

Innovación y Ciencia

Volumen xvi • Nº 4 • Tarifa postal reducida 2010-194 • Colombia \$ 12.000

**LA INTERFASE
HOMBRE-MÁQUINA
EN LA INTELIGENCIA
ARTIFICIAL
Y LA ROBÓTICA
EVOLUTIVA**



ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA



[*áce-áce*]

Es una entidad sin ánimo de lucro,
fundada el 9 de octubre de 1970,
que trabaja por el fomento de la
Ciencia y la Tecnología como base
del desarrollo social.

ACAC desarrolla diversos programas
cuyos fines son

integrar a la comunidad científica

y reforzar su compromiso con el
estudio de los problemas del país,

difundir el conocimiento científico,

promover y apoyar la

investigación Científica y Tecnológica

e impulsar programas de apropiación social
de Ciencia y Tecnología.

Correo electrónico acac@acac.org.co

www.acac.org.co

REVISTA INNOVACIÓN Y CIENCIA
VOLUMEN XVI N° 4

PUBLICACIÓN DE:

Asociación Colombiana para el Avance
de la Ciencia ACAC

JUNTA DIRECTIVA -ACAC-

Eduardo Posada Flórez

Raúl Joya O.

Rubén Ardila A.

Guillermo Hoyos V.

Carlos Corredor P.

Marcelo Riveros R.

Elena Stanshenko

Horacio Torres S.

Helena Groot

Centro Internacional de Entrenamiento e

Investigaciones Médicas - CIDEIM

Academia Colombiana de Ciencias Exactas,

Físicas y Naturales - Accefyn

Centro Interactivo Maloka

PRESIDENTE

Eduardo Posada Flórez

DIRECTORA EJECUTIVA

Carmen Helena Carvajal López

EDITOR

Germán Cubillos Alonso

COORDINACIÓN EDITORIAL

María Carolina Suárez S.

COMITÉ EDITORIAL

Eduardo Posada Flórez

Carmen Helena Carvajal

Jordi Carreras

Horacio Torres S.

Elizabeth Castañeda

Marcelo Riveros

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

León Lederman

Isabel Llano

Rodolfo Llinás

PRODUCCIÓN, DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Susana Carrié M.

CORRECCIÓN DE ESTILO

Eltipomóvil

FOTOGRAFÍA

Autores y Banco de imágenes

IMPRESIÓN

Nomos Impresores

COMERCIALIZACIÓN

Departamento de Mercadeo de ACAC

DISTRIBUCIÓN

Distribuidoras Unidas



CARÁTULA

Sin título • Susana Carrié

Innovación y Ciencia es la revista de divulgación científica y tecnológica de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, ACAC.

DERECHOS RESERVADOS

Prohibida su reproducción parcial o total sin autorización expresa del Comité Editorial. La publicación no es responsable legal del contenido de la publicidad de cada edición.

Los conceptos expresados en los artículos no reflejan necesariamente la opinión de los editores.

Resolución Ministerio de Gobierno No. 5447 del 9 de octubre de 1992

ISSN 0121-5140

Tarifa postal reducida No. N° 2009-194 4 -72 La Red Postal de Colombia, vence 31 de diciembre de 2009

ACAC Calle 44 N° 45-67, Unidad Camilo Torres Bloque C, Módulo 3

Teléfonos: 3150734 – 3155900

Fax: 2216950

Email: innovacionyciencia@acac.org.co

Bogotá, D.C. – Colombia

Precio de venta al público: \$12.000

Suscripción (4 números al año): \$50.000 para Bogotá,

\$55.000 fuera de Bogotá.

Correo

8



Vistazos

9



Premio Nacional al Mérito Científico

Notas cortas

12



A propósito de los premios Nobel

GERMÁN CUBILLOS ALONSO

Ver par a conocer, conocer para preservar

18



Inauguración de la XI Expociencia Expotecnología 2009

EDUARDO CARVAJAL

Biomedicina

19



Apoptosis: una cuestión de *Vida o Muerte*

MAURICIO MARTÍNEZ SALAZAR

Sumario

Innovación y Ciencia • Volumen XVI • Nº 4 • 2010

Evolución ◀ ▶ 26

Dinosaurios en nuestros días: el vuelo y la pluma
en la evolución de las aves

JONATHAN S. PELEGRIN-RAMÍREZ



Física ◀ ▶ 37

Los túneles del mundo cuántico

LUCERO ÁLVAREZ MINO



Inteligencia Artificial ◀ ▶ 44

La interfase hombre-máquina en la inteligencia
artificial y la robótica evolutiva

HERNANDO RAMÍREZ LLINÁS



Historia de la ciencia ◀ ▶ 56

Galileo Galilei: El primer hombre moderno

GERMÁN PUERTA RESTREPO



Sitios web ◀ ▶ 66

Logros del año 2009

En días pasados, Colciencias hizo entrega de las becas para doctorados en el país y en el exterior a más de trescientos cincuenta jóvenes colombianos, y cerca de ochocientos apoyos a igual número de jóvenes investigadores. Es altamente satisfactorio que, por primera vez, se haya logrado en la historia un paquete tan significativo de estímulos, los cuales se traducirán, a mediano plazo, en un sensible fortalecimiento de la comunidad científica nacional.

No cabe la menor duda de que el país tiene que hacer un gran esfuerzo para formar investigadores con el más alto nivel, puesto que el déficit que tenemos, aun comparándonos con otros países latinoamericanos, es enorme. Mientras que Brasil forma 50 doctores por cada millón de habitantes al año, México 18 y Chile 15, nuestro país no pasa de 2,3 en el mismo periodo. Hace 15 años, en la Misión de Ciencia, Educación y Desarrollo proponíamos llegar a un porcentaje mínimo de investigadores: al uno por mil de la población, es decir, al menos 45.000 en cifras actualizadas, de los cuales 8.000 obtuvieran título de doctor. Es evidente a todas luces que con el ritmo de formación hoy en día, esa meta resulta imposible de alcanzar; para lograrla en un plazo razonable, se requiere un número mínimo de 500 becas anuales, cifra que, precisamente, Colciencias propuso para su programa Francisco José de Caldas.

Sobra decir que con el fin de fortalecer la capacidad científica nacional, se deben favorecer principalmente los doctorados nacionales en las áreas en las que se pueda ofrecer una calidad adecuada. Para ser exitosos, aquellos deben culminar en pasantías y programas de postdoctorado en el extranjero, cuyo fin sea garantizar un contacto adecuado con la comunidad científica internacional.

Felicitemos a Colciencias por esta excelente iniciativa y deseamos el éxito del programa.

De otra parte, el pasado 23 de noviembre, la ACAC hizo entrega del premio al Mérito Científico 2009, en las categorías Vida y Obra, Investigador de Excelencia, Divulgación de la Ciencia, Grupos de Investigación de Excelencia e Innovación Tecnológica. Al igual que en las ediciones anteriores, los ganadores fueron personas y entidades de las más altas cualidades, cuya participación muestra el vigor de la comunidad científica colombiana y la importancia de su trabajo. Cabe destacar el número creciente de candidaturas presentadas y la calidad de las mismas. En esta oportunidad se recibieron más de sesenta postulaciones en las diferentes categorías, lo cual muestra con claridad el significado que este galardón ha adquirido para la comunidad científica nacional.

Queremos expresar nuestras sinceras felicitaciones a todos los ganadores, y reiterar el compromiso de la ACAC para seguir apoyando sus actividades.

EDUARDO POSADA FLÓREZ
 Presidente
CARMEN HELENA CARVAJAL LÓPEZ
 Directora Ejecutiva



Especificaciones para la presentación de artículos a la revista

Innovación y Ciencia

TEMAS

Ciencias naturales, físicas y sociales, tecnología, política científica y tecnológica, historia de la ciencia.

LENGUAJE

- Claro, ágil y de fácil comprensión para el lector no especializado. Es importante que el título sea atractivo además de significativo.
- Los términos técnicos deben ir seguidos de una definición sencilla entre paréntesis o entre comas; ejemplo: "... en general se registra taquipnea (respiración rápida), cianosis (coloración azulosa de mucosas y partes más claras de piel)...".
- Cuando se incluyan siglas o símbolos, la primera mención debe decodificarse; ejemplo: "En medicina humana se ha acuñado la expresión síndrome de dificultad respiratoria del adulto (SDRA)".
- Sólo deben usarse abreviaturas y expresiones matemáticas en casos estrictamente necesarios.

EXTENSIÓN

Máximo 10 páginas tamaño carta en letra Arial 12, a doble espacio (excluyendo ilustraciones y cuadros).

FORMATO

Texto impreso y copia en CD o disquete, preferiblemente en formato Word.

MATERIAL GRÁFICO

Es importante anexar el mayor número posible de ilustraciones, fotografías y diapositivas, acompañadas de notas explicativas (pie de fotos) y sugerencias de ubicación dentro del texto. Este material puede incluir:

- Fotografías originales en papel fotográfico o diapositiva.
- Fotografías en versión digital de alta resolución (300 DPI) en formato .tif, .jpg o .eps.
- Esquemas gráficos explicativos (versión impresa o digital).
- Tablas o recuadros sin demasiadas columnas.
- El material fotográfico no debe ser tomado de libros, revistas o internet y debe indicarse su autoría o fuente, si es necesario.
- Del material recibido se seleccionará el de mayor calidad para su publicación y una vez editada la revista, el material será devuelto al autor.

REFERENCIAS

En el texto, las referencias se deben citar con el apellido del primer autor y la fecha de publicación. El listado de referencias se debe organizar en orden alfabético, con el siguiente formato:

1. Artículo de revista científica:

Lee, M. R.; Ho, D. D.; Gurney, M. E. (1987), Functional Interaction and Partial Homology Between Human Immunodeficiency Virus and Neuroleukin, en *Science* 237, 1987, pp.1047-1051.

2. Artículo de libro:

Day, R. A. (1990), *Cómo escribir y publicar trabajos científicos*, Washington, Organización Panamericana de la Salud.

RESUMEN

Descripción breve (5 oraciones cortas) del tópico central del artículo, para su inclusión en el índice de la revista.

IDENTIFICACIÓN DEL AUTOR

- Nombre
- Títulos
- Cargo actual
- Correo electrónico
- Dirección postal

RECOMENDACIONES

Los artículos que hayan aparecido en otras publicaciones, los informes de investigación en curso y aquellos textos cuyos temas sean muy especializados y de interés exclusivamente local no serán considerados para publicación.

Asociación Colombiana
para el Avance de la Ciencia -ACAC-
Calle 44 N° 45 - 67 Unidad Camilo Torres
Bloque C • Módulo 3

Fax: 2216950 • 2219953 • Tels: 3155898 • 3150734
innovacionciencia@acac.org.co
Bogotá, DC, Colombia



Correo

Señores:

Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, ACAC

Mil agradecimientos por la oportunidad que nos dieron por participar en el Museion.

En nombre de la Asociación Río Cali, mil y mil gracias.

Con aprecio,

Carlos Mario Wagner Wagner

Investigador Asociado

Programa Jaguar Norte de Sur América

Fundación Panthera

www.panthera.org

*Todo era vuelo en nuestra tierra
como gotas de sangre y plumas
los cardenales desangraban el amanecer de Anahuac.
El tucán era una adorable
caja de frutas barnizadas,
el colibrí guardó las chispas
originales del relámpago
y sus minúsculas hogueras
ardían el aire inmóvil.*

Pablo Neruda

Estimada Carmen Helena,

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en nombre propio y de la Academia Colombiana de Historia, de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y del Instituto Caro y Cuervo, agradece sinceramente la oportunidad que la ACAC nos brindó para poder participar activamente en la reciente Expotecnología.

Reciba nuestro cordial saludo y sincero agradecimiento,

Inés Bernal de Ramírez

Tesorera

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Señores:

Revista *Innovación y Ciencia*

He venido disfrutando de manera muy grata de cada ejemplar de *Innovación y Ciencia* desde que renové mi vinculación con la ACAC. Pero quiero darles mis sinceras y efusivas felicitaciones por el extraordinario número especial dedicado al Año Internacional de la Astronomía; su profundidad científica, el tratamiento profesional y ameno de los temas y la estimulante prospección y presentación didáctica de los mismos, lo pone en sitio de honor entre las publicaciones similares. Mil gracias,

Jaime J. Ahumada, MD.



Vistazos

Premio Nacional al Mérito Científico

La Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, ACAC, entrega desde 1990 el Premio Nacional al Mérito Científico, con el objeto de exaltar a individuos y entidades que hayan contribuido de manera significativa al avance de la ciencia en Colombia, en las categorías: Vida y Obra, Investigador de Excelencia, Grupos de Investigación de Excelencia, Divulgación de la Ciencia e Innovación Tecnológica.

El lunes 23 de noviembre del año pasado, en las instalaciones de la Cámara de Comercio de Bogotá, se celebró la entrega de la decimonovena versión del Premio Nacional al Mérito Científico 2009.

Los ganadores de esta versión en las diferentes categorías fueron:

Vida y Obra:

doctor **Carlos Patiño Rosselli**

Filósofo de la Universidad de París, candidato a doctorado en Filología Románica, lector de español de la Universidad de Munich y doctor en Lenguas y de Literaturas Románicas de la Universidad de Michigan. Postulado por el Instituto Caro y Cuervo, Bogotá. El doctor Patiño Roselli ocupa un lugar destacado en el campo de la Filología Románica en Colombia y tiene una importante trayectoria como lingüista, es precursor de los estudios de la lingüística indígena y la criollística en el país.

Investigador de Excelencia:

doctor **Carlos Vélez Pardo**

Microbiólogo de la Universidad de los Andes, magíster en Biología Molecu-

lar y doctor en Ciencias de la Universidad Libre de Bruselas. Postulado por la Universidad de Antioquia, Medellín. El doctor Vélez Pardo se ha destacado durante los últimos años en investigaciones que han dado respuesta a un problema básico: resolver las causas genéticas y ambientales que inducen el deterioro neuronal de las enfermedades de Alzheimer y Parkinson.

Grupos de Investigación de Excelencia:

Grupo de Enfermedades Infecciosas (postulado por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá) y **Grupo de Física Atómica y Molecular** (postulado por la Universidad de Antioquia, Medellín).

El Grupo de Enfermedades Infecciosas viene trabajando en investigación básica y aplicada en los cuatro tipos de patógenos causantes de infecciones: bacterias, virus, parásitos y, más recientemente, hongos. Su labor está soportada teniendo en cuenta que las enfermedades infecciosas ocupan un renglón preponderante en el ámbito mundial, en salud pública humana y animal.

El Grupo de Física Atómica y Molecular realiza investigaciones significativas en las líneas de sistemas finitos mesoscópicos, procesos de interacción de átomos y moléculas en campos externos, y procesos de asociación de átomos alcalinos en presencia de pulsos láseres de campos magnéticos.

Divulgación de la Ciencia:

doctor **Óscar Amaya Montoya** (postulado por la Casa de la Ciencia, Buga) y el programa Imagen del Conocimiento (postulado por la Universidad de Caldas, Manizales).



El doctor Amaya es el creador y promotor en Colombia de la única casa de la ciencia registrada hasta el momento en el país, concebida como un ambiente físico de aprendizaje donde niños, niñas, jóvenes y maestros se acercan al conocimiento científico de una manera sencilla.

El colectivo de producción de televisión científica, Imagen del Conocimiento, tiene como propósito realizar televisión universitaria de calidad profesional, para divulgar resultados de investigación mediante el lenguaje audiovisual, enfocado en públicos no especializados.

Innovación Tecnológica:

Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial, Cotecmar.

La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial nace como una estrategia para el fortalecimiento de la industria naval en Colombia.

Cotecmar ha desarrollado cultura y fortalecido su gestión de I+D+I. Su planeación estratégica e infraestructura están encaminadas hacia el avance de la ciencia y la innovación permanente de sus procesos y productos.

* * *

Es un orgullo para la ACAC presentar en esta edición las palabras de agradecimiento del doctor Carlos Patiño Rosselli, ganador en la categoría Vida y Obra:

Palabras de agradecimiento

Sea lo primero expresar mi sincero agradecimiento a todos los participantes en este complot: la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, el Instituto Caro y Cuervo que me postuló, y un cierto amigo que creyó que no era un despropósito promover mi candidatura para este importante premio. Recibir el Premio Nacional al Mérito Científico 2009 (categoría Vida y Obra) es para mí no solo motivo de profunda y emocionada satisfacción, sino un inesperado reconocimiento a mi carrera académica, así no logre yo despejar dudas acerca de si realmente lo merezco.

Disculpen ustedes si a la manera de palabras de agradecimiento solo les voy a ofrecer unos cuantos recuerdos de mi trayectoria personal. Situémonos en la segunda mitad de los años cuarenta, época en la cual cursé estudios en el Instituto de Filosofía que acababa de crear la rectoría de Gerardo Molina en la Universidad Nacional. La creación de este instituto (en 1946, creo) fue un hecho de la mayor importancia para la ciencia colombiana, significó darle entrada al pensamiento contemporáneo en nuestra universidad mayor.

Lo anterior vale especialmente para el campo filosófico en donde las ideas de un Husserl o un Heidegger remplazaron en las aulas las concepciones tradicionalistas que habían imperado en el país. Este viaje fundamental estuvo a cargo de profesionales eminentes como Rafael Carrillo, Danilo Cruz Vélez, Caye-

tano Betancourt y Jaime Motta Salas hacia las lenguas clásicas.

Por los mismos tiempos se decía que éramos un “país de poetas” y creo que estos tenían una mayor figuración y peso en la vida nacional de lo que ocurre en la actualidad. Estaban vivas las voces de nuestros vates máximos: Rafael Maya, Jorge Zalamea y León de Greiff.

El de Piedra y Cielo inundaba el país de poesía con las producciones de Eduardo Carranza (“Ven, siéntate a mi lado, señorita vestida de cocuyos”), Jorge Rojas o Arturo Camacho Ramírez. En el Café Asturias (y posteriormente en el Automático) se reunía diariamente un grupo de poetas a arreglar el mundo entre sorbo y sorbo de tinto. Allí estaban Aurelio Arturo (“En las noches profundas subían de la hierba”); Fernando Charry Lara, quien preveía siempre el apunte o comentario agudo e inclusive algo mordaz; Fernando Arbeláez, quien por un poema suyo se había ganado el epíteto de “El caballero gótico”; y Guillermo Payán Archer, que se sentaba y lanzaba: “¿Qué dice hoy la prensa de nosotros?”. En este círculo nos colábamos algunos versificadores más jóvenes como Rogelio Echeverría, Eduardo Cote Lamus y el suscrito.

Teniendo en cuenta la extensión de nuestras publicaciones, se nos bautizó con el apropiado remoquete de “cuadernícolas”. Uno de estos cuadernos fue el que, bajo el nombre de *La balanza*, produjimos en 1948 Álvaro Mutis y este servidor. Mutis ha sostenido siempre que la publicación de este opúsculo fue lo que en realidad desencadenó el 9 de abril.

La obtención por mi parte de una beca para estudiar filosofía en París, a comienzos de los años cincuenta, fue un acontecimiento decisivo en mi vida. Por una parte, me posibilitó conocer directamente esa cultura con que muchos jóvenes colombianos soñábamos; por otra, fue el factor que me llevó a sustituir la literatura y la filosofía por el estudio del lenguaje como eje definitivo de mi actividad intelectual y académica.

En la Sorbona, pues, tomé cursos de Filosofía Romántica, especialmente francesa, que condujeron en 1952 a la obtención del diploma de *Licencié ès Lettres* (versión libre). En esa universidad me impresionó el sistema pedagógico tan libre y distinto del que había experimentado en la Universidad Nacional: nada de llamar a lista, ni de llevar notas previas, ni de formularle preguntas al profesor. En auditorios colmados de estudiantes, el docente, que obligatoriamente tenía tras de sí una notable trayectoria investigativa, disertaba sobre el tema pertinente (o sea, la hoy poco prestigiosa cátedra magistral en su mejor manifestación).

En Francia, en esa época, el panorama del lenguaje estaba dominado por dos grandes personalidades: Emile Benveniste y Gustavo Guillaume. En nuestro medio, el primero conocido especialmente por ser el autor de la célebre teoría de la enunciación. El segundo era el creador de una ambiciosa doctrina llamada *Psychosystématique du langage*, fenómeno algo extraño en la historia de la lingüística, puesto que se basaba en orientaciones que en esos tiempos eran antagónicas: la estructuralista y la psicológica.

Para continuar mis estudios filológicos pasé en 1952 a la Universidad de Munich. Alemania era por entonces la meca de la filología, puesto que esta había nacido allí a comienzos del siglo XIX, y había logrado un notable desarrollo. Por cierto que el estudio filológico se entendía a un nivel muy alto: como el examen crítico de textos, en especial del pasado, no por el valor que esta actividad tenga en sí misma, sino porque es el camino que conduce al conocimiento de la cultura de la respectiva nación. Definida aquella por algunos como “identidad concreta”, fórmula de evidentes connotaciones hegelianas.

En la Universidad de Munich mi profesor más cercano fue Gerhard Rohlfs, uno de los romanistas más destacados de la época, y de quien traduje el *Manual*



■ Ganadores del Premio Nacional al Mérito Científico 2009

de filología hispánica, publicado en Colombia por el Instituto Caro y Cuervo. Bajo su dirección comencé a elaborar un trabajo de doctorado que por diversas circunstancias no tuvo culminación.

De regreso a Colombia, en 1957, Ramón de Zubiría me llamó a la Universidad de los Andes a dirigir el Departamento de Castellano. Los Andes era todavía una institución en estado virginal y en ella actuaban, además de don Ramón, intelectuales de la talla de Andrés Holguín, Daniel y Jesús Arango, Abelardo Forero Benavides y Danilo Cruz Vélez.

Si en Europa adquirí una formación histórica por medio de la filología, esto lo complementé con los años de estudio en la Universidad de Michigan, en donde recibí el doctorado en 1965, con un trabajo titulado *The Development of Studies in Romance Syntax*. Dicha universidad era entonces uno de los centros importantes de la lingüística descriptiva estadounidense. Como se sabe, esta disciplina se propone desarrollar pro-

cedimientos de análisis de las lenguas, haciendo abstracción de los aspectos históricos.

En Michigan había actuado Robert Lado, famoso por su modelo de análisis contrastivo de los idiomas, y en mi época la luminaria era Kenneth Pike, creador de la teoría analítica llamada “tagmémica”, aplicada aquí en Colombia en la mayoría de los trabajos etnolingüísticos de los miembros del Instituto Lingüístico de Verano.

En 1966 fui llamado por el rector José Félix Patiño a la Universidad Nacional, para dirigir el Departamento de Filología e Idiomas, que formaba parte de la nueva organización general de dicho claustro. Desde entonces, en la Nacional mi interés personal y mi actividad intelectual y académica se han dirigido al estudio de los idiomas étnicos del país, o sea de los vernáculos indígenas y afrocolombianos. Por lo que toca a los primeros, me complace haber participado en las tareas que condujeron a la publicación, por parte del Instituto Caro y Cuervo, de la magna

obra *Las lenguas indígenas de Colombia: una versión sin descriptiva*. En cuanto a los idiomas afrocolombianos —el isleño del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina y el palenquero— significaron para mí la publicación conjunta, con la inolvidable Nina de Friedemann, de la obra *Lengua y sociedad en el Palenque de San Basilio* (1983).

En la actualidad, dentro de la misma actitud de atención al patrimonio lingüístico del país, en la Academia Colombiana de la Lengua, estamos impulsando, con los colegas de la Comisión de Lingüística y el apoyo de las directivas, un amplio proyecto que cuenta con la colaboración de muchas personas e instituciones y que quiere captar tanto la realidad lingüística del país con todos sus componentes y facetas, como la trayectoria de los estudios pertinentes.

Muchas gracias a todos por su compañía en esta tarde, para mí, memorable.

Carlos Patiño Rosselli

A propósito de los premios Nobel



GERMÁN CUBILLOS ALONSO

QUÍMICO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
EDITOR, *INNOVACIÓN Y CIENCIA*

gercubillos@hotmail.com


Un buen científico es aquel que hace coincidir su imaginación con la realidad, por lo menos en una ocasión en su vida; un científico excelente sería el que logra ese milagro no una, sino varias veces; un científico genial es el que no solo le atina con frecuencia a la realidad en sus sueños, sino que además lo hace en áreas de gran generalidad (Tamayo, 1986).

