el intestino ciego, que está localizado en el punto donde se juntan el intestino grueso y el delgado. El apéndice humano vermiforme es un rudimento sin función de un órgano totalmente desarrollado presente en otros mamíferos, como el conejo y otros herbívoros, donde un gran intestino ciego y el apéndice almacenan celulosa vegetal para posibilitar su digestión con la ayuda de bacterias. Los rudimentos son ejemplos de imperfecciones -como las imperfecciones que se ven en las estructuras anatómicas- que argumentan contra la creación por diseño pero son completamente comprensibles como una consecuencia de la evolución por selección natural.

## Biogeografía

Existen unas 3.000 especies de moscas de la fruta *Drosophila* en el mundo; cerca de mil de ellas viven exclusivamente en Hawái, como se hizo notar anteriormente. Asimismo en Hawái hay más de 1.000 especies de caracoles y otros moluscos de tierra que no existen en ninguna otra parte. Esta diversidad inusual se explica fácilmente por la evolución. Las islas de Hawái están extremadamente aisladas y han tenido pocos colonizadores: es decir, animales y plantas que llegaron allí procedentes de otro lugar y establecieron poblaciones. Estas especies que colonizaron las islas hallaron muchos nichos ecológicos no ocupados, entornos locales adecuados para mantenerles y sin predadores que les impidieran multiplicarse. En respuesta, las especies colonizadoras se diversificaron rápidamente; este proceso de diversificación para llenar nichos ecológicos se llama radiación adaptativa.

La notable diversificación de la vida en diversas partes del mundo evidencia el oportunismo de la selección natural. Aunque el clima y otras características del medio ambiente puedan ser similares en latitudes similares, la flora y la fauna son distintas en diferentes continentes y en distintas islas. Esto ocurre porque la selección natural depende de cambios previos, de modo que la diversificación de un continente a otro, o entre continentes e islas, o entre islas es acumulativa a lo largo del tiempo. El cambio evolutivo se produce en respuesta al medio ambiente pero está condicionado por la historia: los mamíferos no evolucionan en peces, ni los insectos en moluscos.

Las observaciones de Darwin sobre la flora y la fauna de Sudamérica, tan diferentes de las del Viejo Mundo, le convencieron de la realidad de la evolución. La evidencia a partir de la biogeografía asimismo es manifiesta a una escala mucho menor que la continental: Darwin observó que diversas islas de los Galápagos tenían diferentes clases de tortugas y distintas especies de pinzones, las cuales a su vez eran diferentes de las halladas en la Sudamérica continental. El caso particular de la evolución en Hawái es un buen ejemplo de cómo la biogeografía evidencia la evolución. La biogeografía, la caprichosa

distribución de los organismos por todo el mundo, se puede interpretar de forma razonable como un resultado de la evolución, más que como el capricho del Creador.

## **Evolución molecular**

La biología molecular, una disciplina que apareció en la segunda mitad del siglo XX, casi cien años después de la publicación de *El origen de las especies*, ha proporcionado las pruebas más sólidas hasta ahora de la evolución de los organismos. La biología molecular evidencia la evolución de dos maneras. Primero, mostrando la unidad de la vida en la naturaleza del ADN y los funcionamientos de los organismos al nivel de las enzimas y otras moléculas proteínicas. Segundo y más importante para los evolucionistas, la biología molecular ha hecho posible reconstruir relaciones evolutivas que antes se desconocían; y confirmar, refinar y calcular todas las relaciones evolutivas desde el antepasado común universal hasta todos los organismos vivos. La precisión con la que se pueden reconstruir estos acontecimientos es una razón de por qué la evidencia de la biología molecular es tan útil y tan convincente para los evolucionistas.

Los componentes moleculares de los organismos poseen una notable uniformidad: tanto en su propia naturaleza como en las formas en las que se sintetizan y en las funciones que llevan a cabo. En todas las bacterias, arqueas, plantas, animales y humanos, las instrucciones que guían el desarrollo y funcionamiento de los organismos están contenidas en el mismo material hereditario, el ADN, una larga molécula constituida por diferentes secuencias de los mismos cuatro nucleótidos componentes (representados como A, C, G y T). Las miles de proteínas enormemente diversas que existen en los organismos son sintetizadas a partir de diferentes combinaciones en secuencias de los mismos 20 aminoácidos. Estos son los únicos aminoácidos que forman todas las proteínas; aunque existen otros varios cientos de aminoácidos. Además, el código genético, por medio del cual la información contenida en el ADN del núcleo de la célula se transmite a las proteínas, es

prácticamente el mismo en todos los organismos. Caminos metabólicos similares -secuencias de reacciones bioquímicas- son utilizados por los organismos más diversos para producir energía y constituir los componentes de las células. Muchos otros caminos son teóricamente posibles, pero sólo un número limitado se utiliza en los organismos; los mismos caminos en organismos con formas de vida extremadamente diferentes.

La unidad de la vida revela la continuidad genética y la ascendencia común de todos los organismos. No hay otra forma racional de explicar su uniformidad molecular, dado que numerosas estructuras alternativas y procesos fundamentales en principio son igualmente probables. El código genético, al que se ha aludido anteriormente, podría servir como ejemplo. Cada secuencia particular de tres nucleótidos (llamada “triplete” o “codón”) en el ADN nuclear actúa como un código para exactamente el mismo aminoácido particular en todos los organismos. Por ejemplo, en cualquier gen dado de cualquier organismo, el codón GCC determina que el aminoácido alanina sea incorporado a la proteína especificada por el gen; el codón GAC determina la incorporación del aminoácido asparragina; y así sucesivamente. La correspondencia universal entre el lenguaje (codones) del ADN y el lenguaje (aminoácidos) de la proteína, no es más necesaria de lo que lo es para dos idiomas hablados cualesquiera, emplear la misma combinación de letras para representar el mismo concepto u objeto particular. Si descubrimos que ciertas secuencias de letras -planeta, árbol, mujer- se utilizan con significados idénticos en un número de libros diferentes, podemos estar seguros de que los idiomas empleados en los libros son idénticos, esto es, no son idiomas con origen independiente.

La biología molecular hace posible reconstruir la historia evolutiva de las especies vivientes con tanto detalle y precisión como se desee. Solo es cuestión de invertir tiempo y recursos. Esto se debe a que los genes y las proteínas son moléculas grandes que contienen información en la secuencia de sus componentes de forma parecida al modo en que se transmite el significado de las oraciones en cualquier idioma por medio de secuencias de letras y palabras. Las secuencias que

constituyen los genes son transmitidas por los padres a la progenie y son idénticas de generación en generación, salvo por lo que respecta a cambios ocasionales introducidos por mutaciones. Las especies estrechamente emparentadas poseen secuencias de ADN muy similares; las escasas diferencias reflejan las mutaciones ocurridas desde su último antepasado común. Las especies que poseen un parentesco menos directo entre unas y otras exhiben más diferencias en su ADN que las más directamente emparentadas, porque ha transcurrido más tiempo desde su último antepasado común. Esta es la noción fundamental que hace posible la reconstrucción de la historia evolutiva.

El ADN y las proteínas son largas moléculas lineales constituidas por secuencias de unidades -nucleótidos en el caso de los ácidos nucleicos, aminoácidos en el caso de las proteínas- que incluyen la información evolutiva. Al comparar la secuencia de los componentes en dos macromoléculas se determina el número de letras (nucleótidos o aminoácidos) que son diferentes. Debido a que la evolución normalmente ocurre cambiando una unidad cada vez, el número de diferencias es una indicación del carácter reciente de la ascendencia común.

El grado de semejanza en la secuencia de nucleótidos, o de aminoácidos, se puede cuantificar de modo preciso. Por ejemplo, en los humanos y los chimpancés, la molécula de proteína llamada citocromo *c*, que desempeña una función vital en la respiración dentro de las células, se compone de los mismos 104 aminoácidos dispuestos exactamente en el mismo orden. Sin embargo, difiere del citocromo *c* de los monos rhesus por un aminoácido, del de los caballos por 11 aminoácidos adicionales, y del citocromo *c* del atún por 21 aminoácidos adicionales.

El grado de semejanza refleja el tiempo pasado desde el último antepasado común. Así, las inferencias obtenidas a partir de la anatomía comparada y otras disciplinas relacionadas con la historia evolutiva se pueden poner a prueba en estudios moleculares de ADN y proteínas examinando las secuencias de nucleótidos y aminoácidos. La autoridad de esta clase de examen es abrumadora: cada uno de los miles de genes y



miles de proteínas contenidos en un organismo proporciona un examen independiente de la historia evolutiva de ese organismo.

Los estudios evolutivos moleculares poseen tres notables ventajas sobre la anatomía comparada y las disciplinas clásicas: precisión, diversificación y multiplicidad. Lo primero es que la información es fácilmente cuantificable. El número de unidades que son diferentes se establece con facilidad cuando se conoce la secuencia de unidades para una macromolécula dada en diferentes organismos. La segunda ventaja es que se pueden hacer comparaciones entre muy diversas clases de organismos. La anatomía comparada puede decir muy poco cuando, por ejemplo, se comparan organismos tan distintos como las levaduras, los pinos y los seres humanos, pero existen numerosas secuencias de ADN y proteínas que se pueden comparar en los tres. La tercera ventaja es la multiplicidad. Cada organismo posee miles de genes y proteínas, que en su conjunto reflejan la misma historia evolutiva. Si la investigación de un gen o proteína particular no resuelve de forma satisfactoria la relación evolutiva de un conjunto de especies, se pueden investigar genes y proteínas adicionales hasta que el asunto haya sido resuelto.