La ciencia como una empresa cultural y económica de la sociedad moderna y contemporánea, ha desarrollado una serie de reconocimientos honoríficos y recompensas materiales por realizaciones de excelencia. Dentro de ellos están, por una parte, el nombramiento de los investigadores para ocupar un lugar en las sociedades científicas y, por otro, el otorgamiento de los premios de la ciencia. En el primer tipo está, por ejemplo, el honor de pertenecer a la Sociedad Real para el Avance de la Ciencia Natural (Royal Society), fundada en 1660, a la Academia de las Ciencias de Francia (Académie des Sciences), fundada en 1666, o, en nuestro país, a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, fundada en 1933. En el segundo tipo, el honor de ser el ganador de un premio nacional o internacional de ciencias como el Premio Crafoord (Real Academia Sueca de Ciencias), el premio Kioto (Fundación Inamori de Japón), el Premio de Ciencias de la Unesco o, en Colombia, los premios de ciencia de la Fundación Alejandro Ángel Escobar.

Probablemente los premios Nobel son uno de los eventos más trascendentales en la vida de las comunidades académicas en el ámbito internacional. No hay duda de su prestigio mundial y del renombre intelectual que adquieren los favorecidos. Cada mes de octubre, en todo el mundo, se espera la noticia sobre los ganadores en Física, Química, Fisiología o Medicina, Literatura y Economía como reconocimiento honorífico por una obra de excelencia. El Premio Nobel de Paz, correspondiente a un campo fuera de las comunidades académicas, tiene un carácter distinto pues está dedicado a las personas o instituciones que hayan sobresalido en solidaridad, fraternidad y en la búsqueda de la paz entre los pueblos. El Premio de Economía, por su parte, fue creado en 1968 por el Banco Central de Suecia, y se conoce como Premio Banco de Suecia en Ciencias Económicas en Memoria de Alfred Nobel.

Exceptuando el de la Paz, los otros premios destacan la excelencia en el ejercicio de una actividad científica o intelectual que haya dado como resultado un descubrimiento o un avance significativo en la disciplina, y en el caso de la Literatura el reconocimiento es a toda una obra excepcional. Estos premios que tienen un origen filantrópico individual, fueron creados por el químico sueco Alfred Bernhard Nobel (1833-1896) quien, con solamente veintinueve años, montó su primera fábrica de nitroglicerina en 1862, y pronto se transformó en un industrial exitoso no solo por sus fábricas de nitroglicerina, sino por los aportes importantes a la industria química dentro de los cuales sobresalen: el descubrimiento de la dinamita y posterior desarrollo de la gelatina explosiva o gelatina de Nobel, como se la llamó; los métodos nuevos para la concentración del ácido sulfúrico; la destilación continua del petróleo y la refinación del hierro fundido, entre otros. No obstante, la historia de la ciencia y la tecnología lo recuerda principalmente por el trabajo que permitió el uso seguro de la nitroglicerina en forma de dinamita.

Al parecer, en los últimos años de su vida, Alfred Nobel se sintió un tanto frustrado con su éxito y con un cierto complejo de culpa con la humanidad, dado que sus inventos y productos industriales no solo servían para el progreso de la sociedad, sino también para incrementar la capacidad de destrucción de los hombres en la guerra. Tal vez por esto, en su testamento dejó expresamente indicado que:



Se dispondrá como sigue de todo el remanente de la fortuna realizable que deje al morir: el capital, realizado en valores seguros por mis testamentarios, constituirá un fondo cuyo interés se distribuirá anualmente como recompensa a los que, durante el año anterior, hubieran prestado a la humanidad los mayores servicios. El total se dividirá en cinco partes iguales, que se concederán: una a quien, en el ramo de las Ciencias Físicas, haya hecho el descubrimiento o invento más importante; otra a quien lo haya hecho en Química o introducido en ella el mejor perfeccionamiento; la tercera al autor del más importante descubrimiento en Fisiología o Medicina; la cuarta al que haya producido la obra literaria más notable en el sentido del idealismo; por último, la quinta parte a quien haya laborado más y mejor en la obra de la fraternidad de los pueblos, a favor de la supresión o reducción de los ejércitos permanentes, y en pro de la formación y propagación de Congresos de la Paz.

Los premios serán otorgados: los de Física y Química por la Academia Sueca de Ciencias; el de Fisiología o Medicina por el Instituto Carolino de Estocolmo; el de Literatura, por la Academia de Estocolmo; el de la obra de la Paz, por una comisión de cinco individuos que elegirá el Storting noruego. Es mi voluntad expresa que en la concesión de los premios no se tenga en cuenta la nacionalidad, de manera que los obtengan los más dignos, sean escandinavos o no (BBC Mundo.com, 2005).

Así pues, la fortuna conquistada la puso Nobel al servicio de causas nobles, premiar la creatividad científica y literaria y la búsqueda de la paz. Pero estos premios se comenzaron a otorgar en 1901, año en que apenas se iniciaba la gran revolución científica de comienzos del siglo XX, época en la que todavía se podían nombrar sin mucha dificultad a los científicos más destacados del mundo y enumerar los programas de investigación de mayores perspectivas. La cuestión es que, 109 años después, difícilmente la Química y la Física son las disciplinas responsables del desarrollo técnico y científico actual, y mucho más difícil que alguien, distinto a un gran computador de un observatorio mundial de ciencia y tecnología, pueda nombrar así sea un porcentaje mínimo representativo de los científicos productivos de la actualidad.

Esta situación de la ciencia contemporánea ha generado una serie de preguntas alrededor de los premios más famosos del mundo: ¿por cada investigador premiado cuántos del mismo nivel quedan sin premio?, ¿cómo decidir quiénes le han prestado mayores servicios a la humanidad dentro de ese enorme ejército actual de investigadores de todas partes del mundo?, ¿qué se debe hacer para integrar otras disciplinas fundamentales de la cultura contemporánea a los premios de mayor reconocimiento mundial?, ¿poco a poco los premios Nobel se irán quedando como los premios “clásicos” que no tuvieron la capacidad de ajustarse a la nueva situación de la ciencia y la tecnología?

Preguntas todavía sin respuesta que aparecen públicamente, por lo menos, una vez cada año, pero que no impiden que los grandes grupos de investigación y los no tan grandes tengan, de todas maneras, en el fondo de sus expectativas de éxito científico, el Nobel como una meta, por lo general, no declarada, pero sí percibida por sus pares y comunidades científicas.

Los premios que queremos presentar aquí son los de Química, Física y Medicina de 2009, en tanto que las polémicas sobre su otorgamiento presentan, en general, menos objeciones que los otros tres. Las candidaturas a estos premios fueron propuestas por las siguientes instituciones y personalidades:

Fisiología o Medicina:

Los miembros del claustro de profesores del Real Instituto Médico-Quirúrgico Carolino (Kugl-Karolinska Institutet) de Estocolmo; los miembros de la sección de medicina de la Real Academia Sueca de Ciencias; las personas poseedoras del premio Nobel de Medicina; los miembros de las Facultades de Medicina de las Universidades de Upsala, Lund, Oslo, Copenhague y Helsingfors (Helsinki); los miembros de seis Facultades de Medicina, por lo menos, designados por el claustro de profesores con el fin de compartir convenientemente la tarea con otros países y sus cátedras, y aquellos hombres de ciencia que sean requeridos para ello por el Instituto Carolino (Salvaggio, 1949: 12).

Física y Química:

Los miembros suecos y extranjeros de la Real Academia de Ciencias de Estocolmo (Kungl-Vetenskapsakademien), los miembros de los Comités Nobel para los premios de Física y Química; los hombres de ciencias que hayan obtenido el premio Nobel de la Academia de Ciencias; los catedráticos de física y química de las Universidades de Upsala, Lund, Oslo, Copenhague y Helsingfors (Helsinki), del Instituto Carolino y de la Real Universidad Técnica de Estocolmo; los catedráticos libres de estas ciencias que ejerzan permanentemente sus actividades en la Universidad de Estocolmo, catedráticas y catedráticos libres corresponsales de seis universidades y academias como mínimo, designados por la Academia de Ciencias con objeto de compartir convenientemente la labor con otros países y sus cátedras; y finalmente los hombres de ciencia que, por sus condiciones especiales, sean invitados a ello por la Academia (*óp. cit.*, 12-13).

Para el año 2009, el 5 de octubre se anunció el Premio de Medicina, el 6 el de Física y el 7 el de Química.



✳ Elizabeth H. Blackburn. Premio Nobel de Medicina.

Premio Nobel de Medicina

Fue otorgado a la australiana Elizabeth H. Blackburn, al británico Jack W. Szostak y a la estadounidense Carol W. Greider.

Elizabeth H. Blackburn (1948), de origen australiano, profesora de la Universidad de California en San Francisco, y Jack W. Szostak (1952), de origen británico, genetista del Howard Hughes Medical Institute de Estados Unidos, publicaron en 1982 un trabajo sobre el efecto protector del ADN de los telómeros¹ sobre los cromosomas. En 1984 Blackburn, junto con su alumna estadounidense Carol W. Greider (1961), descubrieron una enzima que denominaron "telomerasa", cuyo efecto era producir el alargamiento de los telómeros. Por estos trabajos y por la descripción molecular de los telómeros, el instituto Karolinska les otorgó el premio. Parte de la comunicación dice:

Los descubrimientos de Blackburn, Greider y Szostak han añadido una nueva dimensión para la comprensión de la célula, han arrojado luz sobre los mecanismos de enfermedades y han estimulado el desarrollo de potenciales nuevas terapias ("El Nobel de...", 2009).

Este premio representa una de las características de los programas de investigación científica exitosos, la permanencia en un problema bien focalizado que permite, a medida que se van respondiendo unas preguntas, ir formulando otras nuevas dentro de los mismos marcos conceptuales y metodológicos. Este grupo ya había obtenido el premio Albert Lasker de Investigación Médica de Estados Unidos, para muchos, los premios pre-Nobel, con resultados anteriores en este mismo tema.

Premio Nobel de Física

La Real Academia de Ciencias de Estocolmo otorgó el Premio Nobel de Física a Charles Kao (1933), chino de nacimiento y con ciudadanía británica y estadounidense, por sus trabajos en fibra óptica y transmisión de la luz a grandes distancias. También lo otorgó a los investigadores Willard Boyle, canadiense, y



✳ Charles Kao. Premio Nobel de Física.

1. Los telómeros son los extremos de los cromosomas cuya función es proteger la estabilidad de su estructura, y determinar el número de divisiones de la célula hasta que esta muere.



George E. Smith, estadounidense, por la invención del primer CCD (*charge couple device* o dispositivo de carga acoplada), un sistema para la conversión de la luz en impulsos eléctricos e imágenes digitales.

La decisión de la Academia de Ciencias en este caso está recompensando dos desarrollos tenocientíficos fundamentales de la sociedad contemporánea: por un lado, la transformación de un descubrimiento anterior, la fibra óptica, en el fundamento de la comunicación de banda ancha, veloz y eficiente. Por otro, el invento de los CCD (cuya base teórica está en el efecto fotoeléctrico por el cual le dieron el premio Nobel a Einstein en 1921), dispositivos que permiten la toma de imágenes digitales ya sea de estrellas o galaxias, de las profundidades de los océanos o del interior del cuerpo humano, pasando naturalmente por el deporte, el arte y la vida cotidiana. Se puede decir que con base en estos dos artefactos se han montado las nuevas culturas de las comunicaciones virtuales y la era de la imagen.

☀ Venkatraman Ramakrishnan, Premio Nobel de Química.

Premio Nobel de Química

La Real Academia de Ciencias de Estocolmo otorgó el premio de Química a tres investigadores: Venkatraman Ramakrishnan (1952), biofísico de origen indio y de nacionalidad estadounidense, director del Departamento de Investigaciones Médicas del Laboratorio de Biología Molecular de Cambridge; al estadounidense Thomas Arthur Steitz (1940), profesor de Biofísica y Bioquímica Molecular del Instituto Médico Howard Hughes, Universidad de Yale, New Haven, Connecticut, Estados Unidos; y a Ada Yonath (1939), cristalógrafa israelí, directora del Centro de Estructura Biomolecular del Weizmann Institute of Science de Rehovot, Israel.

La academia reconoció en este caso que, a partir de las investigaciones de los tres científicos, se había logrado establecer a nivel atómico la estructura de los ribosomas, su función en la síntesis y reconstrucción de las proteínas a partir de la información del ADN, y la construcción de modelos que son la base del diseño de nuevos antibióticos. Aunque no se trata de un mismo grupo, sí se trata del desarrollo de líneas relacionadas con el mismo objeto de investigación, los ribosomas, pero con intereses específicos distintos. Ramakrishnan develó los mecanismos por medio de los cuales el ribosoma guía la formación de los enlaces, su estabilidad y el orden de los aminoácidos en la síntesis de las proteínas. Desde 1998 Steitz había conseguido imágenes de alta resolución del ribosoma, técnica que ha perfeccionado hasta llegar a imágenes de nivel atómico. Y Yonath demostró que era posible revelar el funcionamiento interno de los ribosomas por microscopía de rayos X, mediante la producción de cristales

estables de ribosomas a muy bajas temperaturas. En esta investigación, como en todas las que requieren de microfotografía en la actualidad, están presentes los CCD, invento reconocido con el Premio Nobel de Física 2009, como ya reseñamos.

Es importante destacar también las instituciones en las que trabajan estos investigadores, ya que una de las preguntas que no quedó registrada en el conjunto que propusimos atrás es: ¿los premios Nobel son obtenidos por los investigadores mejor dotados y más disciplinados? O, ¿también cuentan otros aspectos definitivos en la investigación? Veamos:

Desde su fundación, a finales de la década de 1940, en el Instituto de Investigaciones Médicas de Cambridge, donde trabaja Ramakrishnan, se inició la investigación sobre estructura molecular de los sistemas biológicos utilizando los rayos X. Fue precisamente allí donde Watson y Crik, a partir de los resultados de estos estudios realizados por Rosalind Franklin, descubrieron la doble hélice.

El Instituto Médico Howard Hughes, lugar de trabajo de Steitz, tiene su origen, como los premios Nobel, en un acto filantrópico individual del aviador estadounidense cuyo nombre lleva el instituto, con la diferencia importante de que, aconsejado por sus

☀ Thomas Arthur Steitz, Premio Nobel de Química.



asesores médicos y científicos, Hughes no creó una fundación para dar dinero a investigadores, sino un "instituto", es decir, un espacio con laboratorios propios, relacionado con programas académicos de educación médica y científica y con hospitales universitarios. En este caso, no es una institución que premia la excelencia sino donde se producen investigaciones de excelencia o, por lo menos, investigaciones reconocidas como tales, si se tiene en cuenta que quince premios Nobel han sido otorgados a investigadores de este instituto.

Finalmente, el Instituto Científico Weizmann en Rehovot, Israel, donde trabaja Ada Yonath, fue fundado en 1949 con base en el antiguo Instituto de Investigación Daniel Sieff (1934). Cuenta con cerca de 2.500 científicos, técnicos y estudiantes de investigación en áreas como física, química, matemáticas, astronomía, ciencias ambientales, bioquímica computacional, ciencia de materiales, medicina, entre otras, y es uno de los centros de investigación más reconocidos en todo el mundo.

Estas reflexiones alrededor de las investigaciones que logran los premios Nobel, permiten decir, en términos del lenguaje cotidiano, *la experiencia no se improvisa*, y en términos de la realidad de la ciencia contemporánea, que esta es definitivamente una empresa global que requiere enormes recursos económicos y políticas institucionales claramente definidas y mantenidas, si se aspira a estar en el selecto grupo, primero, de los nominados y, después, de los ganadores.



✧ Ada Yonath.
Premio Nobel
de Química.

Referencias

BBC Mundo.com (2005, 10 de octubre), "El testamento de Nobel", [en línea], disponible en: http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/specials/newsid_4328000/4328120.stm, recuperado: 9 de octubre de 2009.

Delgado, G. (1999), "Alfred Nobel y la creación de los premios", en *Cuadernos de Historia de la Salud Pública*, La Habana, Cuba, [en línea] disponible en: http://bvs.sld.cu/revistas/his/vol_2_99/hissu299.htm, recuperado: octubre 9 de 2009. "El Nobel de Medicina premia a los padres de la telomerasa, la enzima de la juventud celular", (2009, 5 de octubre), El mundo.es, [en línea], disponible en: <http://www.elmundo.es/elmundosalud/2009/10/05/medicina/1254729916.html>, recuperado: octubre 30 de 2009.

Tamayo Pérez, R. (1986), *Acerca de Minerva*, Fondo de Cultura Económica, México, D.F., [en línea], disponible en <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/40/htm/minerva.htm>, recuperado: octubre 6 de 2009.

Salvaggio, S. (1949), "La fundación Nobel", en Salvaggio S. *Diccionario Biográfico de Premios Nobel*, Claridad, Buenos Aires.

Ciencia y tecnología
para el desarrollo y
la transformación social



40 grupos de investigación, más de 300 proyectos con financiación externa, cerca de 70 experiencias exitosas universidad-empresa, 100 proyectos con impacto social resumen las capacidades científicas y tecnológicas de la Universidad del Norte.

www.uninorte.edu.co



Dirección de Investigaciones y Proyectos
Teléfonos: (57-5) 3509420 / 3509422
dip@uninorte.edu.co
Barranquilla, Colombia

Ver par a conocer, conocer para preservar



Inauguración de la XI Expociencia Expotecnología 2009 en el Año Internacional de la Astronomía, presentación de la obra teatral *Ursule Fabule* del grupo Les Atomes Crochés de Francia.

Patrocinada por la Alianza Colombo Francesa.

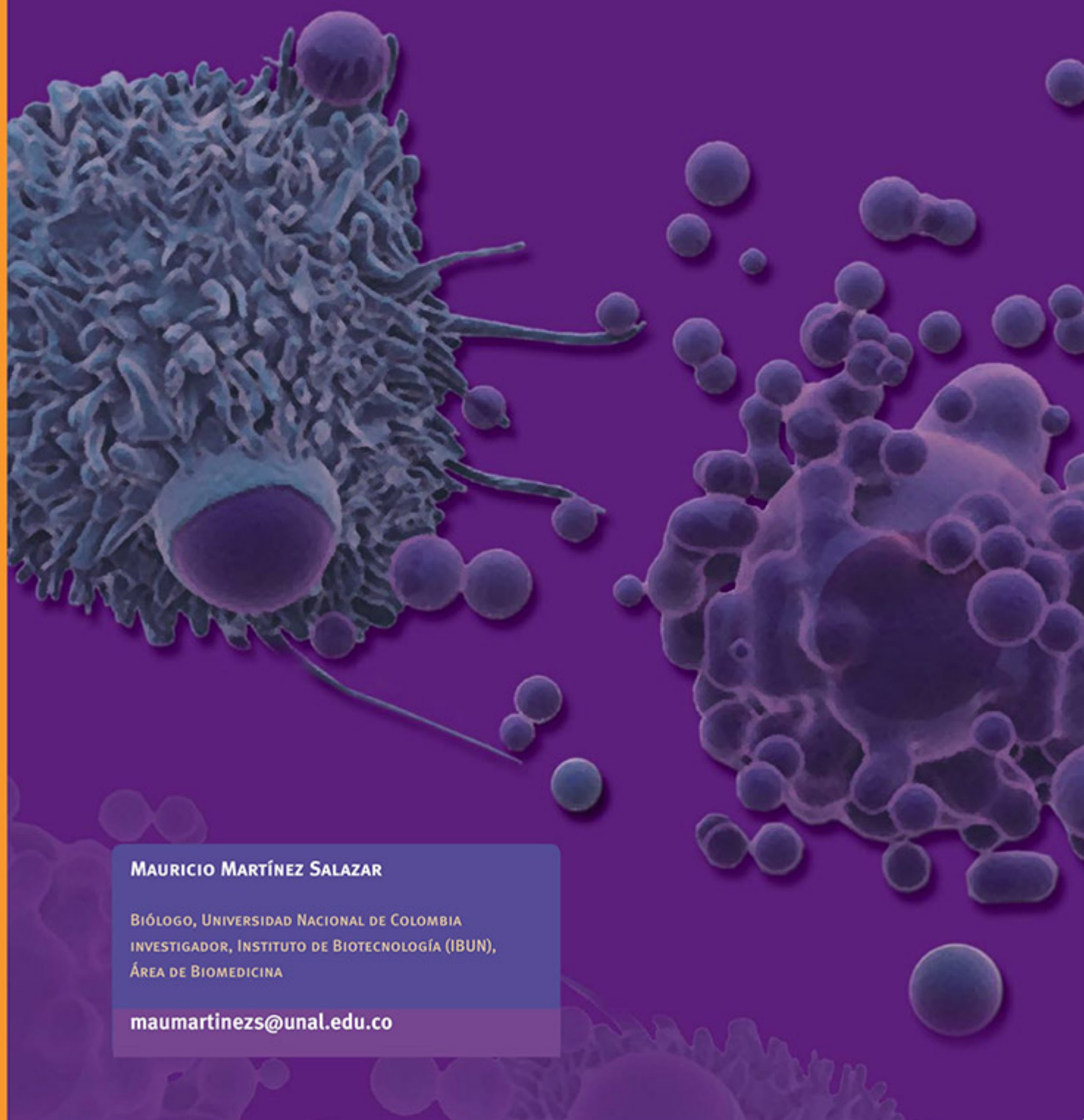
Un espectáculo basado en la realización de experimentos de química y física.

Fotos: Eduardo Carvajal

APOPTOSIS:

una cuestión de *Vida o Muerte*

Biomedicina



MAURICIO MARTÍNEZ SALAZAR

BIÓLOGO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
INVESTIGADOR, INSTITUTO DE BIOTECNOLOGÍA (IBUN),
ÁREA DE BIOMEDICINA

maumartinezs@unal.edu.co

Resumen

La apoptosis o muerte celular programada es un mecanismo esencial que, junto con la proliferación celular, participa en la regulación de la formación y el mantenimiento de los tejidos y los órganos en todas las fases del desarrollo de un organismo. Este fenómeno implica una serie de aspectos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y genéticos, a nivel celular, cuya activación por factores externos o internos implica la desaparición definitiva de la célula. Cuando existen alteraciones, mutaciones y/o pequeñas transformaciones en los diferentes factores involucrados, se desencadenan graves patologías humanas como el cáncer, enfermedades autoinmunes o neurodegenerativas. Lo interesante es apreciar cómo un fenómeno que es esencialmente un proceso que conduce a la muerte celular, es fundamental para el desarrollo de los organismos, y sin el cual no existiría la vida como la conocemos actualmente.

Hoy en día la apoptosis o muerte celular programada ha resultado ser un tema de gran impacto dentro de la comunidad académica e investigativa, en las áreas de la medicina, la oncología, la patología, la gerontología, la embriología y la fisiología, entre muchas otras. Su importancia puede ser resumida en el cuestionamiento del doctor Fabrizio d'Adda di Fagagna (2008). "¿Qué mejor acercamiento al estudio de la vida que entender su negación: envejecimiento y muerte?"

El fenómeno de la apoptosis es complejo y se caracteriza por hacer parte de un conjunto de mecanismos que mantienen la homeostasis (estado de equilibrio) en los organismos vivos. Según estudios recientes, este fenómeno se presenta tanto en entidades unicelulares (por ejemplo en protistas), como en organismos superiores (incluyendo el hombre) en las células que conforman sus tejidos y órganos; esto demuestra que el fenómeno es evolutivamente conservado y posee una enorme importancia en el desarrollo normal de la vida, como la conocemos hoy.

Apoptosis (del griego *apo*: fuera; *ptōsis*: caída. Término empleado por Homero para designar la caída de las hojas o pétalos en otoño) fue una expresión empleada en un artículo científico de John Kerr, Andrew Wyllie y Alastair Currie, en 1972, para describir una forma de muerte celular morfológicamente diferente de la necrótica, observada por ellos en algunos tejidos humanos (sobre todo tejido hepático) analizados por técnicas histoquímicas en microscopía de luz y microscopio electrónico (Kerr *et al.*, 1972).

Posteriormente, la comprensión de los mecanismos involucrados en este proceso fue producto de estudios de la muerte celular que acontece en el desarrollo embrionario del nemátodo *Caenorhabditis elegans* (modelo biológico para el estudio en embriología), en el cual, por un lado, se reconoció que de sus 1.090 células somáticas, 131 mueren por apoptosis en diferentes fases del proceso de desarrollo y, por otro, se comprobó que esta relación se mantiene constante en esta especie (Horvitz, 1999; Elmore, 2007). En la actualidad y gracias a novedosas técnicas de detección a nivel de microscopía, bioquímica y genética, se ha establecido una mayor comprensión de este fenómeno y los mecanismos por los cuales se desarrolla tanto *in vivo* como *in vitro*.

La muerte celular programada es definida como un proceso coordinado, dependiente de energía, que implica la activación de un grupo de enzimas cisteín proteasas bautizadas con el nombre de "caspasas", y una compleja cascada de eventos que ligan el estímulo inicial (externo o interno) hacia la desaparición definitiva de la célula. Se ha demostrado una complementariedad de este fenómeno con el proceso de proliferación celular, pues, para mantener la homeostasis tisular en el cuerpo humano, se calcula que alrededor de 10 billones de células nacen cada día para compensar las que mueren por apoptosis, así se genera un balance eficaz en la densidad celular que se evidencia en la formación de todos los tejidos y órganos. Esto se refleja, por ejemplo, en el diseño morfo-anatómico de las manos (analizado en extremidades de ratones experimentales) o incluso en la formación del tejido dentario en relación a la formación de dientes y otras estructuras. La figura 1 muestra de manera representativa el proceso de formación de una mano a nivel embrionario y las regiones de tejido que sufren apoptosis para moldear la estructura final.

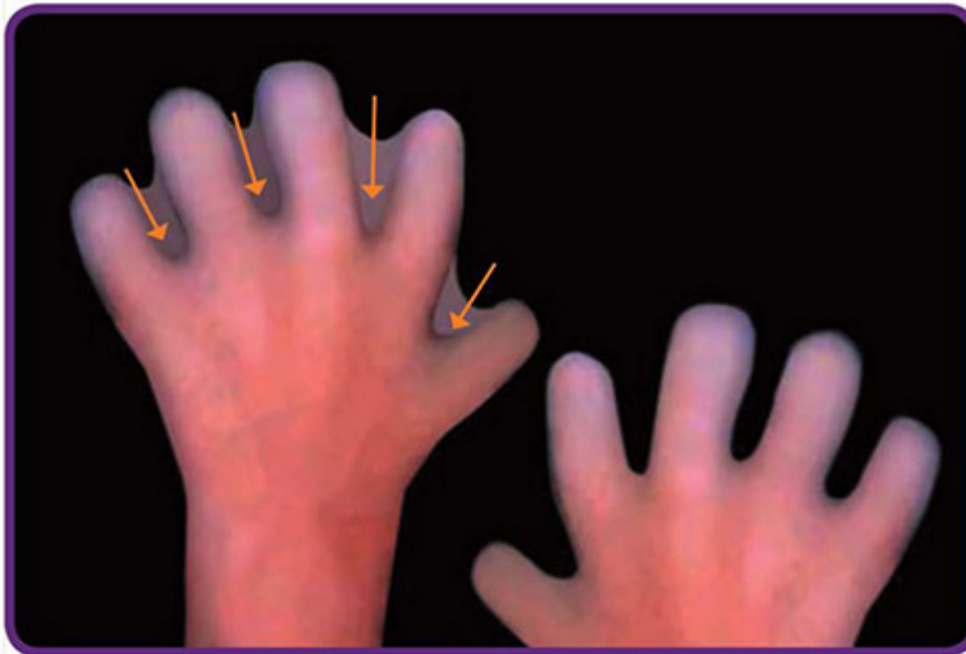


Figura 1.

Diagrama que representa la formación de las manos a nivel embrionario. Las flechas de color naranja (izquierda) exponen regiones de tejido cuyas células sufrirán apoptosis, para reducir la cantidad de tejido y permitir una morfología típica de las manos (derecha). La generación de la apoptosis en esta zona regula la densidad del tejido y permite una mayor o menor cantidad de membranas interdigitales desarrolladas en diferentes tipos de vertebrados.

Dentro de este proceso hay una gran cantidad de interacciones proteicas como entrecruzamientos, rompimientos, síntesis y degradaciones, además de un reordenamiento de estructuras celulares que eleva significativamente el consumo de energía por parte de la célula, y logra su efectiva degradación para, finalmente, ser "reciclada" por otras células vecinas (Vicencio *et ál.*, 2008). Se ha reportado que el tiempo que le toma a una célula en llevar a cabo este proceso depende de su tipo y características de activación pero, en promedio, es de 2 a 3 horas. De igual forma, se ha establecido que los factores por los cuales se activa el proceso apoptótico son variados, y su efectividad depende del tipo de célula; se sabe, por ejemplo, que la apoptosis puede ser desencadenada en células del timo (timocitos) por la aplicación de corticosteroides, hormonas que, sin embargo, en otros tipos de células no promueven el mismo proceso (Dasso, 2004; Elmore, 2007).

Aspectos citomorfológicos

Una de las maneras más sencillas de analizar las implicaciones citomorfológicas de la apoptosis es mediante la comparación con otros tipos de muerte celular. Como lo observaron y reportaron John Kerr y sus colaboradores (1972), la muerte celular puede ocurrir por medio de dos vías principales, claramente distinguidas en su naturaleza: la apoptosis y la necrosis (Zhivotovsky y Orrenius, 2001). Se ha comprobado en numerosas oportunidades que la necrosis celular, a diferencia de la apoptosis, es un proceso desordenado e independiente de energía que presenta cambios irreversibles en el núcleo celular (fenómeno conocido como cariólisis); pérdida de la estructura citoplasmática; evidente disminución de la función en las mitocondrias y un aumento en el volumen celular que desencadena citólisis (del griego *cito*: célula; *lisis*: rompimiento) (Zhivotovsky y Orrenius, 2001) y, posteriormente, libera todo el material citoplasmático hacia el espacio extracelular, produciendo, por lo general, fenotipos inflamatorios y necróticos en los tejidos afectados por la liberación de citoquinas, entre otros factores. El proceso apoptótico, en cambio, establece mecanismos que aseguran que el contenido celular no sea liberado, sino encapsulado y luego removido en su totalidad por células limpiadoras (Campisi, 2003).

Las principales diferencias citomorfológicas en los tipos de muerte celular por apoptosis y por necrosis son presentadas en la tabla comparativa adjunta.

Tabla 1.

Tabla comparativa de características citomorfológicas de los procesos de muerte celular: apoptosis y necrosis. Adaptada de Elmore (2007).

| CARACTERÍSTICA | APOPTOSIS | NECROSIS |
|---|---|--------------------------------------|
| Número de células | Células individuales o pequeños grupos de células | Generalmente grandes cantidades |
| Volumen celular | Encogimiento celular | Hinchamiento celular, citólisis |
| Efecto en integridad de membrana plasmática | Membrana celular intacta | Membrana celular comprometida |
| Efecto en citoplasma | Retenido en cuerpos apoptóticos | Liberado al espacio extracelular |
| Efecto en núcleo | Condensación de cromatina (picnosis) | Fragmentación del núcleo y cromatina |
| Procesos de inflamación tisular | No hay presencia de inflamación | Inflamación usualmente presente |

Aspectos bioquímicos y genéticos

Las alteraciones citomorfológicas antes descritas son producto de una serie de mecanismos celulares, bioquímicos y genéticos asociados al fenómeno. Actualmente se reconocen dos vías principales por las que hay activación del proceso: una extrínseca, que depende de factores extracelulares para su activación, y otra intrínseca, que depende de factores intracelulares (Elmore, 2007; Huerta *et. ál.*, 2007). Los dos modos confluyen en una vía terminal que se inicia por la fragmentación de una proteína clave en el proceso, denominada caspasa-3, y tiene como resultado un rompimiento del ADN nuclear; la degradación de las proteínas del citoesqueleto y del núcleo; la formación de los cuerpos apoptóticos antes descritos; la expresión de factores (como fosfatidilserina) en la superficie de la membrana para reconocimiento por células fagocíticas y, finalmente, la degradación completa de la célula. Esta secuencia es direccionada principalmente por enzimas caspasas (que funcionan como proteasas, es decir, fragmentan otras proteínas) que amplifican el estímulo inicial, y obtienen como resultado una muerte celular rápida y efectiva. Se han reportado a la fecha 10 caspasas principales clasificadas en: iniciadoras (caspasa-2, -8, -9 y -10), efectoras (caspasa-3, -6 y -7), e inflamatorias (caspasa-1, -4 y -5) (Cohen, 1997; Elmore, 2007).

La vía de señalización extrínseca se encuentra mediada por interacciones que involucran receptores transmembranales como, por ejemplo, los receptores de muerte (en inglés *death receptors*) que transmiten la señal desde la superficie hacia los mecanismos internos. Los receptores mejor caracterizados incluyen FasL/FasR, TNF- /TNFR1, Apo3L/DR3, Apo2L/DR4 y Apo2L/DR5. Esta interacción permite la activación de la procaspasa-8 y su conversión en caspasa-8, en la que se lleva a cabo la fase de ejecución de la apoptosis.

Por el contrario, la vía de señalización intrínseca es mediada por la mitocondria de la célula, más específicamente por alteración de la membrana mitocondrial, cuyo resultado es la formación de poros transitorios y la pérdida del potencial transmembranal mitocondrial y, en ese sentido, la liberación de dos grupos de proteínas inductoras de apoptosis, normalmente retenidas en la membrana: el primer grupo es constituido por el citocromo c, la proteína Smac/DIABLO y la serín-proteasa HtrA2/Omi, y el segundo por AIF, endonucleasa G y CAD (Chinnaiyan, 1999). Estos eventos mitocondriales se encuentran regulados por la familia de proteínas Bcl-2 que, a su vez, es regulada por la proteína supresora de tumores p53. El gen codificador de aquella se conoce comúnmente como "el guardián del genoma" porque la proteína censa el grado de daño que puede sufrir el ADN nuclear por diferentes factores (radiación, agentes citotóxicos, etc.) los cuales, de representar un daño muy elevado, desencadenan la apoptosis.

Finalmente, los dos modos confluyen en la vía ejecutora, a menudo por la activación de la caspasa-3 que, a su vez, activa la endonucleasa CAD. La CAD degrada el ADN cromosomal dentro del núcleo y causa condensación de la cromatina, para luego conducir a la formación de los cuerpos apoptóticos y su degradación (Garrido *et. ál.*, 2006).

Para una mejor comprensión de lo que sucede en el interior de la célula durante este fenómeno, se puede acudir al diagrama representativo de la figura 2, en el que se observan las dos vías de señalización y su convergencia, además de las implicaciones morfológicas y fisiológicas que conducen a la muerte de la célula.

Desde el punto de vista genético y a diferencia del proceso de muerte por necrosis, el fenómeno de apoptosis involucra una dinámica entre genes específicos. Los principales genes que se han reportado por inducir o bloquear apoptosis en células humanas incluyen: (1) Genes inhibidores: *bcl-2* y *bcl-x_l*; y (2) Genes promotores: *bax*, *bcl-x_s*, *ICE* (en inglés: Interleukin 1-β Converting Enzyme), *c-myc* y *p53* (Mastrangelo y Betenbaugh, 1995; Horvitz, 1999; Müllauer *et. ál.*, 2001).

Las mutaciones en estos genes particulares del proceso apoptótico contribuyen a la generación de fenotipos patológicos de enfermedades humanas tan significativas, como se verá a continuación.

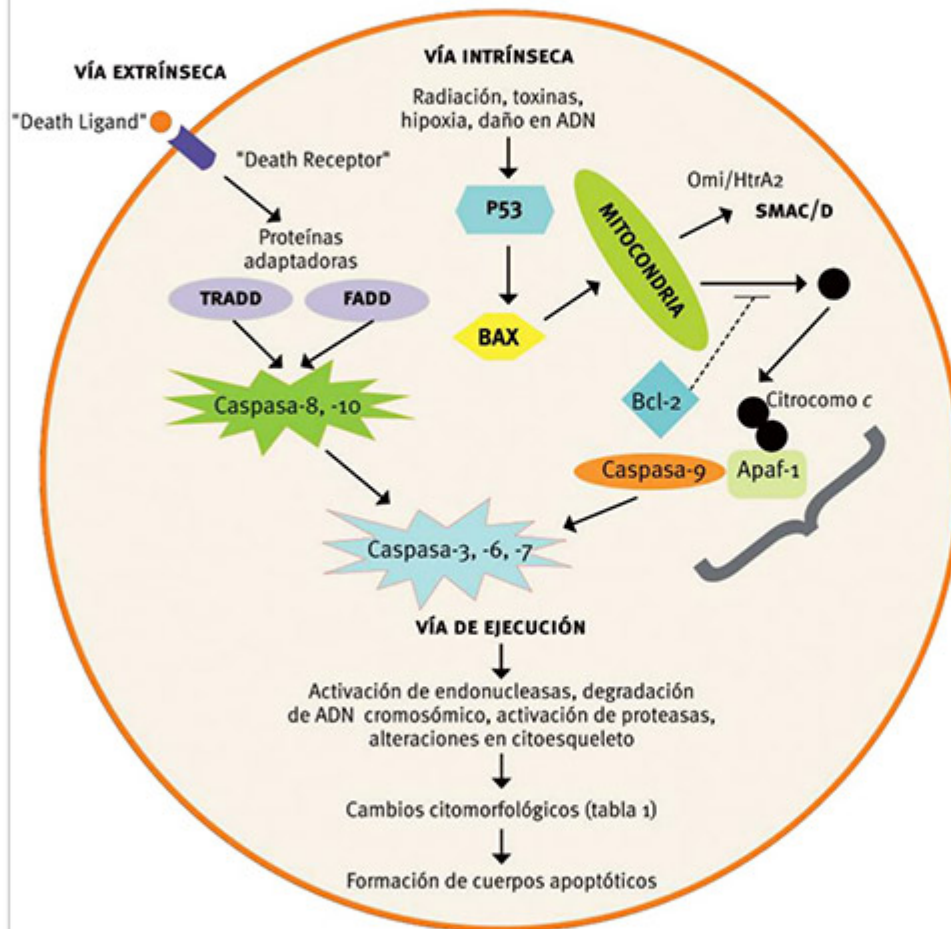



Figura 2.

Representación esquemática de las vías de iniciación de apoptosis en una célula. Las dos vías principales, extrínseca e intrínseca, convergen activando las caspasas-3, -6 y -7.

Aspectos patológicos

El estudio y la caracterización de este fenómeno representa un gran acercamiento hacia la comprensión y posible control de un sinnúmero de enfermedades, envueltas en múltiples alteraciones asociadas a los mecanismos del proceso apoptótico, ya sea por aumento del proceso o disminución del mismo en las células que componen los diferentes tipos de tejidos.

El cáncer es el ejemplo más claro de estas alteraciones, aquí los mecanismos normales que regulan el ciclo celular son disfuncionales, ya sea por sobreproliferación de células o disminución en las muertes de las mismas; además, los investigadores han reportado que el gen codificador de la proteína p53



presenta mutación en más del 50% de todos los cánceres humanos conocidos. Estas células tumorales adquieren una resistencia a activar procesos apoptóticos por la sobre-expresión de proteínas anti-apoptóticas como Bcl-2, o la inhibición o mutación de proteínas pro-apoptóticas como Bax.

De igual manera, cuando se presenta una disminución de la tasa normal de apoptosis, se generan patologías como el síndrome linfoproliferativo autoinmune (ALPS por sus siglas en inglés), enfermedad que resulta de la insuficiencia de apoptosis de células T auto-agresivas. Otras enfermedades asociadas a ALPS son la anemia hemolítica (disminución en la concentración de glóbulos rojos en la sangre), la trombocitopenia inmunomediada (disminución en la concentración de plaquetas) y la neutropenia autoinmune (destrucción de neutrófilos por presencia de autoanticuerpos) (Elmore, 2007).

De manera contraria, el Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida (SIDA) es una enfermedad que resulta de una infección ocasionada por el Virus de Inmunodeficiencia Humana (VIH); ocurre cuando este entra en las células T, en las que la proteína Tat del virus aumenta la expresión del receptor Fas (proteína involucrada en la vía de señalización extrínseca), e incrementa el estímulo apoptótico de este tipo de células provocando una importante deficiencia de células T y la generación del síndrome patológico en el organismo entero (Elmore, 2007).

Las alteraciones en el proceso normal de la apoptosis también conducen a enfermedades neurodegenerativas. Por ejemplo, el mal de Alzheimer, una condición degenerativa en el sistema nervioso central que se cree causada por mutaciones en diferentes genes que codifican múltiples proteínas. Situación esta que permite la formación de placas (depósitos extracelulares) que resultan neurotóxicas, induciendo apoptosis por estrés oxidativo celular en neuronas y glia (Elmore, 2007).

Al igual que las enfermedades neurodegenerativas, el exceso de apoptosis se ha evidenciado en patologías relacionadas con isquemias, como la miocárdica. Este tipo de isquemia se caracteriza por el estado de insuficiencia de suplemento de sangre, lo que conduce a la disminución en los niveles de oxígeno y posterior muerte de cardiomiocitos; en esta condición no se detecta necrosis tisular sino sobre-expresión de Bax (proteína pro-apoptótica) en el tejido miocárdico isquémico.

Al igual que estas enfermedades, hay muchas otras que se derivan de alteraciones, mutaciones, transformaciones, etc., de proteínas y genes asociados a los mecanismos normales del proceso apoptótico; de tal manera, cambios muy sutiles resultan en grandes patologías que cada día aumentan la tasa de mortalidad de los seres humanos en el mundo, y convierten este tema en una importante implicación en la salud pública. Profundizar y estudiar de manera más activa este fenómeno facilitará el diagnóstico, tratamiento y posible control cada vez más eficiente de estas enfermedades.

Conclusiones y perspectivas

Según esta revisión general del proceso de muerte celular programada, este se evidencia como un modelo en el cual un fenómeno representa una paradoja biológica: por un lado, las células mueren de manera natural y ordenada para garantizar el buen desarrollo del organismo al cual pertenecen, pero, por otro, en caso de adquirirse pequeñas modificaciones moleculares, se desencadenan patologías de gran impacto para la especie humana. Esto nos lleva a pensar que la apoptosis, siendo esencialmente un fenómeno que implica muerte celular (perfectamente controlada), aparece también como un mecanismo de “vida o muerte” en el desarrollo de tejidos y órganos. Se podría entonces concluir que existe en la naturaleza una complementariedad entre la *vida* y la *muerte* en función del buen desarrollo de las especies, y que estas deben ser entendidas bajo este paradigma. Una investigación cada vez más aguda de este maravilloso proceso conducirá, sin duda, a un mejor y más profundo entendimiento de múltiples patologías, cuyo resultado será un óptimo diagnóstico y un posible tratamiento para el bien de la humanidad.

Referencias

Campisi, J. (2003), “Cellular Senescence and Apoptosis: how Cellular Responses Might Influence Aging Phenotypes”, en *Experimental Gerontology* 38, pp. 5-11.

- Chinnaiyan, A. (1999), "The Apoptosome: Heart and Soul of the Cell Death Machine", en *Neoplasia* 1, 1987, pp. 5-15.
- Cohen, G. (1997), "Caspases: the Executioners of Apoptosis", en *Biochem J.* 326 (Pt. 1), pp. 1-16.
- Dasso, M. (2004), "Cellular Aging and Death", en Wiley J. & Sons, editors. *Current Protocols in Cell Biology*, USA, Wiley InterScience, 18.0.1-18.0.2.
- Elmore, S. (2007), "Apoptosis: a Review of Programmed Cell Death", en *Toxicol Pathol* 35(4), pp. 495-516.
- Garrido, C. Galluzzi, L., Brunet, M., Puig, P., Didelot, C. y Kroemer, G. (2006), "Mechanisms of Cytochrome c Release from Mitochondria", en *Cell Death Differ* 13, pp. 1423-1433.
- Horvitz, R. H. (1999), "Genetic Control of Programmed Cell Death in the Nematode *Caenorhabditis elegans*", en *Cancer Research* 59, pp. 1701-1706.
- Huerta, S., Goulet, E., Huerta-Yepez, S. y Livingston, E. (2007), "Screening and Detection of Apoptosis", en *Journal of Surgical Research* 139, pp. 143-156.
- Kerr, J., Wyllie, A. y Currie, A. (1972), "Apoptosis: a Basic Biological Phenomenon with Wide-ranging Implications in Tissue Kinetics", en *Br J Cancer* 26, pp. 239-257.
- Mastrangelo, A. y Betenbaugh, M. (1995), "Implications and Applications of Apoptosis in Cell Culture", en *Current Opinion in Biotechnology* 6, pp. 198-202.
- Müllauer L., Gruber P., Sebinger D., Buch J., Wohlfart S. y Chott A. (2001), "Mutations in Apoptosis Genes: a Pathogenetic Factor for Human Disease", en *Mutation Research* 488, pp. 211-231.
- Vicencio, J., Galluzzi, L., Tajeddine, N., Ortiz, C., Criollo, A., Tasdemir, E., Morselli, E., Younes, A., Maiuri, M., Lavandro, S. y Kroemer, G. (2008), "Senescence, Apoptosis or Autophagy?", en *Gerontology* 54, pp. 92-99.
- Zhivotovsky, B. y Orrenius, S. (2001), "Current Concepts in Cell Death", en Wiley J. & Sons, editors. *Current Protocols in Cell Biology*, USA, Wiley InterScience, 18.1.1-18.1.18.



Olimpiadas Colombianas de Matemáticas, Física y Computación

29 AÑOS
DE
CREATIVIDAD,
EXCELENCIA
Y DESAFIO

INFORMES E INSCRIPCIONES

Cra. 38 # 58 A - 77

☎ 316 85 90 - 221 41 35 - Telefax: 221 34 97

Bogotá D.C. - Colombia

e-mail: olimpia@uan.edu.co - <http://olimpia.uan.edu.co>

La UAN avanza en Investigación



117 grupos de investigación
registrados y 38 categorizados
por Colciencias.



DINOSAURIOS EN NUESTROS DÍAS: EL VUELO Y LA PLUMA EN LA EVOLUCIÓN DE LAS AVES

JONATHAN S. PELEGRIN-RAMÍREZ

BIÓLOGO CON ÉNFASIS EN ZOOLOGÍA, UNIVERSIDAD DEL VALLE, CALI, COLOMBIA. MÁSTER EN BIOLOGÍA EVOLUTIVA. PERTENECE AL EQUIPO DE INVESTIGACIÓN EN PALEOCLIMATOLOGÍA, MACROECOLOGÍA Y MACROEVOLUCIÓN DE VERTEBRADOS. DEPARTAMENTO DE PALEONTOLOGÍA, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, ESPAÑA.

pele_bilogos@yahoo.es

Resumen

Cuando nos preguntan acerca de las aves y las características que las definen a nivel taxonómico, no dudamos en decir que las alas y el plumaje se constituyen como los atributos por los cuales cualquier persona puede reconocer un ave y no confundirla con ningún otro animal. En biología evolutiva se dice que las especies poseen adaptaciones y que existen caracteres en diferentes grupos en el plano taxonómico que, además de adquirir importancia a nivel sistemático en el reconocimiento y estudio filogenético de los mismos, en sus orígenes fueron desarrollados como adaptaciones en los primeros organismos que constituyeron el grupo. Asimismo, debido a su contribución en la eficacia biológica de los individuos y gracias a la selección natural, evolucionaron perdurando y consolidándose en el grupo.

Ahora bien, es importante considerar si las alas, como estructura anatómica para el vuelo, y el plumaje constituyen adaptaciones en las aves o si, de alguna manera, su función es derivada de una adaptación previa que responde al concepto de exaptación, ya que como característica, las alas derivadas de las extremidades anteriores presentan similitudes anatómicas con las de dinosaurios maniraptores; y, en cuanto al plumaje, este aparece en el registro fósil de varios linajes de dinosaurios terópodos. En el presente trabajo se pretende realizar una exploración de estos aspectos, y efectuar una revisión importante del acalorado debate científico sobre la evolución de las aves y su tratamiento como dinosaurios derivados.

Palabras clave: adaptación, ala, *Archaeopteryx*, aves, dinosaurios, evolución, exaptación, maniraptores (Maniraptora), plumaje, terópodos (Terópoda).

Historia del estudio de la evolución de las aves

Desde la publicación de *El origen de las especies* de Charles Darwin, la comunidad científica introdujo el pensamiento evolutivo a los estudios de la biología en general, y se comenzó a aprender sobre los grupos taxonómicos en su diversidad, y sobre la historia filogenética de los mismos por medio de las pruebas ofrecidas por el registro fósil. Las aves, en particular, recibieron gran interés por parte de los naturalistas, quienes realizaron numerosas expediciones y describieron gran cantidad de especies. Muestra de ello es el reducido número de especies que se describen anualmente en comparación a las de otros taxones, llegando a una diversidad actual de cerca de 10.000 especies (Chiappe y Dyke, 2002).

Sin embargo, su origen fue un tema de amplia discusión y controversia. T. H. Huxley, fuerte defensor de la propuesta evolutiva darwiniana, propuso por primera vez a los dinosaurios terópodos como posibles ancestros de las aves. Huxley realizó un estudio de anatomía en el cual comparó las extremidades anteriores del *Megalosaurus* (un dinosaurio terópodo encontrado en el sur de Inglaterra y descrito por William Buckland, en 1824) con las de un avestruz, y observó que ambos compartían 35 caracteres morfológicos (Chiappe, 1995; Padian y Chiappe, 1998; Richardson, 2003). No obstante, la comunidad científica de aquella época rechazó tal aseveración, ya que no podía creer que las aves voladoras descendieran de grandes dinosaurios, a pesar de que en 1861, en la localidad de Solenhofen, al sur de Alemania, se hallara el fósil del *Archaeopteryx lithographica* (Novacek, 1999; Christiansen et al., 2004). Asimismo, a finales del siglo XIX, el paleontólogo Othniel Marsh realizó descripciones y diversos estudios anatómicos de otras aves mesozoicas, pero fueron meramente descriptivas (Marsh, 1881).