Por otra parte, los genes evolucionan en tasas muy diferentes de unos a otros, lo cual abre la oportunidad de investigar diferentes genes para alcanzar diversos grados de resolución en el árbol de la evolución. Los evolucionistas confían en genes de evolución lenta para reconstruir acontecimientos evolutivos remotos, pero lo hacen en genes que evolucionan más rápidamente para reconstruir la historia evolutiva de organismos que se separaron hace menos tiempo.

### **¿De donde venimos?**

En tiempos de Darwin no se conocía ningún fósil que pudiera haber sido de nuestros antepasados después de que el linaje humano se separase de los simios, nuestros parientes más próximos. El “eslabón perdido” era un argumento de los críticos contra la evolución. Pero el eslabón perdido ya ha sido encontrado. No uno, sino centenares de restos fósiles pertenecientes a cientos de individuos homínidos se han

descubierto desde la época de Darwin y se siguen descubriendo a un ritmo acelerado. Los fósiles que pertenecen al linaje humano tras su separación de los linajes simios se llaman homínidos.

Los fósiles de homínidos más antiguos que se conocen tienen entre 6 y 7 millones de años de antigüedad, proceden de África, y son conocidos como *Sabelanthropus* y *Orrorin* (o *Preanthropus*). Estos antepasados eran predominantemente bípedos cuando estaban en tierra pero tenían cerebros muy pequeños. El *Ardipithecus* vivió entre hace unos 4,4 y 5,4 millones de años, también en África. Numerosos restos fósiles de diversos orígenes africanos se conocen del *Australopithecus*, un homínido que vivió entre hace 3 millones y 4 millones de años. El *Australopithecus* tenía una postura erguida humana pero una capacidad craneal de menos de 500 cc (centímetros cúbicos), comparable a la del gorila o el chimpancé y de más o menos un tercio de la de los humanos modernos (500 cc son equivalentes a 500 gramos). La cabeza del *Australopithecus* exhibía una mezcla de características simias y humanas: una frente baja y un largo rostro simiesco pero con dientes proporcionados como los de los humanos. Otros primeros homínidos parcialmente contemporáneos del *Australopithecus* incluyen al *Kenyanthropus* y el *Paranthropus*; ambos poseían cerebros comparativamente pequeños, aunque algunas especies de *Paranthropus* poseían cuerpos más grandes. El *Paranthropus* representa una rama lateral del linaje homínido.

Junto con una capacidad craneal mayor, se han encontrado otras características humanas en el *Homo habilis*, que vivió entre hace unos 2 millones y 1,5 millones de años en África y tenía una capacidad craneal de algo más de 600 cc (o 600 gramos), y en *Homo erectus*, que evolucionó en África hace algo más de 1,8 millones de años y poseía una capacidad craneal de 900 a 1.200 cc (desde casi 900 gramos a casi un kilo doscientos gramos).

El *Homo erectus* es el primer migrante intercontinental que hubo entre nuestros antepasados homínidos. Poco después de su aparición en África, el *Homo erectus* se esparció por Europa y Asia, hasta llegar incluso

al archipiélago indonesio y China septentrional. Se han hallado restos fósiles del *Homo erectus* en África, Indonesia (Java), China, Oriente Medio y Europa. Los fósiles del *Homo erectus* procedentes de Java se han fechado entre 1,81 y 1,66 millones de años de antigüedad, y los de Georgia (en Europa, cerca de la frontera asiática) entre 1,6 y 1,8 millones de años.

Varias especies de homínidos vivieron en África, Europa y Asia hace entre 1,8 millones y 500.000 años, conocidos como *Homo ergaster*, *Homo antecessor*, y *Homo heidelbergensis*, con tamaños cerebrales aproximadamente idénticos a los del *Homo erectus*. Algunas de estas especies fueron en parte contemporáneas, aunque vivieron en diferentes regiones del Viejo Mundo.

La transición de *Homo erectus* a *Homo sapiens* podría haber empezado hace unos 400.000 años. La especie *Homo neanderthalensis* apareció en Europa hace más de 200.000 años y persistió hasta hace 30.000 años. Se ha creído que los neandertales eran antepasados de humanos anatómicamente modernos, pero ahora sabemos que los humanos modernos aparecieron hace más de 100.000 años en África, mucho antes de la desaparición de los fósiles neandertales. Es interesante que, en cuevas de Oriente Próximo, fósiles de humanos anatómicamente modernos sean anteriores y posteriores a los fósiles neandertales. Algunos humanos modernos procedentes de estas cuevas están fechados entre hace 120.000 y 100.000 años, mientras que los neandertales están fechados en 60.000 y 70.000 años, seguidos de los humanos modernos fechados hace 40.000 años. No está claro si los neandertales y los humanos modernos se reemplazaron los unos a los otros repetidamente por migración a otras regiones, o si coexistieron, o de hecho si podían haber ocurrido cruces entre ellos.

### **¿A dónde vamos?**

¿Qué queda por descubrir en la evolución humana?. Mucho y muy interesante. Es una característica necesaria del conocimiento científico que cuanto más avanza, cuantos más descubrimientos se llevan a cabo, el número de cuestiones que se plantean no disminuyen ni

mucho menos, sino que aumentan. La biología humana se enfrenta en el siglo XXI a dos grandes fronteras de investigación: la transformación de simio a humano y el enigma del paso de cerebro a mente. Por transformación de simio a humano me refiero al misterio de cómo un particular linaje de simios se convirtió en un linaje de homínidos, del cual surgieron, al cabo de sólo unos pocos millones de años, seres humanos capaces de pensar y amar, que han desarrollado sociedades complejas y mantienen valores éticos, estéticos y religiosos. El genoma humano difiere poco del genoma del chimpancé, como sabemos.

Por el enigma del paso de cerebro a mente me refiero a las cuestiones interdependientes de:

1.- Cómo las señales fisicoquímicas que llegan a nuestros órganos sensoriales se transforman en percepciones, sentimientos, ideas, argumentos críticos, emociones estéticas y valores éticos; y 2.- Cómo, a partir de esta diversidad de experiencias, surge una realidad unitaria, la mente o el Yo. El libre albedrío y el lenguaje, las instituciones sociales y políticas, la tecnología y el arte son todos epifenómenos de la mente humana. A continuación exploraré estos dos enigmas de forma sucesiva.

La herencia biológica se basa en la transmisión de información genética de los padres a la progenie, en los seres humanos de forma muy similar a otros animales. El ADN de los humanos está envasado en dos series de 23 cromosomas, una serie heredada de cada progenitor. El número total de letras del ADN (los cuatro nucleótidos representados por A, C, G, T) en cada serie de cromosomas es de unos tres mil millones. El Proyecto del Genoma Humano ha descifrado la secuencia de los tres mil millones de letras del genoma humano (esto es, en una serie de cromosomas; la secuencia del genoma humano varía en torno a una letra entre mil de un genoma a otro y de cada uno de los dos genomas de un individuo y los de otro individuo).

Calculo que la Biblia contiene alrededor de tres millones de letras, signos de puntuación, y espacios. Escribir la secuencia del ADN del genoma humano exigiría mil volúmenes del tamaño de la Biblia. Por supuesto, la secuencia del genoma humano no se imprime en libros, sino

que se almacena de forma electrónica, en ordenadores donde la información puede ser recuperada por los investigadores. Pero si se deseara imprimir la información, se necesitarían mil volúmenes sólo para un genoma humano.

Los dos genomas (series de cromosomas) de cada individuo son diferentes entre sí, y respecto de los genomas de cualquier otro ser humano (con la insignificante excepción de los gemelos homólogos, que comparten las mismas dos series de genes, pues los gemelos homólogos se desarrollan a partir de un solo óvulo humano fecundado). Por lo tanto, imprimir toda la información del genoma sólo para un individuo exigiría dos mil volúmenes, mil por cada una de las dos series de cromosomas. Seguramente, de nuevo, hay formas más económicas de presentar la información en la segunda serie que hacer la lista de la secuencia completa de letras; por ejemplo, indicando la posición de cada letra variante en la segunda serie relativa a la primera serie. (El número de letras variantes entre dos series de un individuo es de unos tres millones, alrededor de una entre mil, como se ha dicho anteriormente.)

El Proyecto del Genoma Humano de los Estados Unidos se inició en 1989, con fondos de dos organismos, el National Institutes of Health (NIH) y el Department of Energy (DOE). (Una empresa privada, Celera Genomics, comenzó en Estados Unidos algo después, pero se unió al proyecto patrocinado por el gobierno al lograr, en gran parte de manera independiente, resultados similares). El objetivo propuesto fue obtener la secuencia completa de un genoma humano en quince años a un coste aproximado de tres mil millones de dólares, casualmente alrededor de un dólar por cada letra de ADN. Un esbozo de la secuencia del genoma se completó antes de lo previsto, en 2001. En 2003 el Proyecto del Genoma Humano estaba acabado. La secuencia se había llegado a conocer con la precisión deseada.

Conocer la secuencia del ADN humano es un primer paso, pero nada más que un paso, hacia la comprensión de la constitución genética de un ser humano. Pensemos en los mil volúmenes del tamaño de la Biblia. Ahora conocemos la secuencia ordenada de los tres mil millones

de letras, pero esta secuencia no proporciona una comprensión de los seres humanos mayor de lo que entenderíamos de los contenidos de mil volúmenes del tamaño de la Biblia escritos en un idioma extraterrestre, del cual sólo supiéramos el alfabeto, sólo porque hubiésemos llegado a descifrar su secuencia de letras.