La cuestión de la evolución y el origen de las aves quedó estancada hasta que, en 1916, Gerard Heilmann retomó este aspecto de la biología en una publicación acerca de las aves, en la cual trataba aspectos como su origen y anatomía, y consideraba que los terópodos eran el grupo de animales fósiles con el que las aves compartían más características. Sin embargo, la tesis de Heilmann no era suficientemente fuerte; los dinosaurios terópodos no poseían clavículas, hueso clave para la evolución del vuelo en las aves, ya que en él está presente la fúrcula, un punto importante de inserción muscular, al igual

En la página anterior: restos fósiles de la *Archaeopteryx lithographica*.

que la quilla. Heilmann pensó que las aves debieron descender de otro grupo de reptiles poseedores de clavículas (Hopson y Radinsky, 1980; Chiappe, 1995; Padian y Chiappe, 1998).

Posteriormente se halló el *Oviraptor* en China (descrito por Henry Osborn en 1924). Junto al fósil se encontraron huevos, y aquello dio pie, inicialmente, para pensar que este organismo los depredaba de otros dinosaurios (de allí su nombre), aunque después se descubrió que los empollaba. Desde el punto de vista anatómico, este dinosaurio terópodo poseía clavículas, incluso fusionadas formando una fúrcula (o hueso en forma de Y o de los deseos), estructura que también se encuentra presente en las aves (Richardson, 2003). A pesar de esto, la propuesta del origen de las aves a partir de terópodos no se retomó de nuevo hasta que John Ostrom, en la década de los años setenta, retomó la hipótesis a partir de unos estudios previos que había realizado acerca del *Deinonychus*. No obstante, seguía existiendo una desconexión entre el origen de las aves y el del vuelo. Este último aspecto fue abordado por F. Nocsá en 1907, quien propuso que el origen del vuelo en las aves se había producido a partir de animales cursoriales en el suelo, punto de partida para lo que sería conocido como la Teoría cursorial del vuelo. Más adelante se propondría la Teoría arbórea, según la cual el vuelo evolucionó de organismos que trepaban a los árboles y, posteriormente, actuaron como planeadores (Chatterjee y Templin, 2003; Padian y Chiappe, 1998; Burgers y Chiappe, 1999; Pough *et. ál.*, 1999).

Relaciones filogenéticas y origen de las aves

Las aves han sido vinculadas con muchos grupos naturales. Diversas propuestas evolutivas sobre su origen han planteado como sus ancestros grupos muy diversos, por ejemplo, las tortugas, los reptiles cocodrilomorfos, los pterosaurios y los dinosaurios, tanto ornithisquios como saurisquios. Es el caso de Walker, quien, en 1972 (Hopson y Radinsky, 1980) relacionó a las aves con cocodrilos basales (*Sphenosuchus*), debido a sus similitudes craneales. Sin embargo, hoy en día, debido a múltiples trabajos realizados por autores como Ostrom, Chiappe y Padian, entre otros, se tiene una gran evidencia que vincula a las aves con los dinosaurios terópodos-maniraptores. Algunas de las evidencias proceden de estudios comparados a nivel anatómico; del estudio de huevos; del reconocimiento y descripción de más fósiles de aves mesozoicas, y de la evidencia de dinosaurios terópodos no-avianos con plumaje en diversos estados de complejidad.

La discusión actual se centra en conocer cuál podría ser el linaje de dinosaurios maniraptores que dio origen a las aves.

La discusión actual se centra en conocer cuál podría ser el linaje de dinosaurios maniraptores que dio origen a las aves, ya que cada vez se hallan más fósiles y se realizan nuevos análisis filogenéticos para conocer los diversos parentescos evolutivos (Hou *et. ál.*, 1999; Clarke y Chiappe, 2001; Chiappe y Dyke, 2002; Hwang *et ál.*, 2002; Turner *et. ál.*, 2007). Para otros autores, el origen de las aves se remonta a los arcosaurios más primitivos del Triásico, próximos al *Herrerasaurus*, ya que, según se argumenta, fósiles como el del *Archaeopteryx* (150 m.a.) son más antiguos que muchos dinosaurios terópodos que se consideran próximos, como sucede con el *Velociraptor* (115 m.a.). Esto constituye una paradoja temporal porque, en los estudios filogenéticos, se estaría relacionando a las aves con los dinosaurios posteriores al hallazgo del *Archaeopteryx*, considerado el primer ejemplar en el registro como ave.

Asimismo, se argumenta con base en estudios embriológicos y anatómicos que las manos de las aves difieren de las de los terópodos: las primeras mantienen los dedos II, III y IV, mientras que los segundos mantienen los dedos I, II y III (Thomas y Garner, 1998; Galis *et. ál.*, 2003; Feduccia y Nowocki, 2002; Zhou, 2004). De una manera u otra las anteriores teorías pretenden llegar a saber con mayor aproximación cómo deben catalogarse las aves desde el punto de vista filogenético; si deben perder su estatus de clase o sí, por el contrario, deben clasificarse como un taxón de organismos diápsidos derivado dentro de la clase *Reptilia*; y, de ser así, cómo lograron alzar vuelo.

Con respecto a lo anterior, consideramos que en relación con aspectos como la paradoja temporal y el desarrollo de los dígitos que se muestran como obstáculos para la teoría dinosauriana del origen de las aves, se debe considerar, por un lado, que el registro fósil nunca es total y que constantemente se

realizan nuevos hallazgos y, por otro lado, que las presiones selectivas para el desarrollo de extremidades en organismos depredadores cursoriales son diferentes con respecto a organismos arborícolas o a pseudo-voladores. La longitud relativa de nuestros dedos es diferente de la de los demás primates y, no por eso, dejamos de ser primates.

Dinosaurios maniraptores y el linaje de las aves

Los maniraptores fueron animales de talla mediana y zancada larga, dotados de garras tanto en patas anteriores como posteriores. Algunos conocidos representantes de este grupo son: los Dromaeosáuridos como el *Deinonychus*, el *Velociraptor*, el *Sinornithosaurus* y el *Dromaeosaurus*; los Troodontidos como el *Troodon* y el *Byronosaurus*; los Oviraptóridos como el *Oviraptor*, y los relativamente nuevos denominados Alvarezsáuridos, como el *Mononykus* y el *Shuvuuia*. Diversas características morfológicas son comunes entre estos organismos y las aves. A esta conclusión se ha llegado gracias al análisis filogenético de caracteres realizado, inicialmente, por Jaques Gauthier (1986) y, posteriormente, a los estudios de Turner y sus colegas (2007); ambos, con la descripción del Mahacala, un pequeño Dromaeosaurio basal, ratificaron a los Deinonychosauria como los más próximos al linaje de las aves (formando el clado *Paraves*), y confirmaron lo dicho inicialmente por John Ostrom, al comparar a las aves con el recién descubierto *Deinonychus*, en los años setenta. Sin embargo, basados en nuevos hallazgos dentro del nuevo linaje de los Alvarezsáuridos en China, otros autores han propuesto este linaje como el más próximo (Bonaparte, 1991 y Perle, 1994, en Chiappe y Dyke, 2002).

Tanto si se las ubica en un grupo como en otro, los análisis comparativos han revelado que muchas características que se consideran exclusivas de las aves a nivel esquelético, se encontraban ya en los dinosaurios maniraptores. Por ejemplo, la presencia de tres dedos de los cuales el segundo es el más largo, la fusión de las clavículas y el hueso en la muñeca en forma de media luna que brinda mayor versatilidad en la movilidad de la mano (que en los maniraptores tenía gran relevancia para la caza). Asimismo, estos dinosaurios presentaban una orientación esencial del hueso púbico hacia la parte posterior, y una importante fusión de las vértebras caudales que les daría equilibrio en su marcha bípeda; en el *Archaeopteryx lithographica* estas similitudes son aún mayores.

Otras características anatómicas de estos organismos y de algunos terópodos no maniraptóridos fueron: la presencia de huesos neumatizados, la reducción del peso craneal mediante el desarrollo de forámenes, y la columna vertebral en disposición horizontal con respecto al cuello y de un tamaño considerablemente más largo. Esto último sucede, por ejemplo, en el *Troodon* y el *Oviraptor*; en ellos las extremidades se hicieron más largas debido a la postura bípeda, con un muslo más corto en relación con la pierna. Igualmente, se produjo una reducción importante de la fibula, y los brazos y la cintura escapular sufrieron una tendencia al alargamiento, excepto en terópodos de gran tamaño como el *Carnotaurus* o el *Tyrannosaurus* que, por el contrario, presentaron una disminución considerable de los miembros anteriores (Richardson, 2003; Padian y Chiappe, 1998).

Con el hallazgo de varios fósiles en diferentes localidades de China (Liaoning), España, Mongolia, Madagascar y otros lugares, no solo se ha recopilado información acerca de los linajes de dinosaurios próximos a las aves, sino también de muchas aves del Jurásico y del Cretácico. Además, se han encontrado numerosos fósiles de terópodos con presencia de plumaje en diferentes estados de desarrollo estructural con respecto a lo que conocemos en las aves actuales, como en el caso del *Caudipteryx*, organismo que presentaba en la cola unas plumas con estructura vexilar. Este hallazgo ha causado gran discusión en cuanto a su clasificación, ya que hay quienes lo catalogan como ave del grupo *Enantiornithes* (Feduccia, 1999), mientras que para otros es un dinosaurio Oviraptórido (Chiappe y Dyke, 2002). Existe también el registro de *Dilong paradoxus*, un dinosaurio Tyranosáurido con proto-plumaje, hallado recientemente en China (Xu et. ál., 2004).

Tanto si se las ubica en un grupo como en otro, los análisis comparativos han revelado que muchas características que se consideran exclusivas de las aves a nivel esquelético, se encontraban ya en los dinosaurios maniraptores.

Otros datos paleontológicos importantes tienen que ver con la estructura de los huevos en los dinosaurios terópodos, se han encontrado vestigios de nidadas y, en algunos casos de preservación excepcional, huevos que en su interior contienen restos embrionarios y cuya cáscara presenta capas presentes solo en aves y dinosaurios maniraptóridos, como en los Oviraptóridos, los Troodontidos y los Dromaeosáuridos (Norell *et. ál.*, 2001). Igualmente, se han hallado varios fósiles de estos dinosaurios en posición de empollamiento, lo cual puede llevar a ciertas suposiciones, como acerca del rol del cuidado parental en estos organismos o la regulación térmica de la nidada. Considerando este último aspecto, creemos osado proponer algo con respecto a un comportamiento deducido, ya que muchas características de tipo etológico pueden ser análogas y no necesariamente homólogas.

El *Archaeopteryx lithographica* y la evolución del vuelo

Hace más de cien años el registro fósil de las aves en sí era muy pobre; fuera de los hallazgos del *Archaeopteryx* en Alemania (Marsh, 1881; Christiansen y Bonde, 2004) o del *Herperornis* y el *Ichthyornis* en Estados Unidos, se conocían pocos ejemplares de aves mesozoicas (Marsh, 1881; Chiappe y Dyke, 2002). El *Archaeopteryx* era más antiguo que el *Herperornis* y el *Ichthyornis*, los cuales, por sus características anatómicas, estaban más próximos a las aves actuales. Ello representó un vacío en el conocimiento científico acerca de la historia evolutiva de las aves.

Sin embargo, desde hace veinte años se han realizado numerosos descubrimientos de aves del Mesozoico, es decir, organismos que cohabitaron con los dinosaurios hasta el periodo Cretácico, cuando las aves radiaron adaptativamente y surgieron algunos grupos que persisten hasta hoy, como los anseriformes (patos y gansos) (Kurochkin *et ál.*, 2002). Muchos linajes encontrados, al igual que el del *Archaeopteryx lithographica*, se consideran de aves, pero en ellos, según la evidencia paleontológica, aún quedaban rasgos de su ancestría reptiliana, tales como la presencia de dientes insertados en alveolos; cola constituida por vértebras caudales más largas en relación con la región dorsal; sacro formado por seis vértebras; metatarsos y tres metacarpos libres; articulación de la muñeca flexible con garras en los tres dedos de la extremidad anterior, y vértebras cervicales con conexión o articulación simple cóncava. Sin embargo, a pesar de las anteriores características, el *Archaeopteryx lithographica* poseía una fúrcula, *hallux* oponible (primer dedo del pie, equivalente al dedo gordo del pie en los seres humanos, y que en las aves típicas se halla dirigido hacia atrás y les permite asirse en una rama, por ejemplo), pubis en orientación caudal y plumas; características que tradicionalmente le han concedido el título de ave más antigua (Chiappe y Dyke, 2002).

Aunque es importante considerar que algunos autores alegan que el *Protoavis texensis*, encontrado en un yacimiento del Triásico tardío en Texas, es más antiguo que el *Archaeopteryx lithographica* (Chatterjee, 1997, en Chiappe y Dyke, 2002), en realidad el material fósil de este animal es fragmentario y se ha encontrado muy disperso. Incluso, se dice que ha dado pie a interpretaciones erróneas, por lo que, según muchos autores, no es un representante aviano más antiguo que el *Archaeopteryx lithographica* (Ostrom, 1991; Chiappe, 1998; Sereno, 2000; Witmer, 2001, en Chiappe y Dyke, 2002), del cual se han hallado un total de ocho ejemplares, y una pluma en buen estado de conservación (Mäuser, 1997 y Elzanowski, 2002, en Chiappe y Dyke, 2002). Las grandes preguntas que se plantean los investigadores con respecto a la paleoecología del *Archaeopteryx* se refieren a cuáles fueron sus hábitos. Por ejemplo, si era arborícola y trepaba con sus garras anteriores —ciertos estudios han sugerido que las garras le eran de gran utilidad, no solo para trepar árboles sino para la captura de alimento (Griffiths, 1994)—, como lo hacen actualmente las crías jóvenes del *Opisthocomus hoatzin*, que nacen con una especie de garra en las extremidades anteriores (Chatterjee *et. ál.*, 2003). O sí, por el contrario, el *Archaeopteryx* era de actividad terrestre y cursorial como los maniraptores. Estos aspectos son de gran importancia para esclarecer el origen del vuelo, y conocer si la primera ave del registro fósil presentaba vuelo activo o incipiente, ya que muchas otras aves posteriores al *Archaeopteryx*, y que igualmente datan del Mesozoico, muestran grandes indicios de ser voladoras.

Muchos linajes encontrados, al igual que el del *Archaeopteryx lithographica*, se consideran de aves, pero en ellos, según la evidencia paleontológica, aún quedaban rasgos de su ancestría reptiliana.

Es clave tener en cuenta numerosos estudios en los que se consideran las propiedades aerodinámicas y fuerza sustentadora de las alas del *Archaeopteryx lithographica*, y en los que varios autores coinciden en que era un animal de hábitos terrestres que podría haber llegado a alzar el vuelo corriendo y batiendo las alas (Burgers y Chiappe, 1999). Esto, de igual forma que muchas galliformes de las cuales se han extrapolado considerables datos desde el punto de vista biomecánico, para conocer sus implicaciones en la evolución del vuelo en las aves (Dial, 2003). Cabe anotar que estudios más detallados del plumaje de los ejemplares del *Archaeopteryx*, han mostrado que poseían plumas de vexilo asimétrico, aspecto típico en aves voladoras (Rayner, 2001; Chatterjee y Templin, 2003).

Considerando al *Archaeopteryx* como grupo basal de la clase aves, en el que se lo incluye a él y a todos sus descendientes, los investigadores tienen propuestas en cuanto a la radiación de las aves durante el Cretácico, periodo en el que se considera se presentaron dos grandes ramas en aves: la primera, la taxa Sauriurae, constituida por el *Archaeopteryx*, el *Confuciusornis* (*Confuciusornithidae*) y los *Enantiornithes* (como *Iberomesornis*); estos últimos, un amplio grupo de aves voladoras que se extendió por el mundo durante el Cretácico y que, aunque no tiene representantes actuales debido a su extinción a finales del Mesozoico, se encuentra muy bien representado en el registro fósil; la segunda, la rama *Ornithurae*, en la que se encuentran, entre otras aves cretácicas, el *Hesperornis-Hesperornithiformes* y el *Ichthyornis-Ichthyornithiformes*; este último, linaje que incluye a las aves actuales y que produjo la radiación adaptativa de las aves durante el Terciario (Romer, 1966; Martin, 1983, 1995, en Chiappe y Dyke, 2002; Hou et. ál., 1999, 1996; Cracraft, 2001; Feduccia, 1999, 2006). Lo anterior se ve reforzado por estudios histológicos que demuestran que la estructura ósea de los linajes *Ornithurae*, estudiada a partir de organismos fósiles, es similar a la de las aves actuales, lo cual no sucede con los *Enantiornithes* y los *Confuciusornis*, que presentan otro patrón histológico (Feduccia, 2006; Chinsamy-Turan, 2005).

Se debe considerar que el linaje *Enantiornithes* fue muy importante durante el Cretácico, cerca de veinte especies fósiles se hallaron en diversos lugares, como España —i.e. *Concornis* (Sanz et. ál., 1995, 1996)— y China —i.e. *Protopteryx* (Zhang y Zhou, 2000, en Chiappe y Dyke, 2002)—. Sin embargo, no logró sobrevivir al límite K/T (gran evento de extinción masiva a finales del Cretácico, hace 65 m.a.).

El plumaje y su evolución

Como ya se ha mencionado, el plumaje se constituye como un carácter de diagnóstico por excelencia y se considera exclusivo de la clase aves. Aquí las plumas tienen diferente clasificación según su morfología y ubicación en el cuerpo. Sin embargo, el plumaje del *Archaeopteryx lithographica* estaba totalmente desarrollado y presentaba plumas de vexilo asimétrico, típico de un ave voladora, lo cual implicaría que las estructuras precursoras de la pluma se generarían antes de la aparición del *Archaeopteryx*. Ahora bien, sabemos gracias a la gran cantidad de pruebas fósiles encontradas en diversas regiones del mundo, que muchos linajes de dinosaurios terópodos poseían estructuras filamentosas que, se piensa, fueron antecesoras del plumaje, como en el caso del *Sinosauropteryx* (*Coelosauridae*) y el *Sinornithosaurus* (*Dromaeosauridae*) en China (Padian y Chiappe, 1998). En otros casos, como en el *Caudipteryx*, las plumas estaban constituidas por un raquis con ramificaciones laterales, tanto en la cola a manera de réctices, como en las extremidades anteriores; sin embargo, debido a la relación entre el tamaño del animal y el de estas plumas, no es probable que las usara para volar (Dial, 2003). Se ha encontrado plumaje en diferentes grupos de dinosaurios terópodos, algunos próximos a las aves y otros que se consideran más antiguos a nivel filogenético, como es el caso del *Therizinosaurio Beipiaosaurus*; por ello, algunos autores sostienen que el plumaje puede constituir un carácter plesiomórfico en los terópodos, y autapomórfico para las diversas formas en los diferentes grupos (Xu et. ál., 2004, 2009). Por otro lado, algunos autores piensan que los filamentos encontrados en el *Sinosauropteryx* corresponden a degradaciones de fibras de colágeno y, por lo tanto, no constituyen pruebas de proto-plumaje (Lingham-Soliar et. ál., 2007).

¿Cómo puede originarse una estructura tegumentaria tan compleja como la pluma? Esta es una pregunta que se han hecho muchos investigadores, ya que los antiguos modelos, postulados antes de

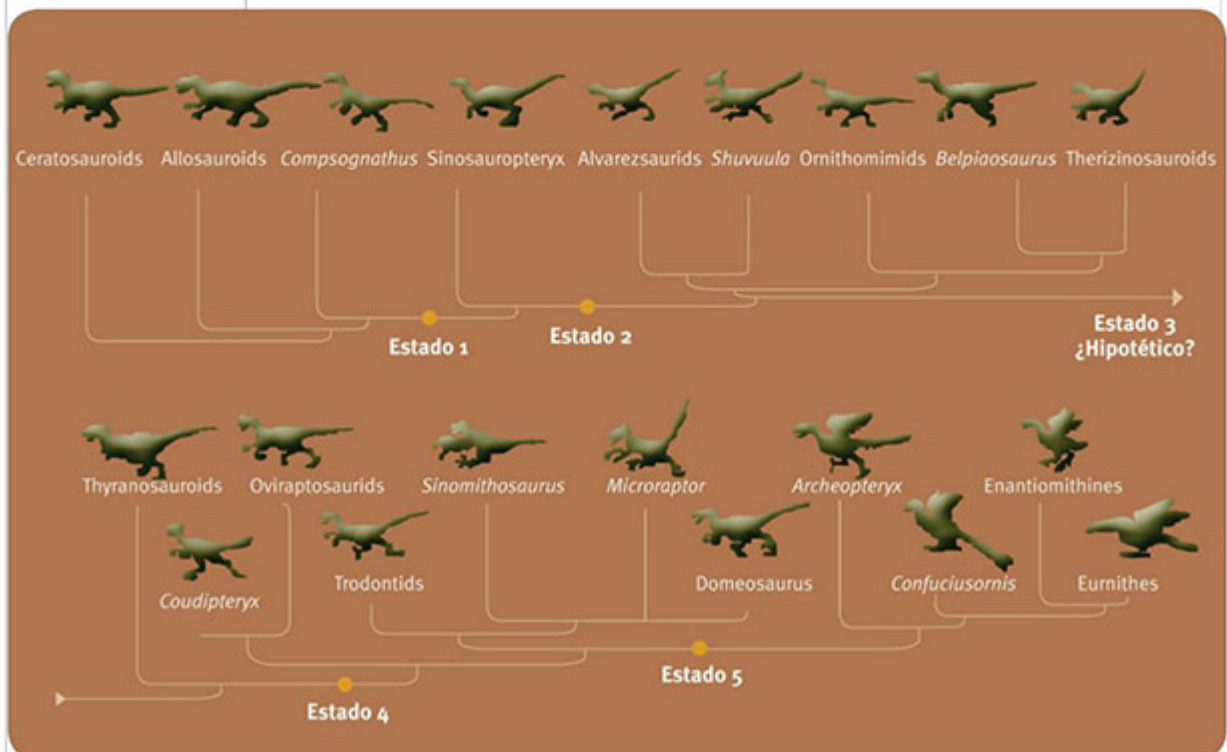
conocer los numerosos hallazgos de dinosaurios emplumados y de diversos representantes avianos del Cretácico, hablaban de un origen del plumaje a partir de una escama reptiliana elongada que, paulatinamente, se fue subdividiendo hasta adquirir la forma de la estructura que conocemos hoy en día. No obstante, esta hipótesis poseía ciertas deficiencias porque requería de muchos pasos intermedios. Además, debemos considerar que estos deben tener un significado en términos de selección y posterior adaptación (Prum 2003, 2005).