Los seres humanos no son máquinas de genes. La expresión de los genes en los mamíferos tiene lugar en la interacción con el medio ambiente, en pautas que son complejas y casi imposibles de predecir en detalle: y es en los detalles donde reside el Yo. En los humanos, el “medio ambiente” adquiere una nueva dimensión, que se convierte en la dominante. Los humanos manipulan el entorno natural para que se ajuste a las necesidades de su constitución biológica; por ejemplo, utilizando ropa y vivienda para vivir en climas fríos. Por otra parte, los productos de la tecnología humana, el arte, la ciencia, las instituciones políticas, y cosas por el estilo son los rasgos dominantes de los medios ambientes humanos.

Dos características manifiestas de la anatomía humana son la postura erecta y un gran cerebro. En los mamíferos, el tamaño cerebral generalmente es proporcional al tamaño del cuerpo. En relación con la masa corporal, los humanos poseen el mayor (y más complejo) cerebro de todos los mamíferos. El cerebro del chimpancé pesa menos de 450 gramos; el de un gorila ligeramente más. Nuestros antepasados homínidos tenían, desde hace al menos cinco millones de años, un andar bípedo, pero su cerebro era pequeño, de poco más de 450 gramos de peso, hasta hace casi dos millones de años. El tamaño del cerebro comenzó a aumentar de forma notable con nuestros antepasados *Homo habilis*, quienes poseían un cerebro de algo más de seiscientos gramos, quienes se convirtieron en fabricantes de herramientas (de aquí el nombre de *habilis*), y que vivieron durante unos pocos cientos de miles de años, empezando hace unos dos millones y medio de años. Sus descendientes, los *Homo erectus*, tenían cerebros adultos que llegaban a algo más de un kilo de peso. Nuestra especie, el *Homo sapiens*, tiene un cerebro de más de un kilo y trescientos cincuenta gramos de peso, tres veces el tamaño del de los primeros homínidos.

Nuestro cerebro no sólo es mucho más grande que el de los chimpancés o los gorilas, sino también mucho más complejo. El córtex cerebral, donde se procesan las funciones cognitivas, es en los humanos desproporcionadamente mucho mayor que el resto del cerebro cuando se compara con los simios.

El “borrador” de la secuencia del ADN del genoma del chimpancé se publicó el 1 de septiembre de 2005. En las regiones del genoma que comparten los humanos y los chimpancés, las dos especies son un 99 por ciento idénticas. Las diferencias pueden parecer muy pequeñas o bastante grandes, dependiendo del modo en que uno elija mirarlas: un uno por ciento del total parece una fracción pequeña, pero equivale a una diferencia de 30 millones de letras de ADN dados los tres mil millones de cada genoma. El 29 por ciento de las enzimas y otras proteínas codificadas por los genes son idénticas en ambas especies. De los cien a varios cientos de aminoácidos que constituyen cada proteína, el 71 por ciento de las proteínas no idénticas difieren entre los humanos y los chimpancés en sólo dos aminoácidos, por término medio. Si uno tiene en cuenta segmentos de ADN presentes en una especie pero no en la otra, los dos genomas son en torno a un 96 por ciento idénticos, en vez del casi 99 por ciento idéntico como en el caso de las secuencias de ADN que comparten ambas especies. Esto es, una gran cantidad de material genético, en torno a un 3 por ciento o unos 90 millones de letras de ADN, ha sido insertado o eliminado desde que los humanos y los chimpancés iniciaron sus caminos evolutivos separados, hace entre 6 y 7 millones de años. La mayor parte de este ADN no contiene genes que codifiquen proteínas.

La comparación de los dos genomas da idea del ritmo de evolución de los genes particulares en las dos especies. Un hallazgo significativo es que los genes activos en el cerebro han cambiado más en el linaje humano que en el del chimpancé. Asimismo es significativo que los genes humanos que evolucionan más rápidamente sean los que codifican los “factores de transcripción”. Estos son las proteínas “interruptor,” que controlan la expresión de otros genes, es decir, ellas determinan cuándo otros genes se activan o desactivan. En conjunto, se

han identificado 585 genes que evolucionan a más velocidad en los humanos que en los chimpancés, entre ellos genes implicados en la resistencia a la malaria y la tuberculosis. (Podría mencionarse que la malaria es una enfermedad grave para los humanos pero no tanto para los chimpancés.)

Los genes localizados en el cromosoma Y (el cromosoma que determina la masculinidad; las hembras poseen dos cromosomas X, los machos tienen un cromosoma X y uno Y, siendo el Y mucho más pequeño que el X) han sido mucho mejor protegidos por selección natural en el linaje humano que en el del chimpancé, en el cual varios genes han incorporado mutaciones incapacitantes que hacen que algunos genes no sean funcionales. Hay varias regiones del genoma humano que parecen contener genes beneficiosos que han evolucionado rápidamente en los últimos 250.000 años. Una región contiene el gen *FOXP2*, implicado en la evolución del habla. Todo este conocimiento (y mucho más de la misma clase que se obtendrá en el futuro) es de enorme interés, pero lo que hasta ahora sabemos avanza muy poco nuestra comprensión acerca de qué cambios genéticos nos hacen distintivamente humanos.

No cabe duda de que comparaciones entre el genoma humano y el del chimpancé, y una exploración experimental de las funciones asociadas a los genes significativos, harán avanzar de forma considerable nuestro conocimiento, a lo largo de la próxima década o dos, de lo que nos hace distintivamente humanos. Seguramente, sólo llegaremos a tener una completa comprensión biológica si también resolvemos el segundo enigma, la transformación de cerebro a mente, que mencioné antes. Los rasgos diferenciadores que nos hacen humanos comienzan al principio de la gestación, mucho antes del nacimiento, al empezar a expresarse de forma gradual la información lineal codificada en el genoma en un individuo cuatridimensional. En un sentido importante, las características humanas más distintivas son las que se expresan en el cerebro, las que explican la mente y la identidad humanas. A medida que la comprensión biológica avance, sin duda habrá muchos elementos para la reflexión



filosófica, así como un gran número de cuestiones de gran significado religioso.

## **Del cerebro a la mente**

El órgano humano más complejo, más diferenciador y que consume más energía es el cerebro. Se compone de treinta mil millones de células nerviosas, o neuronas, cada una conectada a muchas otras a través de dos clases de extensiones celulares, conocidas como el axón y las dendritas. Desde el punto de vista evolutivo, el cerebro animal es una poderosa adaptación biológica; permite que un organismo obtenga y procese información sobre las condiciones medioambientales y luego se adapte a ellas. Esta capacidad ha sido llevada al límite en los humanos, en los que la extravagante hipertrofia del cerebro hace posible el pensamiento abstracto, el lenguaje, y la tecnología. Por estos medios, la humanidad ha entrado en un nuevo modo de adaptación mucho más potente que el biológico: adaptación por medio de la cultura (véase más adelante).

La capacidad más rudimentaria para reunir y procesar información sobre el medio ambiente se encuentra en ciertos microorganismos unicelulares. El protozoo *Paramecium* nada, aparentemente al azar, ingiriendo las bacterias que halla a su paso, pero cuando se encuentra con una acidez o salinidad inapropiadas, detiene su avance y comienza en una nueva dirección. El alga unicelular *Englena* no sólo evita los ambientes inadecuados sino que busca los adecuados, orientándose según la dirección de la luz, que percibe a través de un punto fotosensible en la célula. Las plantas no han hecho un progreso mucho mayor. Excepto las que tienen zarcillos que se enroscan a cualquier objeto sólido, y las pocas plantas carnívoras que reaccionan al tacto, la mayoría de las plantas sólo reaccionan a gradientes de luz, gravedad y humedad.

En los animales la capacidad de obtener y procesar información medioambiental es transmitida por el sistema nervioso. Los sistemas nerviosos más sencillos se encuentran en los corales y las medusas;

carecen de coordinación entre las diferentes partes de sus cuerpos, de modo que cualquier parte sólo es capaz de reaccionar cuando es estimulada de forma directa. Los erizos y las estrellas de mar poseen un anillo nervioso y cordones nerviosos radiales que coordinan los estímulos procedentes de diversas partes; por lo tanto, responden con acciones directas y unificadas de todo el cuerpo. Sin embargo, no tienen cerebro, y parecen incapaces de aprender de la experiencia. Los platelmintos planarios poseen el cerebro más rudimentario que se conoce; su cerebro central y su sistema nervioso procesan y coordinan la información que recogen las células sensoriales. Estos animales son capaces de un aprendizaje sencillo y por tanto de respuestas variables a estímulos encontrados de forma repetida. Los insectos y sus parientes tienen cerebros aún más avanzados; obtienen precisas señales químicas, acústicas, visuales y táctiles del entorno y las procesan, haciendo posible comportamientos complejos, particularmente en busca de alimento, selección de pareja y organización social.