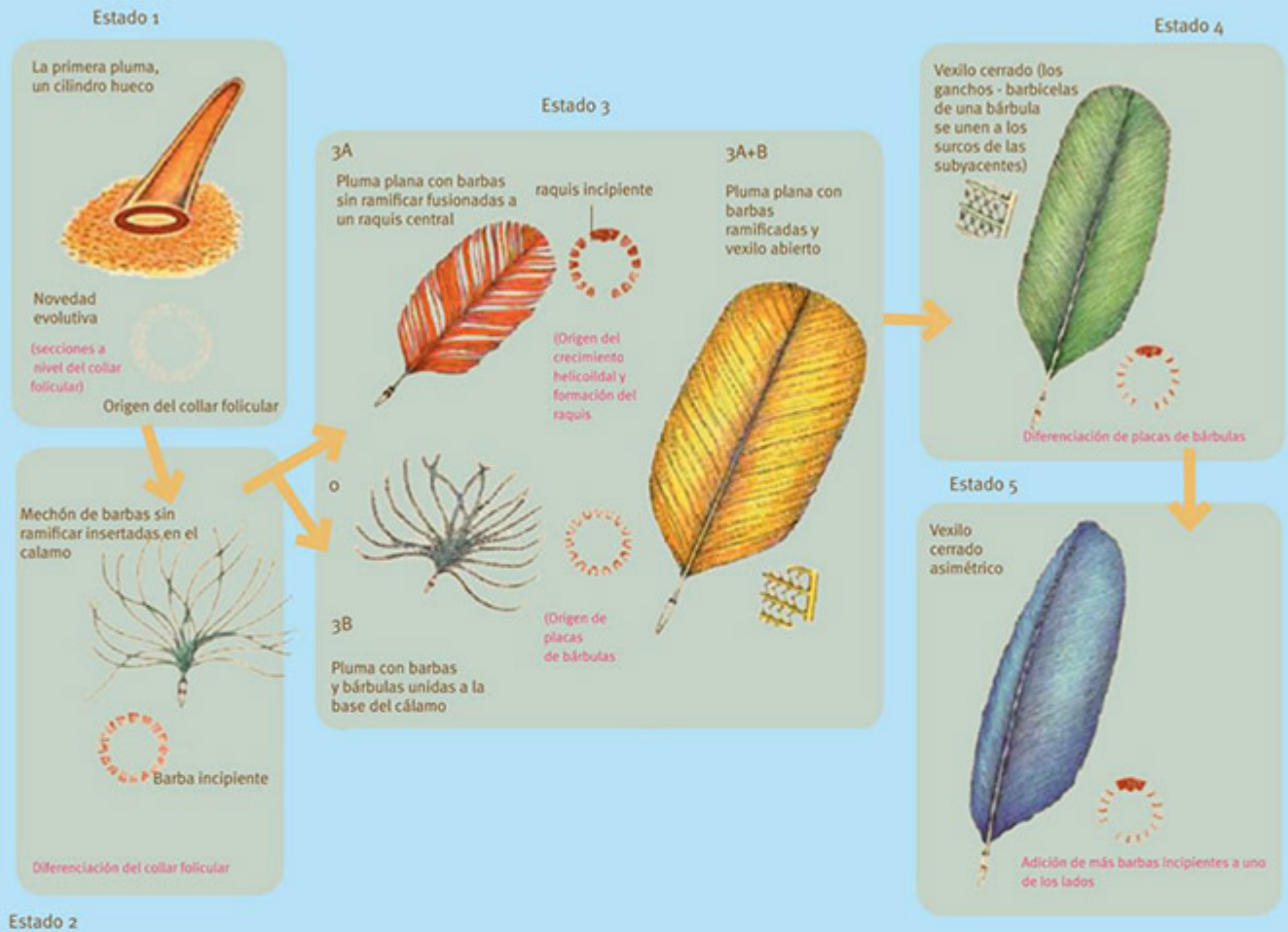
Debido a esto, ahora varias líneas de investigación se centran en estudiar cómo se origina la pluma en las aves actuales, mediante el estudio embrionario. En este se puede observar el proceso de desarrollo de la pluma a partir del tejido epidérmico, en una secuencia de eventos morfogénéticos (Yuet. *dl.*, 2004), donde las células del tegumento expresan un conjunto de genes que codifican la elaboración de la proteína (beta-queratina) típica de la estructura de escamas y plumas, con patrones a nivel molecular comunes para ambas estructuras. Este mecanismo genético se considera plesiomórfico del linaje Archosauria, que actualmente comparten aves y cocodrilos.

En estudios en gallinas con "plumas en las patas" y embriones de pollo (*Gallus gallus*), se ha observado que leves alteraciones genético-moleculares pueden llevar a la formación de una escama o una pluma (Alibardi y Toni, 2008; Sawyer y Kuapp, 2003). Estas investigaciones han propuesto una serie de etapas basadas en los procesos embrionarios para el origen y evolución del plumaje que, a su vez, se corresponden con los estudios de las estructuras encontradas en los fósiles de diferentes dinosaurios

Según Richard Prum y Alan Brush (2003), las plumas evolucionaron por una serie de mecanismos en los que cada paso apareció como una novedad evolutiva (los estados que proponen se resumen en la figura 1). Con respecto a la propuesta según la cual la pluma se origina a partir de una escama, la teoría de Prum y Brush nos parece más plausible; en esta no se requiere de tantos pasos hipotéticos en los que se le asigne una "adaptación hipotética" a cada etapa intermedia, sino que, por el contrario, cada paso o estado se halla respaldado por el registro fósil, por los estudios embrionarios y por la misma estructura del plumaje en las aves actuales, lo cual hace que tenga un mayor soporte experimental. Sin embargo, como todo estudio sobre el pasado, sea biológico o simplemente histórico, siempre existirá un componente de hipótesis y deducción, como lo es en este caso el Estado 3, que deja la puerta abierta a la discusión y a los nuevos hallazgos paleontológicos.

Figura 1.
Estados de plumaje encontrados en diferentes linajes del registro fósil. (Prum y Brush, 2003).






Discusión, conclusiones y preguntas pendientes

En definitiva, la cuestión de la evolución de las aves es una de las más importantes de la biología en general, debido a la gran capacidad de adaptación y dispersión que muestran estos animales en los ecosistemas de todo el planeta. Sin duda alguna, este éxito puede atribuirse en buena medida a la capacidad de vuelo que desarrollaron en algún momento de su historia natural. Ahora bien, en esta revisión hemos pretendido sintetizar las actuales posturas que existen en la comunidad científica frente a dos cuestiones importantes en la evolución de las aves: el vuelo y el plumaje.

Es de recalcar que muchos autores consideran que estos aspectos se deben separar dentro del estudio del origen de las aves. Sin embargo, creemos que la cuestión de cómo evolucionan y logran adquirir un éxito amplio en términos de su radiación adaptativa, se debe analizar teniendo en cuenta todos los aspectos (las condiciones ambientales, las presiones selectivas y las preadaptaciones existentes) y cómo estos interactuaron entre sí. Para nuestro caso, por ejemplo, se debe estudiar cómo el vuelo influyó en el desarrollo de la pluma, ya que este elemento, según las evidencias, apunta a haber sido inicialmente una estructura termorreguladora, de ornamentación y que, posteriormente, se ajustaría a una condición que permitiera el aerodinamismo en los primeros organismos voladores.



Con base en la anterior información, proponemos respuestas a tres preguntas importantes: primero, ¿qué grupo está más emparentado evolutivamente con las aves?; segundo, ¿cómo evoluciona la pluma? y tercero, ¿cómo se presenta el vuelo en el escenario natural?

Con respecto a la primera, consideramos que, según los registros paleontológicos y los diferentes estudios filogenéticos, la teoría del origen de las aves a partir de dinosaurios terópodos tiene considerable evidencia. Y, a pesar de las críticas de las que ha sido objeto, tiene una solidez mayor que las otras explicaciones, gracias a esta evidencia que la respalda, no solo por los estudios de anatomía comparada sino por los de proto-plumas y huevos.

Con respecto a la evolución de la pluma, su desarrollo a partir de una escama reptiliana que se elongó, se fraccionó y paulatinamente se transformó en una pluma, fue una teoría muy aceptada. Sin embargo, hay que considerar que los diferentes pasos hipotéticos que esto implica no se han hallado en el registro fósil. Aunque los autores han dado un significado adaptativo a aquellos pasos, es más fácil considerar lo que nos dice el registro fósil y el desarrollo del plumaje en las aves actuales, según propone la teoría de Prum y Brush (2003). Estamos más de acuerdo con esta propuesta, consideramos que la pluma básica evoluciona a partir de un patrón común que se puede observar en las aves actuales durante su desarrollo y, porque, además, se han hallado diversos fósiles de dinosaurios terópodos con plumas en los estados intermedios que propone dicha tesis (excepto uno), lo que ofrece mayor soporte físico a la teoría. En general, la pluma como estructura, inicialmente en forma de un tubo o cañón hueco, tiene un origen morfogenético similar a la escama; en su primera aparición, habría sido una novedad evolutiva, una preadaptación importante para el linaje en el que surgió, ya que en términos de selección pudo ser ventajosa desde el punto de vista termorregulador y sensorial, de la misma forma que fue el pelaje en los primeros mamíferos. Los posteriores estados aportaron una posibilidad de optimizar la capacidad termorreguladora, incluso de otras adaptaciones importantes como el cortejo sexual que llevaría al dimorfismo, y la conservación de la energía en unos organismos que fueron en su mayoría depredadores y de movimiento activo, lo cual se concluye de su condición bípeda.

Si algo nos ha enseñado la historia evolutiva es que cualquier acontecimiento puede repercutir en la evolución de un grupo. Por lo tanto, habría sido posible que las plumas terminaran su historia en el momento en que solo eran una preadaptación con función termorreguladora, y que desaparecieran con sus portadores, los dinosaurios. Sin embargo, estas estructuras existentes, previas al vuelo y a las propias aves, fueron clave en el desarrollo de lo que hoy conocemos como esta especie. No obstante, no debemos olvidar que el vuelo se presentó igualmente en otros linajes de vertebrados, como los pterosaurios en el Mesozoico y los murciélagos en el Terciario, con lo que podemos evidenciar que el vuelo, desde el punto de vista evolutivo, tal vez no sea una propiedad tan exclusiva en términos de probabilidad. Esto no nos puede llevar a caer en el error de pensar que las primeras plumas fueron una estructura "condicionada" hacia el vuelo, ni nos podemos limitar a pensar que la estructura de la pluma "voladora" es más eficiente que las demás. Seguramente solo en el linaje de las aves la pluma se ajustó al vuelo, mientras que en otros fue probablemente igual de eficiente desempeñando otras funciones. En pocas palabras: el vuelo fue uno de los muchos resultados posibles de la pluma, lo cual nos lleva a la tercera y última discusión: ¿cómo surge el vuelo?

Con respecto a esta pregunta, la enseñanza clásica es que hay dos teorías: la cursorial y la arbórea. Sin embargo, es importante considerar los aspectos centrales de ambas teorías y las implicaciones naturales en torno a ellas. En primer lugar, debemos tener en cuenta que los organismos precursores del vuelo debieron ser pequeños y, en ese sentido, leves, ya que dada esta condición, podían ser objeto de una fuerte presión de depredación por parte de otros dinosaurios carnívoros grandes. Por tanto, es razonable pensar que estos pequeños bípedos se refugiaron en lo alto de los árboles, pero que a la vez bajaran para atrapar su alimento, con lo cual se crea una condición mixta, arbórea-cursorial. No obstante, creemos que la condición arbórea o más bien "de altura" fue clave, ya que, querámoslo o no, las protoaves debieron enfrentarse a una barrera física: la gravedad. Por esta razón, seguramente al principio solo saltaban entre los árboles, pero, posteriormente, las plumas (ya con un velillo) crearían una buena superficie de sustentación para organismos, en este caso, planeadores. Un importante hallazgo

que respalda este punto de vista es el *Microraptor gui* (Prum y Brush, 2003; Zhou, 2004); tenía plumas en ambos pares de extremidades y, ya sea que volase o no, es claro que podía planear. Así como este organismo planeó, seguramente otros lograron dar inicio al vuelo de manera incipiente o por medio de cortas distancias entre árboles, tal y como lo hacen muchas aves hoy en día; la selección favoreció el vuelo debido a que era un mecanismo utilizado por estos pequeños animales para escapar de sus depredadores.

En la historia, el vuelo se ha visto ligado al éxito en la selección natural, lo cual se puede ver en los insectos, los murciélagos y las propias aves, grupos, en general, de alta diversidad. Con el transcurso del tiempo evolutivo, la ocurrencia de diversos eventos contingentes y la constante acción de la selección natural, hicieron que las aves fueran optimizando su capacidad voladora. Esta cualidad adquirió muchas variedades según las formas de vida (como aves grandes que renunciaron al vuelo u otras que desarrollaron estilos muy sofisticados) y, en general, este rasgo fue clave en la gran radiación que tuvieron después de que sus parientes se extinguiesen y heredaran su legado hasta nuestros días.

Referencias

- Alibardi, L. y Toni, M. (2008), "Cytochemical and molecular characteristics of the process of cornification during feather morphogenesis", en *Progress in Histochemistry and Cytochemistry*, No. 43, pp. 1-69.
- Burgers, P. y Chiappe, L. M. (1999), "The wing of Archaeopteryx as a primary thrust generator", en *Nature* 399, pp. 60-61.
- Chatterjee, R. y Templin, J. (2003), "The flight of Archaeopteryx", en *Naturwissenschaften*, No. 90, pp. 27-32.
- Chiappe, L. M. (1995). "The first 85 million years of avian evolution", en *Nature*. N° 378, pp. 349-355.
- Chiappe, L. M. y Dyke, G. (2002), "The Mesozoic radiation of Birds", en *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 33, pp. 91-124.
- Chinsamy-Turan, A. (2005), *The microstructure of dinosaur bone: deciphering biology with fine scale techniques*, John Hopkins University Press.
- Christiansen, P.; Bonde, N. y Palevol, C. R. (2004), "Body plumage" en *Archaeopteryx: a Review, and New Evidence from the Berlin Specimen*, pp. 99-118.
- Clarke, J. A. y Chiappe, L. M. (2001), "A New Carinate Bird from the Late Cretaceous of Patagonia (Argentina)", en *American Museum Novitates* 3323, pp.1-23.
- Craft, J. (2001), "Avian Evolution, Gondwana Biogeography and the Cretaceous-Tertiary Mass Extinction Event", en *Proc. Royal Society London B*, Vol. 268, pp. 459-469.
- Dial, K. P. (2003), "Wing-Assisted Incline Running and the Evolution of Flight", en *Science*, No. 299, pp. 402-404.
- Feduccia, A. (1999), "The Origin and Evolution of Birds", en *Yale Univ. Press*, New Haven, 2nd Ed.
- Feduccia, A. (2006), "Mesozoic Aviary Takes Form", en *PNAS*, Vol. 103, No. 1, pp. 5-6.
- Feduccia, A. y Nowicki, J. (2002), "The Hand of Birds Revealed by Early Ostrich Embryos", en *Naturwissenschaften*, No. 89, pp. 391-393.
- Gauthier, J. A. (1986), "Saurischian Monophyly and the Origin of Birds", en *Mem. Calif. Acad. Sci.* 8, pp. 1-47.
- Galis, F., Kundra, M. y Sinervo, B. (2003), "An Old Controversy Solved: Bird Embryos have Five Fingers", en *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 18, No. 1, pp. 7-9.

International Berckley School
Barranquilla - Colombia
Love, Knowledge, Sports and More...

**ICFES:
MUY SUPERIOR**

25th Anniversary 1985 - 2010

25 AÑOS

Sede Preschool: Calle 96 No. 52C-34
Tels: 3571910 - 3572963 - 3570381
www.berckleyschool.edu.co
E-mail: colegioberckley@hotmail.com
Barranquilla - Colombia

Km. 5 Via al mar Poste 115
Tels: 3548131 - 3548415
Cel: 315-6322385
www.berckleyschool.edu.co
E-mail: colegioberckley@hotmail.com
Barranquilla - Colombia

www.berckleyschool.edu.co

- Hopson, J. A. y Radinsky, L. B. (1980), "Vertebrate Paleontology: New Approaches and New Insights Paleobiology", en *Paleobiology*, Vol. 6, No. 3, pp. 250-270.
- Hou, L., Martin, L., Zhou, Z. y Feduccia, A. (1996), "Early Adaptive Radiation of Birds: Evidence from Fossils from Northeastern China", en *Science*, Vol. 274, pp.1164-1167.
- Hou, L., Martin, L., Zhou, Z., Feduccia, A. y Zhang, F. (1999), "A Diapsid Skull in a New Species of the Primitive Bird *Confuciusornis*", en *Nature*, Vol. 399, pp. 679-682.
- Hwang, S. H., Norell, M. A., Ji, Q., & Gao, K. (2002), "New Specimens of Microraptor zhaoianus (Theropoda: Dromaeosauridae) from Northeastern China", en *American Museum Novitates*, 3381, pp. 1-44.
- Kurochkin, E., Dyke, G. y Karhu, A. (2002), "A New *Presbyornithid* Bird (Aves: Anseriformes) from the Late Cretaceous of Southern Mongolia", en *American Museum Novitates*, No. 3386, pp. 1-11.
- Lingham-Soliar, T., Feduccia, A. & Wang, X. (2007), "A New Chinese Specimen Indicates that 'Protofeathers' in the Early Cretaceous Theropod Dinosaur *Sinosauropteryx* are Degraded Collagen Fibers", en *Proc. Royal. Society London B*, Vol. 274, pp.1823-1829.
- Marsh, O. C. (1881), "Jurassic Birds and Their Allies", en *Science*, Vol. 2, Issue 70, pp. 512-513.
- Norell, M., Clark, J. M. y Chiappe, L. M. (2001), "An Embryonic Oviraptorid Dinosauria: Theropoda from the Upper Cretaceous of Mongolia", en *American Museum Novitates*, No. 3315, p. 17.
- Novacek, M. J. (1999), "100 Million Years of Land Vertebrate Evolution: The Cretaceous-Early Tertiary Transition", en *Annals of the Missouri Botanical Garden*, Vol. 86, No. 2, pp. 230-258.
- Padian, K. y Chiappe, L. M. (1998, febrero), "The Origin of Birds and their Flight", en *Scientific American*, pp. 38-48.
- Pough, F. H., Janis, C. M. y Heiser, J. B. (1999), *Vertebrate Life*, quinta edición, Prentice Hall Inc., New Jersey, Simon & Shuster Inc.
- Prum, R. O. (2003), "Dinosaurs Take to the Air", en *Nature*, Vol. 421, pp. 323-324.
- Prum, R. O y Brush, A. H. (2003, marzo), "Which Came First, the Feather or the Bird?", en *Scientific American*, pp. 83-93.
- Prum R. O. (2005), "Evolution of the Morphological Innovations of Feathers", en *Journal of Experimental Zoology. Part B Molecular and Developmental Evolution*, 304(6), pp. 570-579.
- Rayner, J. M. (1991), "Avian Flight Evolution and the Problem of *Archaeopteryx*", en *Biomechanics in Evolution*, ed. JMV Rayner, RJ Wooton, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. pp. 183-212.
- Richardson, H. (2003), *Dinosaurs and Prehistoric life*, *Smithsonian Handbooks*, Dorling Kindersley Book.
- Romer, A. S. (1966), *Vertebrate Paleontology*, tercera edición, University Chicago Press.
- Sanz, J. L., Chiappe, L. M. y Buscalioni, A. (1995), "The Osteology of *Concornis lacustris* (Aves: Enantiornithes) from the Lower Cretaceous of Spain and a Re-examination of its Phylogenetic Relationships", en *American Museum Novitates*, No. 3133, pp.1-23.
- Sanz, J. L., Chiappe, L. M., Pérez-Moreno, B. P., Buscalioni, A. D. y Moratalla, J. (1996), "A New Lower Cretaceous Bird from Spain: Implications for the Evolution of Flight", en *Nature*, Vol. 382, pp. 442-45.
- Sawyer, R. H. y Knapp, L. W. (2003), "Avian Skin Development and the Evolutionary Origin of Feathers", en *Journal of Experimental Zoology. Part B Molecular and Developmental Evolution*, 298(1), pp. 57-72.
- Thomas, A. L y Garner, J. P. (1998), "Are Birds Dinosaurs?", en *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 13, No. 4, pp. 303-304.
- Turner, A. H., Pol, D., Clarke, J. A., Erickson, G. M. y Norell, M. A. (2007), "A Basal Dromaeosaurid and Size Evolution Preceding Avian Flight", en *Science*, Vol. 317, pp. 1378-1381.
- Xu, X., Zheng, X. y You, H. (2009) "A New Feather Type in a Nonavian Theropod and the Early Evolution of Feathers", en *PNAS*, Vol. 106, No. 3, pp. 832-834.
- Xu, X., Norell, M. A., Kuang, X., Wang, X., Zhao, Q. y Jia, C. (2004), "Basal Tyrannosauroids from China and Evidence for Protofeathers in *Tyrannosauroids*", en *Nature*, Vol. 431, pp. 680-684.
- Yu, M., Yue, Z., Ping, W., Wu, Da-Y., Mayer, J., Medina, M., Widelitz, R. B., Jiang, Ting-X. y Chuong Cheng, M. (2004), "The Developmental Biology of Feather Follicles", en *Int. Journal of Development Biology*, Vol. 48, pp. 181-191.
- Zhou, Z. (2004), "The Origin and Early Evolution of Birds: Discoveries, Disputes, and Perspectives from Fossil Evidence", en *Naturwissenschaften*, Vol. 91, pp. 455-471.

LOS TÚNELES DEL MUNDO CUÁNTICO

LUCERO ÁLVAREZ MINO

MSc. EN CIENCIAS FÍSICAS

PROFESORA ASOCIADA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y QUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL, MANIZALES, COLOMBIA

LALVAREZM@UNAL.EDU.CO

pele_bilogos@yahoo.es

Figura 1.

La autora junto a un cabezal de una perforadora TBM (de ocho metros de diámetro aproximadamente).



Resumen

La mecánica cuántica descubrió nuevos comportamientos de las partículas, propios de las ondas que, por un lado, han dado origen al entendimiento de diversos fenómenos de la naturaleza y, por otro, han abierto las puertas al desarrollo de nuevas tecnologías. Entre estas capacidades ondulatorias de las partículas se encuentra el llamado "efecto túnel", base del funcionamiento de diversos dispositivos como, por ejemplo, el del microscopio de barrido por "tunelamiento cuántico" (STM, por sus siglas en inglés).

La construcción de puentes y túneles para remontar o eludir accidentes geográficos ha involucrado el desarrollo, en ingeniería civil, de nuevas tecnologías. Por ejemplo, tenemos las TBM (Tunnel Boring Machine) o máquinas que abren túneles de tamaños colosales que desbordan la imaginación. Con seguridad muchos de nosotros hemos escuchado el término "efecto túnel", que se refiere a cuando las partículas son capaces de viajar desde una región del espacio a otra, como si existiera un túnel. De inmediato surge la pregunta, ¿por qué no observamos este fenómeno en nuestra vida cotidiana? ¿No sería grandioso? Como veremos a continuación, hay que tener cuidado cuando se hace una comparación entre el comportamiento de los objetos macro y el de las partículas subatómicas.

Introducción: un poco de historia cuántica

El surgimiento de la teoría cuántica se remonta a comienzos del siglo XX, y se debió a la imposibilidad que la física tenía en ese momento para explicar algunos fenómenos de interacción de la luz con la materia, como el efecto fotoeléctrico. En este efecto, los electrones de un metal son arrancados del mismo mediante la irradiación de luz. La coincidencia entre los resultados experimentales y la teoría solo se logró cuando se asumió que la luz se comporta como un conjunto de partículas llamadas fotones. A estas se les puede asignar una velocidad V relacionada con su longitud de onda λ , a través de la relación de De Broglie $mv=h/\lambda$, donde m es la masa de la partícula y h es la constante de Planck ($h=6.457 \times 10^{-27}$ erg.s). Más aún, esta relación se hace extensiva a todas las micropartículas, como las subatómicas y los átomos. Pero, un momento... hemos dicho que según la relación de De Broglie las partículas tienen velocidad, lo cual no suena para nada extraño, pero también hablamos de longitud de onda de la misma partícula, ¿cómo es posible este juego de palabras? Precisamente uno de los fundamentos de la mecánica cuántica, también llamada en sus orígenes mecánica ondulatoria, es que para explicar los fenómenos a escala subatómica es necesario reconocer que las partículas, la materia, pueden presentar propiedades o comportamientos propios de las ondas. Es decir, aceptar que si las ondas pueden revelar propiedades corpusculares, como en el efecto fotoeléctrico, las partículas también manifiestan propiedades ondulatorias. Sin embargo, así como es cierto que no todas las veces las ondas muestran su lado corpuscular, es cierto que no siempre las partículas exponen su cara ondulatoria. En la siguiente sección exponemos bajo qué condiciones las partículas se comportan como ondas.

Las partículas como ondas

Analicemos la relación de De Broglie, $mv=h/\lambda$. Como se observa, del lado izquierdo tenemos propiedades corpusculares y, del lado derecho, ondulatorias; además, esta relación nos muestra que, controlando la velocidad de la partícula, podemos asignarle una determinada longitud de onda. Así, por ejemplo, un electrón en un microscopio electrónico de barrido que es acelerado por un potencial de alrededor de 20keV, tendrá una longitud de onda correspondiente a 9×10^{-3} nm (Álvarez, 2007). De hecho, el experimento que reveló la naturaleza ondulatoria de un haz de electrones fue el de la difracción de los mismos cuando se les hacía incidir sobre una placa de níquel. La difracción de ondas consiste en la posibilidad que estas tienen de bordear los obstáculos, a diferencia de las partículas que, al chocar con uno, rebotan. Las ondas también pueden bordear rendijas, y si se tienen varias rendijas es posible provocar tanto la interferencia de ondas que se presenta cuando en un punto coinciden varias, como una onda resultante que simplemente es la suma de todas las coincidentes.