Los vertebrados -animales con columna vertebral- son capaces de obtener y procesar señales mucho más complicadas y responder al entorno de forma más variable que los insectos o cualquier otro invertebrado. El cerebro de los vertebrados contiene un enorme número de neuronas asociativas dispuestas en diseños complejos. En los vertebrados la capacidad de reaccionar a la información medioambiental está relacionada con un aumento en el tamaño relativo de los hemisferios cerebrales y del neopallio, un órgano que se ocupa de asociar y coordinar las señales procedentes de todos los receptores y centros del cerebro. En los mamíferos, el neopallio se ha expandido y se ha convertido en el córtex cerebral. Los humanos tienen un cerebro muy grande en relación con el tamaño de su cuerpo, y un córtex cerebral que es desproporcionadamente grande y complejo incluso para el tamaño de su cerebro. El pensamiento abstracto, el lenguaje simbólico, la compleja organización social, los valores, la ética y la religión son manifestaciones de la maravillosa capacidad del cerebro humano para reunir información sobre el mundo externo e integrar dicha información y reaccionar de manera flexible a lo que percibe.

## **De la biología a la cultura**

Con el avanzado desarrollo del cerebro humano, la evolución biológica se ha superado a sí misma, inaugurando un nuevo modo de evolución: la adaptación a través de la manipulación tecnológica del medio ambiente. Los organismos se adaptan al entorno por medio de la selección natural, cambiando su constitución genética a lo largo de generaciones para ajustarse a las exigencias del entorno. Los humanos (y sólo los humanos al menos en un grado importante), han desarrollado la capacidad de adaptarse a entornos hostiles modificando dichos entornos de acuerdo a las necesidades de sus genes. El descubrimiento del fuego y la fabricación de ropa y refugio permitieron a los humanos esparcirse desde las cálidas zonas tropicales y subtropicales del Mundo Antiguo, a las cuales estamos biológicamente adaptados, a casi toda la Tierra; no fue necesario que los humanos migrantes esperasen hasta que los genes evolucionasen para proporcionarles protección anatómica frente a las bajas temperaturas por medio de pelaje o de adaptaciones fisiológicas. Tampoco los humanos están aguardando un momento futuro en espera de alas o branquias; hemos conquistado el aire y los mares con aparatos diseñados para volar y navegar, aviones y barcos. Es el cerebro humano (la mente humana) lo que ha hecho que la humanidad sea la más exitosa, según los parámetros más significativos, de las especies vivas. Los humanos hemos superado la adaptación biológica y nos adaptamos principalmente manipulando el ambiente de acuerdo a las necesidades de nuestros genes. Los humanos hemos introducido un nuevo modo de adaptación, la cultura, entendida en sentido amplio, que incluye también la tecnología.

No hay suficientes bits de información en la secuencia completa del ADN de un genoma humano para especificar los billones de conexiones existentes entre los treinta mil millones de neuronas del cerebro humano. En consecuencia, las instrucciones genéticas deben organizarse en circuitos de control que operan a distintos niveles jerárquicos, de modo que una instrucción a un nivel es transportada a través de muchos canales a niveles inferiores en la jerarquía de los circuitos de control.

En las últimas dos décadas, la neurobiología se ha convertido en una de las disciplinas que han avanzado más rápidamente. Una inversión mayor de recursos económicos y humanos ha estimulado un índice de descubrimientos sin precedentes. Se ha aprendido mucho sobre cómo la luz, el sonido, la temperatura, la resistencia y las impresiones químicas que reciben nuestros órganos sensitivos ponen en funcionamiento la emisión de transmisores químicos y las diferencias de potencial eléctrico que transmiten las señales a través de los nervios al cerebro y a otras partes del cuerpo. Asimismo se ha aprendido mucho sobre cómo los canales neuronales encargados de la transmisión de información se refuerzan por el uso o pueden ser sustituidos tras sufrir algún daño; sobre qué neuronas o grupos de neuronas se encargan de procesar la información procedente de un órgano particular o de un lugar medioambiental; y sobre otros muchos asuntos. Pero, a pesar de todo este progreso, la neurobiología sigue siendo una disciplina naciente, en una etapa de desarrollo teórico tal vez comparable a la de la genética a comienzos del siglo XX. Las cosas que más cuentan siguen envueltas en el misterio: de qué modo los fenómenos físicos se convierten en experiencias mentales (los sentimientos y las sensaciones, llamadas “qualia” por los filósofos, que aportan los elementos de la conciencia), y cómo a partir de la diversidad de estas experiencias aparece la mente, una realidad con propiedades unitarias, como el libre albedrío y la conciencia del Yo que persisten a lo largo de la vida de un individuo.

No creo que estos misterios sean insondables; más bien, son enigmas que la mente humana puede resolver con los métodos de la ciencia e iluminar con análisis filosófico y reflexión. Y apuesto a que, a lo largo del próximo medio siglo más o menos, muchos de estos enigmas serán resueltos. Estaremos entonces bien encaminados para responder al imperativo bíblico: “Conócete a ti mismo.”