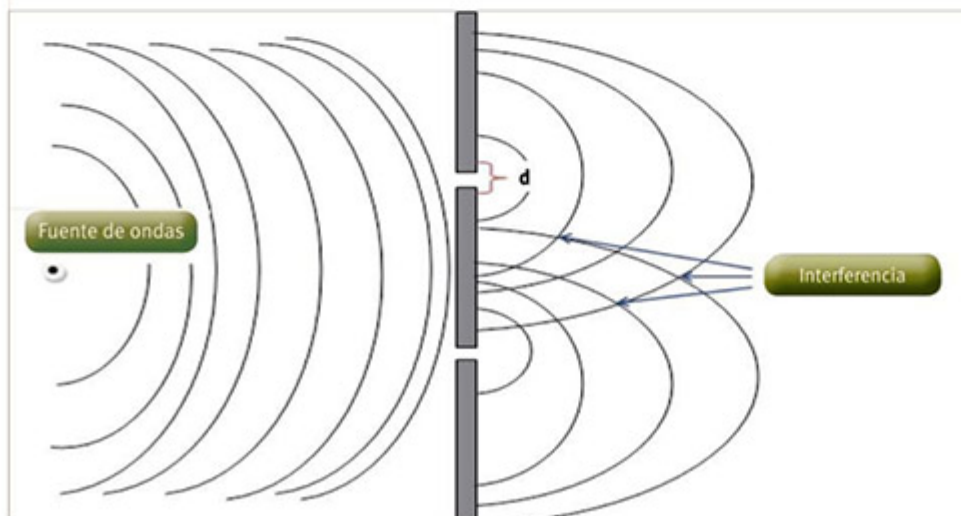



Figura 2.

Una onda (puede ser luminosa) se propaga desde una fuente e incide sobre dos rendijas de tamaño $d \sim \lambda$, donde λ es la longitud de onda. Después de pasar por las dos aberturas que actúan a su vez como fuentes de ondas, estas últimas se difractan e interfieren (con flechas se indican algunos puntos donde ocurre la interferencia).



Dicho en otras palabras, las ondas se refuerzan o se anulan, ya sea total o parcialmente, en dicho punto del espacio. Volviendo al experimento con electrones, los físicos Davisson y Germer se encargaron de acelerarlos con un potencial de 100 eV, en cuyo caso la longitud de onda de los electrones que se obtiene, haciendo uso de la relación de De Broglie, es del orden de 1 amstrong. Resulta que la distancia entre los átomos en los sólidos, como en el caso de la placa de níquel, es precisamente del orden de 1 amstrong. Gracias a la óptica ondulatoria, ya se sabía que para la observación de la difracción y de la interferencia, es necesario hacer incidir la onda sobre rendijas cuyos tamaños sean cercanos a la longitud de onda de la onda. Davisson y Germer, controlando la velocidad del haz de electrones, lograron que estos adquirieran una λ del orden de la distancia interatómica y, por tanto, observaron la interferencia de electrones. Así se estableció que estos pueden interferir igual que las ondas de luz.

Entonces, se puede concluir que para que un electrón se comporte como onda, su longitud de onda debe ser comparable con el tamaño del dispositivo con el cual se le hace interactuar. En el experimento de Davisson y Germer este dispositivo era la red cristalina del níquel. Otro criterio resulta de la comparación de la longitud de onda de la partícula con su propio tamaño. Si la λ de la partícula resulta ser mucho menor que el tamaño de la misma, no es probable que se observen fenómenos cuánticos como la interferencia. Por ejemplo, a una partícula de polvo de 1 mg de masa y una velocidad de 1 micrómetro/segundo, le corresponderá una longitud de onda de aproximadamente 6×10^{-29} cm (recordemos que el exponente negativo significa que antes del seis hay que agregar 20 ceros), mucho más pequeña que el propio tamaño de la partícula de polvo.

Si no se cumple ninguno de los dos criterios expuestos anteriormente, al electrón o a la partícula en cuestión los podemos tratar como una esfera sólida de billar. Una de las razones por las cuales los objetos a nivel macroscópico no presentan fenómenos ondulatorios, es que sus tamaños son muchas veces mayores que sus longitudes de onda de De Broglie, que a su vez resultan ser muy pequeñas debido a las grandes masas de los objetos de la vida cotidiana.

Como ya se ha dicho, un fenómeno ondulatorio, o que caracteriza a las ondas, es la interferencia. Otra manera de entender esta propiedad es considerar que cuando pensamos en cómo se propaga una onda (el sonido, por ejemplo), no tenemos en cuenta que está localizada, sino que se distribuye por todo el espacio mientras un objeto ocupa una región definida de este. El hecho de que las ondas se propaguen, “se muevan” por “todas partes”, permite que puedan doblar obstáculos, es decir, que presenten difracción, fenómeno al que ya nos hemos referido. Además de la posibilidad de interferir, cuando los electrones se comportan como ondas, también pueden realizar otros trucos, entre los cuales se encuentra el “efecto túnel”.

“Tunelando”

Para entender en qué consiste este fenómeno de la mecánica cuántica, tomemos específicamente el Microscopio de Tunelamiento Cuántico (STM por sus siglas en inglés), compuesto por una punta que se desplaza sobre una muestra, de tal modo que entre esta y la punta existe una pequeña separación (unos cuantos nanómetros) (Álvarez, 1999). He aquí nuestra barrera que, realmente, es energética; los electrones de la muestra no la pueden abandonar, pues no poseen la energía suficiente para hacerlo. Se podría pensar en varios métodos para proporcionarles a los electrones la energía que les hace falta para pasar de la muestra a la punta, como por calentamiento, pero, existe otra posibilidad. Si entre la punta y la muestra se aplica un voltaje es posible que, aun cuando los electrones no tengan la energía suficiente para dejar la muestra, se establezca corriente entre esta y la punta. El esquema de la energía que presentan los electrones se ve en la figura 3.

Cuando se aplica el voltaje entre muestra y punta, la forma de la barrera energética cambia, se hace triangular, y esto aumenta la probabilidad de los electrones de dejar la primera y correr hacia la segunda. Pero recordemos que la esencia del asunto está en que los electrones no tienen que adquirir más energía para sobrepasar un cierto valor umbral, sino que el “efecto túnel” se basa en aumentar la posibilidad de que el electrón atraviese “como por entre un túnel” la barrera, por ejemplo, cambiando

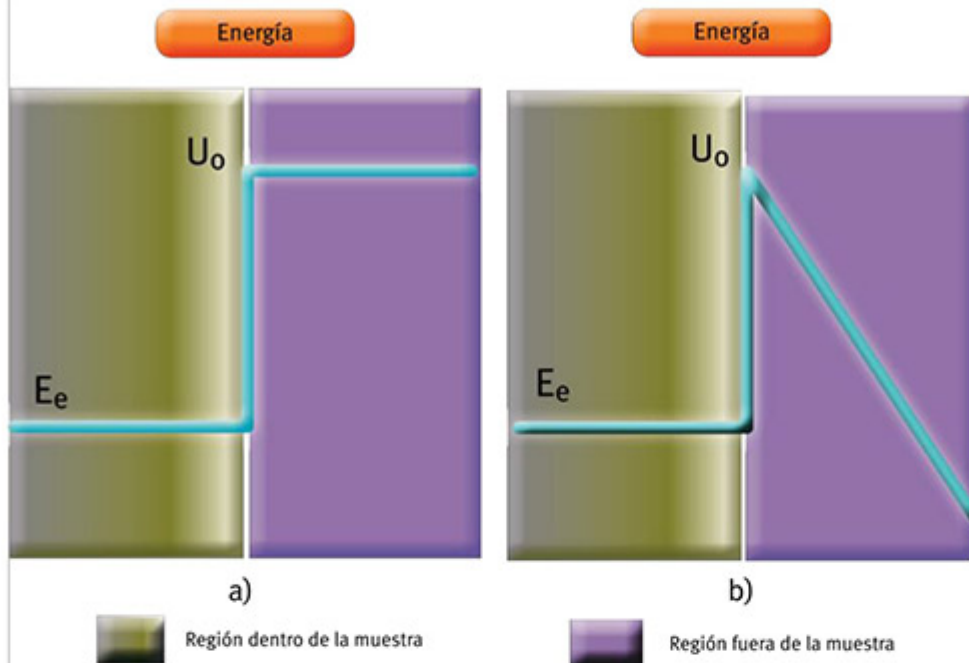


Figura 3.

a) Perfil de energía que "observa" un electrón en una muestra metálica. El electrón posee una energía E_e representada por la línea horizontal respectiva. U_0 es la altura de la barrera.

b) Después de aplicar un voltaje, la barrera cambia de forma, haciéndose triangular. Esto facilitará el "efecto túnel" por parte del electrón. El eje vertical representa la energía y el eje horizontal, la posición.

la forma de la misma. En el lenguaje cuántico las certezas sobre los hechos son reemplazadas por las probabilidades. En el caso del STM, la posibilidad de que se establezca una "corriente túnel" aumenta incrementando el voltaje entre punta y muestra, o disminuyendo la distancia entre las mismas. La expectativa misma de que las partículas "pasen por el túnel" se debe al aspecto que comentamos en la sección anterior, es decir, a que aquellas que son subatómicas pueden manifestar plenamente sus propiedades ondulatorias. Para entender mejor este punto, vale la pena referirse a la reflexión y a la refracción (doblez de los rayos) de la luz cuando pasa de un medio a otro, para compararlas con el caso del STM cuando los electrones deben ir de la muestra al aire y, finalmente, alcanzar la punta.

Cuando la luz o, en general, las ondas electromagnéticas se propagan de un medio más denso a uno de menor densidad (por ejemplo, el agua para la luz es un medio más denso que el aire pues viaja con una velocidad más pequeña en el primero que en el segundo), dependiendo del ángulo con que la onda llegue a la superficie que separa los dos medios, puede ocurrir que la luz no escape en lo absoluto del medio más denso, es decir, solo se reflejará pero no pasará al otro medio, no se refractará. Esto se conoce como reflexión interna total y es el principio básico de la fibra óptica. Otra manera de explicar este fenómeno es decir que en el medio menos denso se propaga una onda cuya amplitud decae muy rápidamente y se desvanece (Merzbaucher, 2002). En términos técnicos, la onda, o mejor su amplitud se desvanece exponencialmente. Esto es justo lo que le ocurre a la onda de materia de una micropartícula cuando atraviesa "por entre un túnel" una barrera cuya altura, medida en unidades de energía, es mayor que la energía de la partícula. Son las propiedades ondulatorias de las micropartículas las que permiten la realización del "efecto túnel".

Para complementar esta descripción del "efecto túnel" vale la pena traer a colación un personaje llamado señor Tompkins, una creación del físico de origen ruso, George Gamov (1985). El señor Tompkins es un empleado bancario a quien le interesa la física. En uno de sus tantos sueños se encuentra con un carpintero del mundo cuántico que le explica el "efecto túnel" a partir de un volcán y una esfera cuántica. Se esperaría que la única manera de que la esfera pueda introducirse dentro del volcán, es imprimiéndole una velocidad inicial tal que, deslizándose hacia arriba por la falda del volcán alcance y caiga dentro del cráter de este. Sin embargo, para sorpresa del señor Tompkins, en uno de varios intentos que realiza el carpintero, la esfera llega hasta media falda y, de manera súbita, aparece dentro del volcán. Es decir que la esfera tiene la capacidad de "tunear" porque es cuántica. Pero no abandonemos al señor Tompkins sin antes referirnos a una pregunta que surge de inmediato, después de la historia del carpintero del mundo cuántico: ¿Por qué no observamos el "efecto túnel" en nuestra vida

cotidiana? Ya habíamos dicho que en el trajinar del día a día los objetos son demasiado masivos, de modo que la correspondiente longitud de onda es muy pequeña. En el caso de la probabilidad de tunelamiento, la masa también está involucrada y, para objetos del macromundo, esta probabilidad simplemente se hace demasiado pequeña, prácticamente nula. Por eso, cuando el señor Tompkins inquiere al profesor de física, quien despeja siempre todas sus dudas, sobre la posibilidad de que un carro que se encuentra en el garaje de una casa pase al interior de la misma por puro "efecto túnel", la respuesta del profesor es que para ello se necesitarían millones de millones de millones de años. No solo es la masa la que hace tan pequeña la probabilidad de semejante tunelamiento, es también lo mínima que es la constante de Planck h . En medio de estos cuestionamientos, el señor Tompkins también aprende que, si en nuestro universo la constante de Planck tuviera un valor de alrededor de una unidad, simples bolas de billar ya presentarían fenómenos de interferencia y de tunelamiento, y podrían abandonar fácilmente zonas donde estén encerradas.

Precisamente, confinar portadores de carga como los electrones se ha convertido en una línea de desarrollo de dispositivos electrónicos, que busca aprovechar el "efecto túnel". Entre los dispositivos de confinamiento más conocidos están las heteroestructuras o junturas conformadas por tres capas de materiales distintos, fabricadas una sobre otra, de manera que la capa del medio actúa como barrera. Si las cargas tienen que pasar de la primera capa a la última, deberán hacerlo por "efecto túnel" (en el caso ideal, cuando no existan defectos en la capa intermedia que ofrezca otros caminos más fáciles para las cargas). A continuación, revisaremos junturas en las cuales se presentan efectos de tunelamiento.

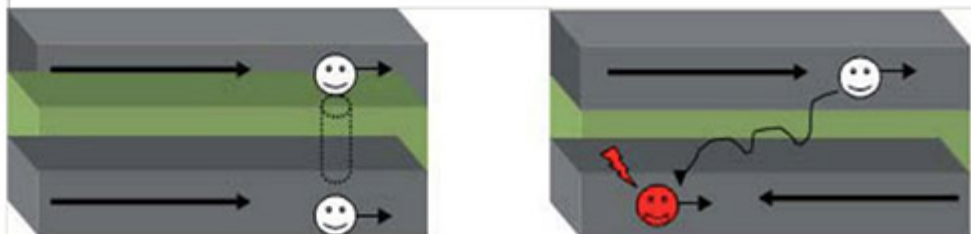
El "efecto túnel" en acción

Figura 4.

Esquema de una heteroestructura magnética conformada por una capa de cromo entre dos electrodos de hierro. Las flechas grandes indican la orientación de la magnetización (campo magnético) en las capas de hierro. En el caso de que las magnetizaciones sean paralelas (izquierda), los electrones, cuyo espín está representado por la flecha pequeña, podrán realizar el "efecto túnel" sin mayor inconveniente y con baja resistencia. En caso contrario (derecha), la resistencia al paso de corriente será significativamente alta.

En el año 2007 el premio Nobel de Física fue otorgado a los investigadores Albert Fert de Francia y Peter Grünberg de Alemania, por el descubrimiento de un fenómeno conocido como magnetorresistencia gigante. En este caso el dispositivo consta de una capa intermedia metálica de cromo que se halla entre dos capas de hierro, los electrodos. Mientras el hierro se magnetiza fácilmente, el cromo no. Electrones de una de las capas de hierro pueden atravesar la barrera de cromo por "efecto túnel" y llegar a la otra capa de hierro. Sin embargo, lo interesante en este tipo de dispositivo es que lo que determina que los electrones fluyan de uno a otro electrodo, con menor o mayor facilidad, es la orientación relativa de la magnetización de los electrodos. Así, cuando las dos capas de hierro se magnetizan de manera que las correspondientes magnetizaciones están en la misma dirección, el flujo de corriente será facilitado o, en otras palabras, la resistencia a la corriente será baja. En caso contrario, el paso de uno a otro electrodo se dificultará o, lo que es lo mismo, la resistencia aumentará. Como la resistencia del dispositivo depende de la orientación relativa de la magnetización de los electrodos, que puede variar por la acción de un campo magnético externo, se habla de magnetorresistencia. Este fenómeno encontró aplicación inmediata en los cabezales de lectura de los discos duros de los computadores actuales. El fenómeno es cuántico porque el espesor de las capas es de solo unos nanómetros, de manera que los electrones puedan desplegar sus propiedades ondulatorias. Pero, además, se basa en una propiedad netamente cuántica de los electrones que es el espín (véase figura 4).

En este contexto, el espín se puede entender como la aguja magnética de cada electrón y, gracias a esto, los dos electrodos tienen sus campos orientados en la misma dirección. Los electrones provenien-



tes de una capa son aceptados por la otra, mientras que en el caso extremo, cuando son antiparalelos, los electrones de un electrodo no son aceptados. En el lenguaje de la física lo que ocurre es que aquellos sufren dispersión en el segundo electrodo, conllevando al aumento de la resistencia del dispositivo o junta. Entonces, cuando la resistencia es muy grande (la máxima posible), se puede decir que el dispositivo se encuentra en el estado "1", mientras que cuando la resistencia es la menor, el dispositivo está en el estado "0".

Otro ejemplo de juntas que presentan "efecto túnel" son las llamadas juntas Josephson, formadas por dos electrodos superconductores separados, bien sea por un aislante o un metal. Un superconductor es un material que cuando se enfría, pierde toda resistencia al paso de corriente eléctrica y expulsa cualquier campo magnético. El espesor de la barrera aislante puede ser de unos cuantos nanómetros en el caso de aislantes, y de algunas micras cuando se trata de metales. Lo interesante es que en estos dispositivos los que "tunean" no son solamente electrones individuales, sino parejas de electrones. Por su carácter superconductor y por el "efecto túnel", las juntas Josephson presentan, por un lado, una corriente de tunelamiento de pares de electrones sin que exista ningún voltaje (¡corriente sin voltaje!) y, por otro lado, pueden presentar un voltaje que varía con el tiempo de manera periódica. Este último fenómeno permite la fabricación de un instrumento llamado Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica (SQUID, por sus siglas en inglés), que permite detectar campos magnéticos tan pequeños del orden de 10^{-10} - 10^{-11} Gauss (Schmidt, 1982) (recordemos que el campo magnético terrestre es de 0,3-0,6 Gauss).

El "efecto túnel", además de explicar fenómenos de la naturaleza como la emisión de partículas por parte de átomos radioactivos, también abre otras posibilidades en el desarrollo de nuevos dispositivos, en los cuales las micropartículas puedan desplegar sus propiedades ondulatorias y permitir que nos sigamos asombrando de cuán compleja y rica es la naturaleza.

Referencias

- Álvarez M., L. (2007), "Dibujando con electrones", en revista *Innovación y Ciencia*, Vol. XIV, No. 2.
- _____, (1999, marzo), "El efecto túnel y su aplicación más importante: el microscopio de tunelamiento cuántico", en revista *NOOS*, No. 8.
- Gamov, G. (1985), *El breviarío del señor Tompkins: el país de las maravillas y la investigación del átomo*, Fondo de Cultura Económica, España.
- Merzbaucher, E. (2002), "The Early History of Quantum Tunneling", en *Physics Today*, Vol. 55, Issue 8, pp. 44-50.
- Schmidt, V. V. (1982), *Vvdenje v fiziku sverhprovodnikov*, Ed. Nauka, Moscú.

¿DIFICULTADES CON SU HIJO?

Hiperactividad - Impulsividad - Distráido - Desorganizado - Problemas de Atención - Problemas de Aprendizaje - Problemas de Comportamiento escolar y social - Ansiedad - Depresión - Negativista desafiante - No acata ordenes.

Si presenta algunos de estos problemas; probablemente necesita de una intervención oportuna para prevenir secuelas a futuro irremediables.

INEA, especializado en Colombia en atención a niños, jóvenes y adultos, en Neuropsicología, Neuropediatría, Psicología, Fonoaudiología, Terapia Ocupacional y Psiquiatría.



VALORACIÓN Y TRATAMIENTO INTEGRAL AVANZADO

Calle 108 No. 14 - 22 Bogotá - PBX: 600 78 52
TELÉFONO: 600 77 80 - Cel: 310 556 94 61
www.institutodeneurociencias.com



INEA
INSTITUTO
DE NEUROCIENCIAS
APLICADAS

La interfase hombre-máquina en la inteligencia artificial y la robótica evolutiva

**ÁLVARO HERNANDO
RAMÍREZ LLINÁS**

PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO DEL
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA.
DIRECTOR DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Y NANOTECNOLOGÍA DEL GRUPO DE
INVESTIGACIÓN EN MATERIALES, PROCESOS
Y TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN (IMTEF)
DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA,
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE,
BARRANQUILLA, COLOMBIA

aramirez@uac.edu.co

Un evento único con implicaciones singulares.

(Neumann, 1960)

Resumen

Nos encontramos en el umbral del evento de mayor transformación en la historia de la humanidad: la singularidad.

La singularidad es un periodo en el futuro mediano, cuyo ritmo de cambio tecnológico será tan acelerado que la existencia humana sobre el planeta se verá inexorablemente alterada; llegaremos a combinar las fortalezas del cerebro que nos hacen humanos (conocimiento, comportamiento, personalidad), con las de las máquinas inteligentes.

Esta unión entre hombre e inteligencia artificial, mezclada con la rápida innovación en campos como la genética y la nanotecnología, tendrá como resultado una situación en la cual no habrá distinción entre lo biológico y lo mecánico, o entre el mundo físico y la realidad virtual. Ello no significa que se perderá la identidad humana, más bien se dispondrá del avance tecnológico para quienes opten por la inserción de implantes en su organismo, con el fin de potenciar algunas de sus capacidades, o entren a compartir su existencia, a voluntad, en el mundo virtual.


La Inteligencia Artificial Emergente

El acercamiento clásico a la adquisición del conocimiento y el razonamiento en la Inteligencia Artificial (IA), se concentran en programar los hechos y las reglas dentro de la máquina. Pero, desafortunadamente, el tiempo requerido para programar el equivalente a la inteligencia humana es desproporcionadamente largo, en caso de que se alcance algún día.

La alternativa es permitir que un autómata aprenda a resolver problemas por medio de interacciones iterativas con su entorno, basadas en prueba y error, tal como lo hacemos los seres humanos. Para resolver un problema con respecto a su alrededor, el autómata genera una secuencia de posibles soluciones basadas en su experiencia, a la vez que el entorno evalúa la efectividad de sus respuestas y le reporta una evaluación. El autómata, entonces, modifica su estrategia y genera un nuevo grupo de respuestas; el proceso se repite hasta que aquel llega a la solución correcta.

Esta capacidad es la que asociamos con la inteligencia humana. Si aceptamos que nuestro cerebro es tanto el hogar de esas cualidades, como una máquina finita, por supuesto, muy compleja, llegaremos entonces a la ineludible conclusión de que podríamos ser capaces de replicarla con un número finito de componentes y en un lapso de tiempo, igualmente finito. Obviamente, una gran cantidad de personas insiste en que es presuntuoso asumir que nosotros, seres limitados, podamos duplicar la magia infinita de nuestros cerebros. Pero, ¿son nuestras capacidades humanas limitadas o ilimitadas? Más presuntuoso es afirmar que nuestro cerebro posee capacidades infinitas.

Los neurofisiólogos aseguran que nuestro cerebro y nuestro sistema nervioso central poseen, aproximadamente, 10^{11} procesadores en paralelo, llamados neuronas, y que cada neurona está en capacidad de almacenar cerca de 10^4 bits de información. Dicho proceso de almacenamiento, según parece, no ocurre en la neurona como tal, sino que es producto de la fuerza y dirección de las comunicaciones interneuronales, es decir, de las sinapsis o conexiones entre ellas que se dan gracias a los neurotransmisores.



Entonces, la capacidad del cerebro es de 10^{55} bits (Sagan, 1977), pero, si tenemos en cuenta el incremento exponencial en la velocidad de los microprocesadores y su capacidad de procesamiento según la Ley de Moore (Moore, 1965), para cerca del año 2030 tendríamos en las máquinas la misma capacidad cerebral con respecto al *hardware*. Esto, si aplicásemos la Ley de Moore indefinidamente en el tiempo, lo cual puede verse truncado por los límites de la superminiaturización al llegar a trabajar con las partículas subatómicas y sus correspondientes leyes cuánticas. No obstante, en caso de que ese límite se presentara, quizá continuaríamos con la computación molecular mediante componentes biológicos como enzimas y proteínas; computación que en la actualidad ya ha tenido resultados positivos en cómputos sencillos.

Pero en el caso del *software*, si asumimos que una línea promedio de código tiene más o menos 60 caracteres o 500 bits, podríamos darnos cuenta de que el proyecto de un programa de 10^{55} bits requeriría 100.000.000 de años/persona. Aunque modifiquemos las cifras drásticamente, con los tiempos resultantes se hace imposible transferir la arquitectura lógica y física del cerebro, además de las experiencias y conocimientos, a una inteligencia no humana.

¿Qué otra opción existe? Puede ser la transferencia directa de la información: situar electrodos en nuestro cerebro (de manera no invasiva) para transmitir la información por buses de alta velocidad a la máquina. Sin embargo, esto por ahora es ficción. Entonces ¿qué alternativa queda? La inteligencia y el conocimiento se adquieren cada día; diariamente nacen niños, crecen y asimilan nuevas cosas. El conocimiento se adquiere aprendiendo.

Si asumimos que nuestros ojos, la mayor fuente sensorial de nuestro organismo, reciben información a un ritmo aproximado de 250.000 bits por segundo, podríamos llenar la capacidad de memoria de nuestra máquina en más o menos 20 años. Quizá lo que debemos hacer es conectar el cerebro de nuestra máquina a muchos sensores de datos, dotarlo con un algoritmo relativamente sencillo de autoorganización, proveerlo con una continua y variada fuente de estímulos y evaluaciones y lograr que aprenda. Sin embargo, una emulación de la cognición requiere la construcción de un autómatas que utilice el mismo algoritmo para resolver un problema tal y como lo hace un organismo vivo.

La arquitectura forma parte integral de los agentes inteligentes y los robots. Organiza y estructura el conocimiento utilizado por el agente para evaluar acciones en sistemas dinámicos, planear y resolver problemas, y aprender y lograr cooperación con los demás agentes.

Los computadores en la actualidad

Como hemos visto, es bastante difícil no solo compartir la información entre dos seres humanos, sino pasarla de una persona a otro tipo de inteligencia, esto, porque no poseemos la capacidad de intercambiar los vastos patrones de comunicaciones interneuronales y de neurotransmisores que comprende nuestro aprendizaje y, por ende, transferir el conocimiento de forma eficiente. En contraposición, vemos cómo actualmente las máquinas pueden compartir su información y conocimiento con otras, de forma casi transparente.

Hoy en día los computadores realizan imágenes electrocardiográficas y médicas, despegan, vuelan y aterrizan aviones, controlan las decisiones tácticas de armas automáticas, toman decisiones financieras y han recibido la responsabilidad de muchas otras tareas humanas que requieren inteligencia. Pero el problema se vuelve relevante cuando se cambia el enfoque de los sistemas de optimización al de los sistemas autónomos de autoorganización. Aquí el aspecto más importante es el surgimiento de habilidades complejas del proceso de interacción autónoma entre un agente o la IA y su alrededor, lo cual no se podrá lograr hasta que avancemos significativamente en el conocimiento del cerebro, y la forma en cómo este percibe y se relaciona con el entorno. Mientras tanto, no podremos transferir dicho procedimiento a las máquinas y lograr en ellas verdadera autoorganización y autonomía.

Las neurociencias

Los científicos están aprendiendo mucho sobre el cerebro; por ejemplo, cómo puede tomar decisiones, cómo aprende de errores pasados o cómo convierte pulsos de luz en una escena visual compleja. Pero descifrar la "lengua" de los pulsos eléctricos que viajan a través de nuestros cerebros es solamente la mitad de la historia. La segunda parte, una más filosófica y compleja, es cómo esa actividad del cerebro se traduce en conciencia, es decir, en el conocimiento de uno mismo y la percepción del mundo que lo rodea.

Para comparar el ritmo de progreso de la evolución biológica de la inteligencia con la evolución de la tecnología, debemos considerar que los mamíferos más recientes han añadido una pulgada cúbica a su cerebro cada cien mil años, mientras que nosotros doblamos la capacidad de nuestros computadores cada año. No obstante, aunque es evidente que no es el tamaño del cerebro, menos el del computador, el único determinante de la inteligencia, sí es uno de sus factores.

Nuestro proceso en la ingeniería inversa del cerebro demuestra que tenemos la habilidad de entender, modelar y expandir nuestra inteligencia y, así, la evolución tecnológica es la continuación de la evolución biológica (véase figura 1).

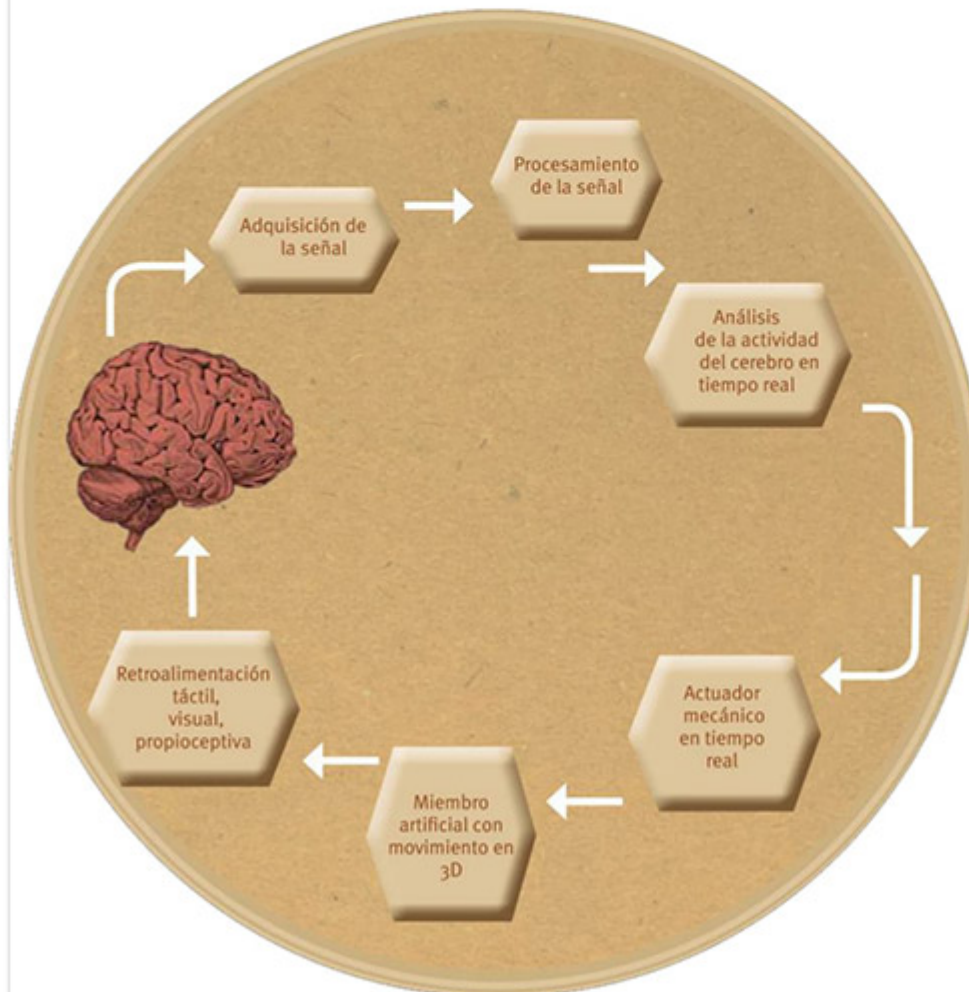


Figura 1.

Ciclo básico entre señal u orden cerebral-decodificador-actuador/robot-retroalimentación al cerebro.

El ritmo de la evolución

Al examinar el transcurso de las eras vemos que han sido parte de un proceso continuo de aceleración. La evolución de las formas de vida ha requerido miles de millones de años para dar sus primeros pasos (células primitivas, ADN), a pesar de que posteriormente el proceso se ha visto acelerado. Durante el periodo Cámbrico, el mayor cambio se dio solamente en decenas de millones de años, y se desarrolló entre 570 y 500 millones de años antes de nuestra era, momento en que una explosión de vida pobló los mares. Los humanoides se desarrollaron después, durante un periodo de millones de años, y el Homo Sapiens se tomó solo un periodo de cientos de miles de años.

Con la aparición de una especie capaz de crear tecnología, el cambio fue aún más rápido mediante la síntesis de proteínas a partir del ADN, por lo que la evolución nos ha llevado a la tecnología creada por humanos. Esto no significa que el curso de la naturaleza no continúe, simplemente muestra que ya no estará liderando el cambio, y que la tecnología avanza y avanzará mucho, de una manera más veloz.

Evolución hipermétrope

Los animales unicelulares pueden recordar acontecimientos durante segundos con base en reacciones químicas. Los animales con cerebro, durante días. Los primates con civilización y cultura pueden hacerlo de generación en generación. Las primeras civilizaciones humanas con historia oral pudieron preservar historias durante cientos de años. Y, gracias al advenimiento del lenguaje escrito, la permanencia se extendió a miles de años.

En la actualidad, el tiempo para adoptar nuevos paradigmas se reduce a la mitad, cada diez años, con respecto a la inmediatamente anterior. A este ritmo, el progreso tecnológico en el siglo XXI será equivalente al de doscientos siglos.

La Interfase Hombre-Máquina

Hoy en día los seres humanos interactúan más con la tecnología basada en computadores que con martillos y destornilladores. A pesar de ello, la ergonomía y los controles de un computador no expresan claramente esta situación. La tarea de la Interfase Hombre-Máquina (IHM) es hacer que el uso y aprovechamiento de una tecnología sea evidente y fácil. Así como un martillo bien diseñado se ajusta a la mano de quien lo usa y facilita la maniobra, un buen diseño de IHM debe ajustarse al mapa mental del usuario, de acuerdo a la tarea que quiere llevar a cabo.

En casi cualquier solución tecnológica la efectividad de la IHM debe evidenciar su uso ante la intención del usuario. Su experiencia con la interfase es más importante que la arquitectura interna del dispositivo. Es decir, lo que aprecia la persona es la facilidad de uso de la máquina o herramienta y la eficiencia en su desempeño; la arquitectura interna del utensilio, en cambio, es casi transparente para el usuario final.

La efectividad de la IHM es medida por componentes como el fácil manejo y la productividad. Muchas veces se los reconoce por expresiones como "Fácil de usar" o "Quality of Use", términos muy utilizados por los agentes vendedores o agencias publicitarias, y que le dan confianza al comprador, sobre todo a aquellas personas que le temen a la tecnología.

Pero dados los antecedentes ya mencionados y en vista de la dificultad para lograr una vía eficiente, no solamente a la hora de interactuar con las máquinas sino de compartir experiencias y conocimiento con ellas, se ha optado por tomar a las neurociencias como la mejor vía para lograr los objetivos propuestos. Por tanto, y por medio del uso de la nanotecnología o manipulación de la materia a escala molecular y atómica, se observa un futuro cercano en el que no solo interactuaremos directamente con las inteligencias artificiales, sino que compartiremos experiencias y conocimiento con las mismas.

Interfase Cerebro-Computador

La Interfase Cerebro-Computador (ICC, también conocida como Interfase Neuronal o Interfase Cerebro-Máquina) es una vía de comunicación directa entre el cerebro y un dispositivo externo. Algunas veces es usada para asistir, mejorar o reparar la parte cognitiva, sensorial o motriz de un paciente (véase figura 2)

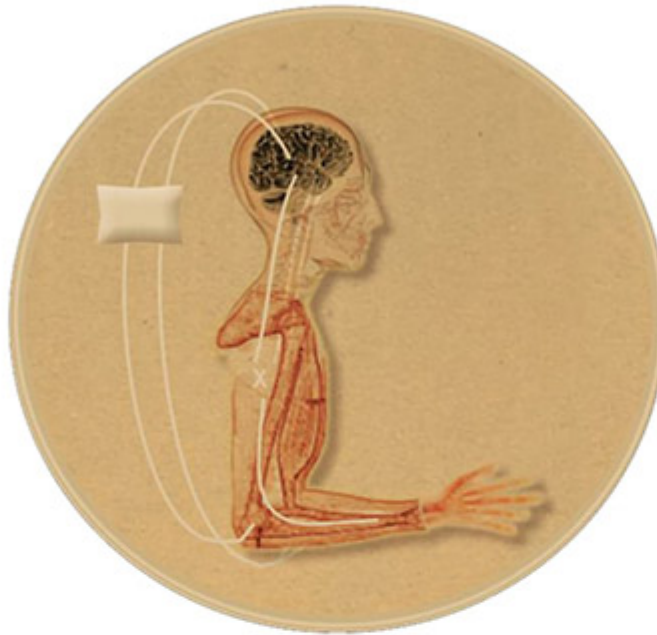


Figura 2.

Esquema de un implante cerebral conectado a un dispositivo externo. La orden es tomada del cerebro y enviada a través de un dispositivo externo al antebrazo, posterior a una ruptura a nivel nervioso en el brazo.

Las investigaciones sobre la ICC se remontan a 1970, a partir de un proyecto desarrollado por la University of California (UCLA), Los Ángeles, bajo el auspicio de la National Science Foundation (NSF), y seguido por un contrato con el Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA por sus siglas en inglés) o Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa de los Estados Unidos.

ICC contra neuroprótesis

Las neuroprótesis son un área de las neurociencias referente a las prótesis neuronales o uso de dispositivos artificiales, con el fin de reemplazar ciertas funciones nerviosas u órganos sensoriales. La neuroprótesis más conocida es el implante coclear, usado en miles de pacientes. Este hace que los impulsos físicos del sonido sean transformados en energía eléctrica y que esta, a su vez, estimule directamente las fibras del nervio coclear que transporta la información al cerebro.

La diferencia entre las neuroprótesis y las ICC radica en su uso: generalmente las primeras conectan el sistema nervioso central a un dispositivo, mientras que para las segundas, es más común conectar el cerebro (o el sistema nervioso central) a un computador. Mediante las neuroprótesis se aplica corriente eléctrica a un músculo, logrando su contracción con la fuerza necesaria y en el momento preciso para realizar un acto motriz funcional, como tomar objetos, soltarlos, bipedestarse (pararse en dos pies) o caminar. En cambio, las ICC crean un vínculo que permite generar una señal de control a partir de estímulos cerebrales, estos son captados, pre-procesados y clasificados para poder comunicarse a un medio externo, ya sea a un computador o a un *hardware* específico.

ICC-Investigación en mamíferos

Se han desarrollado múltiples proyectos para grabar señales desde el cerebro de ratones y simios, operando dispositivos mediante las ICC. Ya algunos chimpancés han manejado cursores en monitores de computadores y comandado brazos robóticos para realizar tareas sencillas, simplemente pensando en la tarea a ejecutar (véase figura 3).

Figura 3.

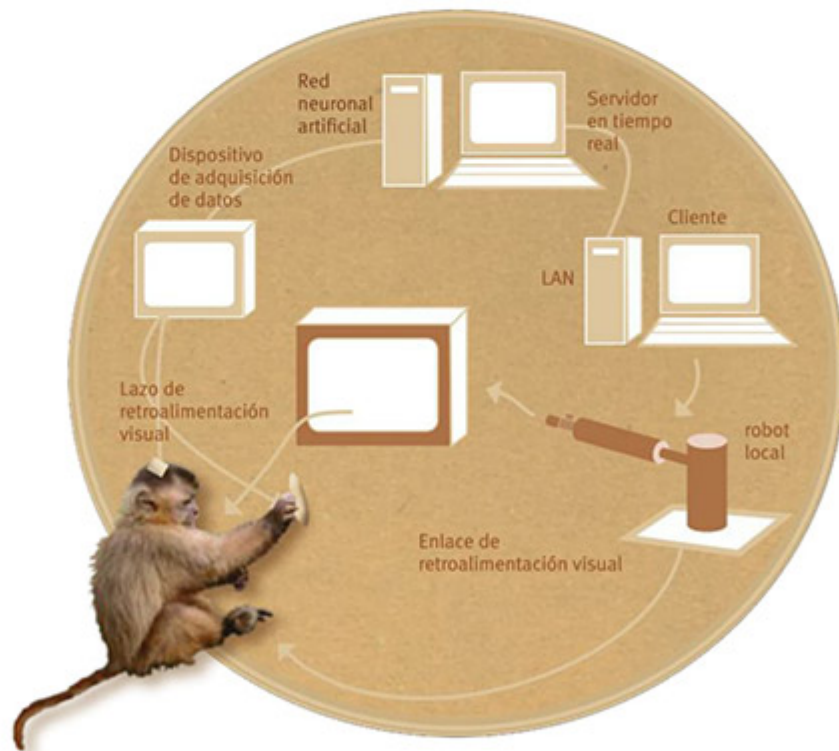
Implante cerebral en rata. La señal nerviosa sobre la percepción del animal es tomada directamente de la neocorteza y enviada a un dispositivo electrónico para su análisis.



Se han desarrollado algoritmos que reconstruyen los movimientos generados por las neuronas de la corteza motora. De igual manera, se ha hallado una relación matemática entre las respuestas eléctricas de la corteza motora y la dirección en que el *Macacus rhesus* mueve sus brazos (véase figura 4).

Figura 4.

Ciclo Cerebro-Cerebro. Durante su recorrido la señal cerebral activa un actuador electromecánico y el primate recibe retroalimentación visual del movimiento efectuado (adaptación de Wilmer Velilla, basado en la propuesta original de <http://blogs.discovermagazine.com>).



En 1999, investigadores de la Universidad de California (Berkeley), liderados por Yang Dan, decodificaron los disparos neuronales para reproducir las imágenes vistas por gatos. El equipo usó una matriz de microelectrodos implantada en el tálamo (el cual integra todas las entradas sensoriales al cerebro); así, usando filtros matemáticos, decodificaron las señales para generar imágenes de lo que los gatos veían.

Con el *Macacus rhesus* se demostró que los chimpancés podían alimentarse usando un brazo robótico controlado por las propias señales del cerebro. Para ello, se tomó la orden de movimiento del brazo directamente del cerebro por medio de electrodos, y esta señal se convirtió en impulsos para mover el brazo robótico. Utilizando un monitor enfrente al chimpancé, este observa cómo sus deseos son cumplidos por el brazo, y así se cierra el ciclo iterativo (véase figura 5).

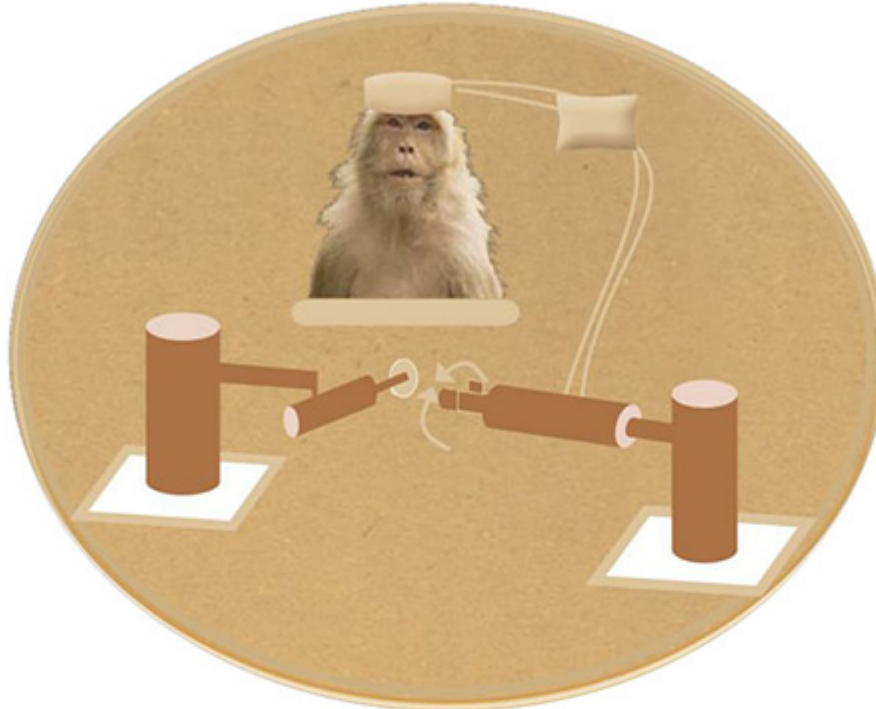


Figura 5.

El *Macacus rhesus* tiene un implante cerebral por medio del cual se toma la orden de movimiento del brazo. El animal recibe retroalimentación visual de lo que está haciendo, pero es el brazo robótico el que lleva el alimento a su boca.

ICC-Investigación en Humanos

ICC invasivas

La investigación en las ICC invasivas se ha usado en personas con discapacidad. Las ICC son implantadas directamente en la materia gris mediante una neurocirugía, generalmente sobre los grupos de neuronas motoras, que son las células nerviosas que controlan la actividad muscular voluntaria. Al residir en la materia gris producen la mejor calidad en la señal obtenida, pero son susceptibles de crear tejidos que causan pérdida de la misma, como reacción del organismo a elementos extraños en el cerebro (véase figura 6).



Figura 6.

Interfase invasiva.

ICC parcialmente invasivas

En la electrocorticografía (ECoG) se mide la actividad eléctrica de la corteza cerebral, por medio de electrodos en un finísimo plástico que se sitúa sobre la corteza.

ICC no invasivas

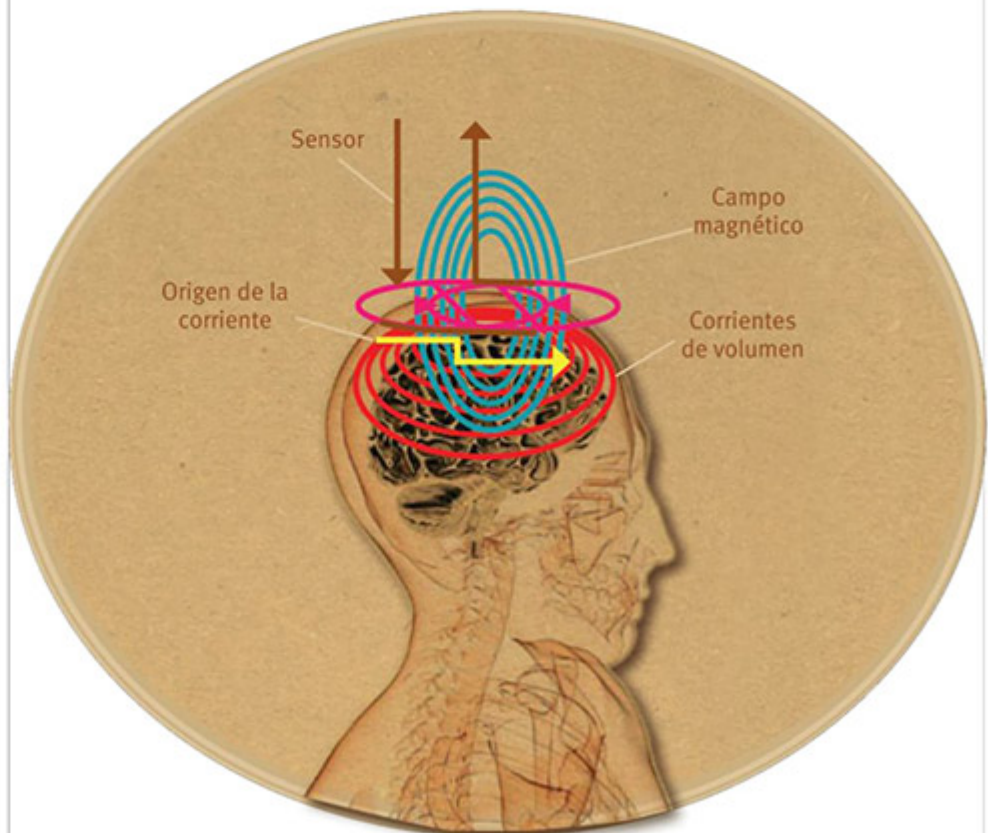
Señales registradas por medio de métodos no invasivos se han usado en implantes musculares para restaurar el movimiento. Aunque son fáciles de usar, su resolución espacial es bastante deficiente, ya que el cráneo atenúa las señales creadas por las neuronas dispersándolas y opacándolas. Ejemplo de estos métodos son:

- La electroencefalografía: es la interfase no invasiva más estudiada debido, principalmente, a su fina resolución temporal, su fácil uso y su bajo costo. El punto débil de esta es el largo entrenamiento que necesitan realizar sus usuarios. Se ha logrado mover el cursor de un computador después de varios meses de entrenamiento.
- La magnetoencefalografía (MEG) y las imágenes de resonancia magnética: es una técnica no invasiva que mide los campos magnéticos generados por la actividad neuronal del cerebro. Su distribución espacial es analizada para localizar las fuentes de la actividad cerebral.

Una imagen por resonancia magnética (IRM, por sus siglas en inglés, también conocida como tomografía por resonancia magnética, TRM, o imagen por resonancia magnética nuclear, NMRI) es una técnica de diagnóstico no invasiva y segura que proporciona una visión sobre el interior del cuerpo, más clara que muchos otros exámenes de diagnóstico. Las imágenes de dos o tres dimensiones se producen usando un imán grande, ondas de radio y un computador. También se puede usar un medio de contraste para ayudar a visualizar (véase figura 7).

Figura 7.

Esquema de resonancia magnética (adaptación de Wilmer Velill, basado en la propuesta original de: <http://eugenioysujetodeprueba.blogspot.com/2008/12/da-8.html>).