### **Más allá de la ciencia**

La ciencia es una forma de conocimiento que avanza maravillosamente, pero no es la única. El ámbito de la ciencia es el

mundo de la naturaleza, la realidad que es observada, directa o indirectamente, por nuestros sentidos. La ciencia propone explicaciones relacionadas con el mundo natural, explicaciones que están sujetas a la posibilidad de corroboración o rechazo por medio de la observación y el experimento. Fuera de ese mundo, la ciencia no tiene autoridad, ninguna afirmación que hacer, ningún asunto que le sea propio ya sea tomando una posición u otra. La ciencia no tiene nada decisivo que decir sobre los valores, ya sean económicos, estéticos o morales; nada que decir sobre el sentido de la vida o su propósito; nada que decir sobre las creencias religiosas (excepto en el caso de las creencias que trascienden el propio ámbito de la religión y hacen afirmaciones sobre el mundo natural que contradicen el conocimiento científico; dichas afirmaciones no pueden ser ciertas).

El conocimiento procede de muchas fuentes, tales como la experiencia del sentido común, la expresión artística, y la reflexión filosófica. No obstante, el conocimiento científico se mantiene aparte por su carácter especial. El extraordinario éxito de la ciencia como forma de investigar en la naturaleza del universo es un motivo de asombro. La tecnología derivada del conocimiento científico es igualmente maravillosa: los rascacielos de nuestras ciudades, las autopistas y los largos puentes, los cohetes que llevan a los hombres a la luna, los teléfonos que proporcionan una comunicación instantánea entre continentes, los ordenadores que realizan complejos cálculos en millonésimas de segundo, las vacunas y los fármacos que mantienen a raya a los parásitos bacterianos, las terapias genéticas que reemplazan el ADN de células defectuosas. Todos estos notables logros dan testimonio de la validez del conocimiento científico a partir del cual se originaron.

Pero merece la pena repetirlo: la ciencia no es la única forma de conocimiento. El conocimiento también se deriva de otras fuentes, como el sentido común, la experiencia artística y religiosa, y la reflexión filosófica. En *El mito de Sísifo*, el gran escritor francés Albert Camus afirmaba que aprendemos más sobre nosotros mismos y el mundo a partir de la percepción del cielo estrellado y el aroma de la hierba en una tarde tranquila que de las formas reductoras de la ciencia. El antropólogo

Loren Eiseley escribió: “El mundo sin las percepciones de Shakespeare es un mundo menor, nuestras penas se abaten sobre nosotros de forma menos expresiva”. Los poemas y escritos de Rosalía de Castro, nacida en esta hermosa ciudad de Santiago de Compostela, no solo nos elevan espiritualmente con su lirismo, sino también con sus denuncias de la injusticia social.

La validez del conocimiento adquirido a través de medios de investigación no científicos se puede establecer simplemente señalando que la ciencia (en el sentido moderno de leyes y teorías empíricamente probadas) amaneció en el siglo XVI, pero durante siglos la humanidad había construido ciudades y carreteras, había alumbrado instituciones políticas y sofisticados códigos de derecho, había elaborado profundas filosofías y sistemas de valores, y había creado un magnífico arte plástico, además de la música y la literatura. Las cosechas que recolectamos y los animales que criamos aparecieron milenios antes de la aurora de la ciencia, a partir de prácticas establecidas por campesinos de Oriente Medio, China, las sierras andinas, y las mesetas mayas. Aprendemos sobre el predicamento humano cuando leemos el *Quijote* de Cervantes, contemplamos el *Guernica* de Picasso, o escuchamos *La vida breve* de Manuel de Falla. Aprendemos así sobre nosotros mismos y sobre el mundo en que vivimos y también nos beneficiamos de los conocimientos no científicos. Los seres humanos aceptamos sistemas de moralidad que rigen nuestras acciones en función de sus consecuencias con respecto a otros, y derivamos de las creencias religiosas el sentido de la vida y su propósito.

No es mi intención extenderme aquí sobre los extraordinarios frutos de los modos no científicos de conocimiento. Deseo simplemente decir algo que es obvio, pero a veces queda oscurecido por la arrogancia de algunos científicos. Por exitosa que sea, y por universalmente abarcador que sea su tema, una visión científica del mundo es desesperadamente incompleta. Las cuestiones de valor y sentido están fuera del ámbito científico. Incluso cuando tenemos una satisfactoria comprensión científica de un objeto o proceso naturales, aún se nos escapan cuestiones que muchos bien podrían pensar que son de igual o

mayor importancia. El conocimiento científico puede, a veces, enriquecer las percepciones estéticas y morales, e iluminar el significado de la vida y del mundo, pero estos asuntos están fuera del dominio de la ciencia. De hecho, con respecto a cuestiones como el significado y valor de la vida y las cosas, la ciencia tiene poco que decir que sea útil o aumente la comprensión.