Una neurona es similar a una pila: genera un voltaje conocido como "potencial de membrana". La separación de iones (átomos con cargas positivas y negativas), como los del sodio y los del potasio, entre el interior y el exterior, determina y mantiene la diferencia de voltaje. La división de cargas se debe tanto a las moléculas con carga eléctrica que no pueden atravesar la membrana celular, como a la presencia de minúsculos canales para el paso de solo ciertos iones. Dado que las cargas eléctricas opuestas se atraen, los iones positivos buscan un medio negativo y los negativos, uno positivo. Así, las diferencias se suman y determinan la dirección del flujo iónico. Por tanto, la IRM se basa en la capacidad de algunos núcleos atómicos para absorber ondas de radiofrecuencia, cuando son sometidos al efecto de un campo magnético.

Ambos métodos, el electroencefalográfico y el magnetoencefalográfico, son empleados como Interfaces Cerebro-Computador o ICC no invasivas.

Y posterior a la Interfase Hombre-Máquina: la singularidad

Para situar el concepto de singularidad dentro de una perspectiva futurista, exploremos la palabra en sí misma. Singularity es un término inglés que significa "acontecimiento único con implicaciones singulares" (Neumann, 1960). Fue adoptado por matemáticos para denotar un valor que trasciende cualquier limitación finita, como la explosión de magnitud resultante al dividir una constante por un número que se acerca cada vez más a cero. Consideremos, por ejemplo, la función $y=1/x$. Cuando el valor de (x) se aproxima a cero, el valor de la función (y) se expande a valores más y más largos. Tal función, de hecho, nunca alcanza un valor infinito, ya que dividir por cero es matemáticamente "indefinido" (imposible de calcular), pero el valor de (y) excede cualquier posible límite finito (aproximándose al infinito), en la medida en que el divisor (x) se aproxima a cero.

El siguiente campo que adoptó el término fue la astrofísica. Si una estrella muy masiva explota como supernova, el remanente termina por colapsar a un punto de aparente cero volumen y densidad infinita, y una singularidad se crea en su centro. Ya que se piensa que la luz no puede escapar de esta estrella, se crea un agujero negro que constituye una ruptura en la fábrica del espacio-tiempo.

Una aberración en el espacio conlleva una aberración en el tiempo, si hablamos de la correlación entre las primeras cuatro dimensiones. Obviamente, es una analogía entre la singularidad astrofísica y la evolutiva.

Pero, desde nuestro limitado marco, este acontecimiento inminente aparece como un abrupto cambio en la continuidad del progreso; una de las más importantes implicaciones de la singularidad será el cambio en la naturaleza de nuestra habilidad de entendimiento: seremos más veloces. Cuando los científicos sean más inteligentes y trabajen más rápido, una hora será como un siglo de progreso (en términos actuales).

La singularidad comprende varios avances técnicos dentro de los que se pueden contar:

El escaneo del cerebro. La resolución espacio temporal y el ancho de banda¹ para escanear el cerebro se duplican cada año. Ya estamos obteniendo las herramientas para comenzar la ingeniería inversa (determinar de qué está hecho un producto existente) de los principios de operación del cerebro. Contamos con modelos y simulaciones de un par de docenas de regiones del mismo, y en dos décadas tendremos un conocimiento detallado de cómo trabajan todas las regiones de este órgano. Para ello tenemos el invaluable trabajo y colaboración del científico colombiano, el doctor Rodolfo Llinás Riascos.

Los computadores podrán combinar las fortalezas de la inteligencia humana con las de la inteligencia de la máquina. La humana incluye la formidable capacidad de reconocer patrones; la de la máquina incluye la habilidad para recordar millones de hechos en forma instantánea. Quizás lo más importante sea que las máquinas puedan compartir su conocimiento a altísimas velocidades, a diferencia de cuando se hace usando el habla en los seres humanos. Las máquinas podrán transmitir señales a una velocidad cercana a la de la luz (300 millones de metros por segundo) que, comparada a

1. Cantidad de datos que pueden ser transportados por algún medio en un determinado periodo de tiempo. A mayor ancho de banda, mayor cantidad de señales cerebrales observadas en la misma unidad de tiempo.

los 100 metros por segundo de las señales electroquímicas del cerebro de los mamíferos, supondrá un aumento de la velocidad en 3 millones de veces.

Un uso posible de las Interfases Cerebro-Computador sería sincronizar (hacer que dos o más fenómenos coincidan en el tiempo) las neuronas de cerebros humanos, y considerar si aquellos pueden aprender a hablarle el uno al otro.

Si un aumento de 6 veces en el volumen de la corteza prefrontal fue suficiente para apoyar la transición de los primates a los seres humanos, ¿qué se podría lograr con una especie de mente que agrupe a 64 mentes humanas? ¿0 mil?

Algunas discusiones de la singularidad suponen que el momento crítico en la historia no será cuando la IA equivalga a la humana, sino algunos años más tarde, cuando la Ley de Moore produzca mentes de IA dos o cuatro veces más rápidas que la de un ser humano. Lo que, quizás, dará como resultado algo con cientos o miles más de inteligencia-velocidad de procesamiento que la IA original (la velocidad de computación del cerebro es medible, aproximadamente 372 Gb/seg).

Y así es la singularidad. Algunas personas dirán que no pueden asimilarla, al menos con nuestro actual nivel de entendimiento. Debido a ello no podemos ver y comprender qué pasa más allá del horizonte de los sucesos. Y es por eso, precisamente, que a este aspecto en la evolución del ser humano se le llama singularidad: un fenómeno que se puede presentar una vez el ser humano haya logrado crear máquinas superiores a él en inteligencia, y no pueda saber hoy, qué pasará mañana.

Para ampliar la información sobre la "singularidad", consulte la página:

<http://www.singinst.org>

Para ampliar la información sobre la Interfase Hombre-Máquina, consulte la página:

<http://www.hcibib.org>

Referencias

Moore, G. (1965, 19 de abril), "Cramming More Components onto Integrated Circuits", en *Electronics Magazine*, Vol. 38, No. 8.

Neumann, (1960), *Collection Works*, Mac Millan, Nueva York.

Sagan, C. (1977), *The Dragons of Eden*, Random House Inc., Nueva York.



www.4-72.com.co



SUSCRÍBASE A LA REVISTA Innovación y Ciencia



La Revista *Innovación y Ciencia*, cuenta desde su aparición en octubre de 1992, con una gran acogida por parte del público y se ha convertido en un valioso instrumento de capacitación y actualización para sus lectores. El lenguaje divulgativo con que se tratan los temas científicos ha despertado entusiasmo palpable por la ciencia y sus aplicaciones. Está dirigida a empresarios, profesionales, científicos, docentes y estudiantes y, en general, a todos los lectores no especializados que buscan un tratamiento serio, ameno y accesible de temas científicos y tecnológicos de actualidad.

**VALOR DE LA SUSCRIPCIÓN POR UN AÑO PARA FUERA DE BOGOTÁ
\$55.000 INCLUYE COSTO DE ENVÍO**

**VALOR DE LA SUSCRIPCIÓN POR UN AÑO PARA BOGOTÁ
\$50.000 INCLUYE COSTO DE ENVÍO**

CONSIGNACIÓN EN: BANCO DE OCCIDENTE CUENTA DE AHORROS N° 26880746 - 8, A NOMBRE DE LA ASOCIACIÓN COLOMBIANA PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA, SOLICITAMOS ENVIAR COPIA DE LA CONSIGNACIÓN CON EL SELLO DEL BANCO LEGIBLE AL TELEFAX (1) 221 9953

**USTED PUEDE CANCELAR TAMBIÉN CON TARJETA DÉBITO O CRÉDITO,
SIMPLEMENTE NOS ENVÍA UN CORREO HACIÉNDONOSLO SABER.**

INFORMES

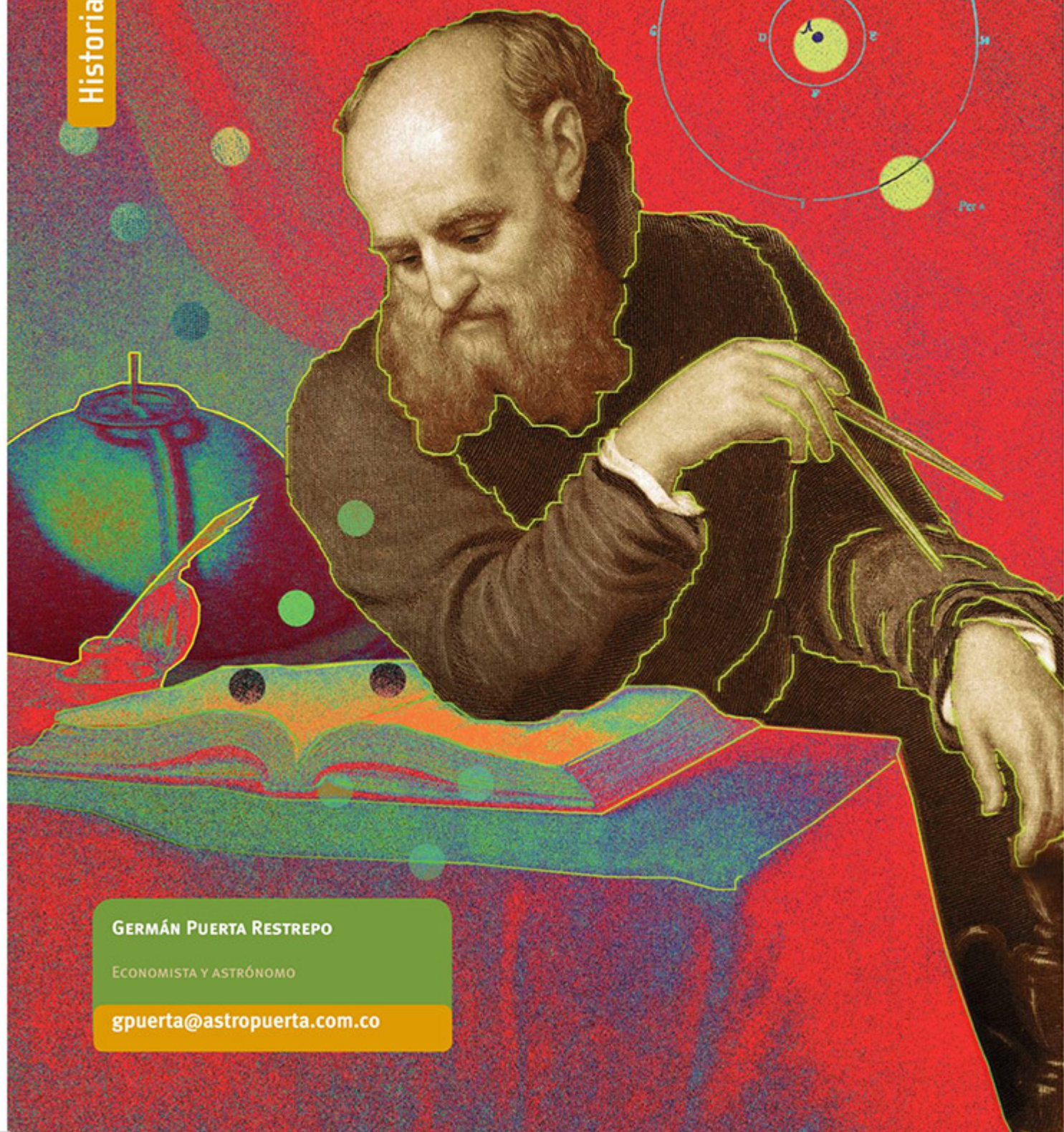
Tel: 221 4631 - 315 0734
E-mail: innovacionyciencia@acac.org.co
mercadeo@acac.org.co

PUBLICACIÓN DE LA
 **ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA**

Historia de la ciencia

Galileo Galilei

El primer hombre moderno



GERMÁN PUERTA RESTREPO

ECONOMISTA Y ASTRÓNOMO

gpuerta@astropuerta.com.co

*Galileo: los movimientos de los astros son ahora fáciles de comprender,
pero lo que no pueden calcular los pueblos
son los movimientos de los señores.
La lucha por la mensurabilidad del cielo se ha ganado
por medio de la duda; mientras que las madres romanas, por la fe,
pierden todos los días la disputa por la leche.
A la ciencia le interesa las dos luchas
(Brecht, 1939)*

El espíritu de la geometría

El primer biógrafo de Galilei, Vincenzo Viviani fue además su último discípulo y asistente, y sentía por su maestro una enorme admiración. Al morir Galileo, Viviani pone en su casa en Florencia una inscripción conmemorativa en la cual afirma que Dios consuela a los florentinos porque Miguel Angel, el gran pintor, escultor y arquitecto italiano acaba de morir, y hace que venga al mundo Galilei para que continúe la sucesión sin interrupciones de genios de la ciudad.

Galilei nace el 15 de febrero de 1564 en Pisa. Su padre, Vincenzo Galilei, músico y comerciante de telas, y su madre Gulia eran una pareja con dificultades económicas. En 1574 se trasladan a Florencia en donde el pequeño Galileo inicia sus estudios de latín y de lógica, en el monasterio de Santa María di Vallombrosa, y allí permanece hasta los catorce años de edad. Aprende retórica y griego, pero todo parece indicar que su padre no puede costear una mejor educación primaria para su hijo mayor.

Galileo se matricula en 1581 en la Facultad de Artes en Pisa como estudiante de medicina. Sobre sus días como estudiante, así como los de su infancia y juventud, es muy poco lo que se sabe. El episodio más conocido sucede un día que asiste a un oficio religioso en la catedral de Pisa; Galileo nota desde lo alto de la nave central el balanceo de una lámpara y, usando su propio pulso como reloj, descubre que no importa cuán largas o cortas fueran las oscilaciones: cada una toma el mismo número de pulsos. Este fenómeno llamado isocronismo le permite, años más tarde, desarrollar estudios y experimentos completos sobre el péndulo y los relojes.

Es posible que Galileo tuviera su primer contacto con las matemáticas y la geometría cuando fue universitario en Pisa, y también lo es el hecho de que la siguiera estudiando a escondidas de su familia, cuando abandona del todo la carrera de medicina y regresa a su casa en Florencia, a los veintiún años de edad. Su primer escrito de importancia se remonta al año 1586, y es una descripción de una novedosa balanza hidrostática y de los métodos de medición del peso de los metales. Luego desarrolla un trabajo sobre el centro de gravedad de los sólidos que llama la atención de varios entendidos, y da clases particulares de matemáticas.



La nueva estrella

Una vacante en la cátedra de matemáticas de la Universidad de Pisa le permite acceder a este puesto en su ciudad natal. Dicta su primera clase universitaria el 14 de noviembre de 1589, a los veinticinco años de edad, momento en que su carácter poco conformista empieza a revelarse en varios episodios. La universidad era muy estricta en la vestimenta de los profesores, exigía el uso de la toga, y Galileo, por no ir correctamente vestido, es multado, a lo que responde con la distribución entre sus amigos de unos versos satíricos, asegurando que todos los males del mundo se originan en el abandono de la desnudez natural del Paraíso. Profesor brillante y expositor ameno, muy popular entre los estudiantes, los salones de sus colegas prácticamente se desocupan cuando él habla, lo que aumenta el celo de algunos de ellos hacia él.

Es en el período pisano cuando inicia su cuestionamiento sobre las ideas de Aristóteles. En un episodio no comprobado de la vida de Galileo, se dice que en presencia de colegas y estudiantes realizó varias veces el experimento de lanzar objetos desde lo alto de la Torre Inclinada de Pisa, para así demostrar que dos cuerpos del mismo material, pero de distinto peso, caen a la misma velocidad, a diferencia de la física aristotélica y muchos pensadores europeos que sostenían que los objetos pesados caen con mayor rapidez que los ligeros. Además, presenta por vez primera un enfoque matemático en el tema del movimiento, y afirma que el plan académico de la universidad de mantener separadas las matemáticas de la filosofía es un error. En realidad, las matemáticas nunca apasionaron demasiado a Galileo por sí mismas, pero las considera el instrumento más útil para la investigación de las leyes naturales.

En 1592 Galilei es nombrado profesor de matemáticas en la Universidad de Padua, sin duda, un lugar más adecuado para su talento, y debuta pronunciando una magnífica conferencia inaugural, muy aplaudida por sus colegas y estudiantes. Con el tiempo su mente brillante y su facilidad de expresión le hicieron muy popular en la universidad, pero su ingenio mordaz le acarrearía fama de pendenciero. A diferencia de lo que ocurría en otros sitios, la universidad disfrutaba de un ambiente de tolerancia que aseguraba la libertad de pensamiento, en una ciudad con gran actividad comercial y artesanal, vecina del gran puerto de Venecia y el Arsenal, permite a Galileo interactuar con los marinos, capataces, obreros y artesanos, expertos y entendidos en el mundo mecánico y poco dados a filosofar. Es en el período paduano cuando él desarrolla su extraordinaria habilidad manual y su fascinación por la forma como funcionaban las cosas; aparece entonces el hombre que quiere entender, no el porqué, sino el cómo funciona el mundo.

A finales del siglo XVI la teoría de Copérnico parecía una hipótesis audaz, excitante como tema de discusión, pero no más práctica y tan carente de pruebas como la de Tolomeo, o cualquiera otra. Johannes Kepler, matemático y astrónomo alemán, publica su obra *Mysterium Cosmographicum*, y le confía a un amigo dos ejemplares para que los lleve a Italia y los entregue a quien pudiera hacer buen uso de ellos. Una de esas afortunadas personas es Galileo, un completo desconocido para Kepler. Inmediatamente, el primero escribe una carta de agradecimiento al segundo, con fecha del 4 de agosto de 1597, en la cual le revela su adhesión al sistema copernicano, se alegra por encontrar una compañía en la búsqueda de la verdad y felicita a Kepler por sus magníficos descubrimientos.

En 1605 Galileo es invitado a ocupar el puesto de tutor de vacaciones de Cosme, el joven príncipe de Toscana, trabajo que por supuesto acepta. Inicia así su larga relación con los Médici de Florencia, una rica y poderosa familia cuyo linaje se remonta hasta el siglo XII. En 1609 Galileo solicita trabajo con los Médici en función de obtener mejores condiciones de trabajo para desarrollar sus investigaciones, y tiempo para escribir y editar sus libros.

El mensaje celeste

Hacia agosto de 1609 llega a Venecia un extranjero vendiendo un catalejo holandés muy rudimentario. Pero un asesor de la República afirma que el sabio Galileo en Padua puede construir uno mucho mejor. Como no se sabía nada acerca de su construcción, Galileo se pone a meditar sobre el tema y, gracias a

su enorme talento práctico, tiene la satisfacción de fabricar un primer antejo que aumentaba en tres veces el tamaño de los objetos. En septiembre del mismo año, se presenta ante el senado veneciano con un telescopio de ocho aumentos y, como buen comerciante, lo entrega a manera de obsequio. Hace una demostración desde el campanario de la iglesia de San Marcos y destaca su uso militar. El instrumento permite “ver sin ser visto”, pues se pueden avistar los barcos enemigos con dos horas de antelación o divisar las fortificaciones enemigas. Los senadores venecianos quedan impresionados y le ofrecen un salario de mil florines anuales y de por vida. Aunque es imposible mantener el secreto de la sencilla construcción del telescopio, los senadores procuran seguir teniendo a Galileo en sus filas, pues lo saben el mejor en su especialidad por su elevada condición de mecánico. En apenas seis meses, Galilei mejora el poder de sus telescopios hasta los treinta aumentos, y la calidad de sus aparatos no es superada por nadie en toda Europa, en los siguientes veinte años.

Solo él poseía el genio para usar el telescopio en forma científica, y así lo hizo. El 30 de noviembre de 1609 dirige su instrumento hacia la Luna y se asombra al descubrir que su superficie no es plana como se creía, sino llena de montañas y valles muy semejantes a los de nuestro planeta. Se inicia el asalto de los cielos que habría de cambiar a la Tierra para siempre. El 7 de enero de 1610 advierte el disco de Júpiter con “pequeños planetas” que giran a su alrededor. Enseguida descubre que la misteriosa banda blanquecina que cruza el firmamento, la Vía Láctea, en realidad se compone de innumerables estrellas, y que hay muchas más de las mismas en el cielo que las observables a simple vista. Advierte que el firmamento está lleno de nebulosas, que en realidad son conglomerados de estrellas. El 25 de julio observa que el planeta Saturno tiene “orejas” y, para completar su formidable jornada de descubrimientos celestes, en diciembre divisa las fases de Venus, la prueba reina del sistema copernicano. Si quisiéramos señalar un momento para dividir el mundo antiguo del moderno, sin duda este debe de ser en 1610, el año en que Galileo cambió por completo la visión del universo.

Las jornadas de Galileo con el telescopio son memorables. Pasaba varias noches sin dormir y apenas daba crédito a sus ojos de lo que encontraba en el firmamento. Sus descubrimientos los consigna en la obra *Sidereus Nuncius (Mensajero sideral)* y en varias cartas dirigidas a la corte de los Médici y al propio Kepler. El impacto de estos eventos es tan fuerte en Galileo que lo obliga a dejar de lado, por los siguientes cinco años, sus estudios sobre el movimiento; entonces se lanza a la defensa del sistema copernicano con la seguridad de las pruebas que le ofrece el telescopio. Los dibujos de Galileo, en especial los de la Luna, demuestran que el sabio también habría podido ser un gran artista. El éxito del libro es instantáneo, sobre todo por la sensacional novedad de los satélites de Júpiter, que señala que no todos los astros giran alrededor de la Tierra. El *Mensajero sideral* anunció, tanto a los astrónomos como a la gente común, que el universo había cambiado por completo.

En 1610, Galileo no solo se traslada a Florencia sino que alcanza la posición que verdaderamente le correspondía: a la edad de cuarenta y seis años es nombrado por los Médici, el 10 de julio, “jefe matemático de la Universidad de Pisa y primer filósofo y matemático del Gran Duque de Toscana a perpetuidad”. La evidente competencia entre los dos grandes estados, Venecia y Florencia, se manifiesta en ese momento. El primero le había otorgado a Galileo, unos meses antes, un aumento muy generoso de su sueldo, y ahora les rechazaba para irse con su rival. Para algunos esto fue una descortesía y para otros un error, pues el alegre y liberal puerto veneciano era más propicio para un individuo como Galileo, que la conservadora sociedad florentina.

Entre la fe y la razón

En toda Europa el éxito de Galilei es inmenso y hay numerosos pedidos de su *Mensajero* y del maravilloso instrumento que acerca las estrellas. En marzo de 1611 viaja a Roma en calidad de invitado de honor del embajador toscano, y es acogido con desbordante simpatía; los cardenales y príncipes le tratan como un gran personaje, asiste a numerosos banquetes, maravilla a todos con su telescopio y además lo recibe el Papa Paulo V. Un evento que llena de orgullo a Galileo es su inscripción en la prestigiosa *Accademia dei Lincei* (Academia de los linces), una de las primeras sociedades científicas que se distingue por su

Johannes Kepler
y su modelo
platónico del
sistema solar,
en su obra
*Mysterium
Cosmographicum*
(1596).



estudio de la naturaleza y las matemáticas, y cuyos miembros lo apoyarán con decisión en el futuro. El 14 de abril de 1611, en la ceremonia presidida por el patrón y fundador de la academia, Federico Cesi, se usa por vez primera el nombre de "telescopio".

De vuelta a Florencia, luego del triunfo romano, Galileo reemprende la investigación científica con renovada fuerza y, en 1613, publica las *Cartas sobre las manchas solares*, en donde presenta su notable estudio sobre el Sol, un nuevo argumento a favor del sistema copernicano y en contra de la tesis aristotélica de la incorruptibilidad de los cielos. Estudiando en detalle el movimiento de las manchas solares, deduce la rotación del Sol sobre sí mismo en veintisiete días y la inclinación sobre su eje.

En Roma el influyente cardenal Mateo Barberini le envía a Galileo una carta de felicitaciones por sus descubrimientos. Este se confirma entonces como el científico más importante del momento pero,

como es usual, aparecen de inmediato los odios de los “profesores y académicos”, en parte por celos y en parte por ignorancia. Además, todos aquellos que en algún momento se habían sentido heridos por el orgullo y la intolerancia de Galileo, se unen a la camarilla que pretende ridiculizar al genio. Algunos se negaron por principio a mirar por el telescopio: “¿Para qué discutir con Aristóteles?”, y otros aseguraron que los fenómenos de Júpiter eran ilusiones ópticas. Galilei reacciona con desprecio y les bautiza como la “Liga de los pichones”, en referencia a uno de sus miembros, Ludovico delle Colombe (*colombe*: paloma en italiano), un aristotélico de la universidad de Pisa que no oculta su enemistad hacia él. En respuesta y con alarde de gran vanidad, Galileo declara varias veces en público que todo aquel que contradijera el sistema copernicano debería ser tenido como un “pigmeo mental”.

El científico tenía gran facilidad para hacer amigos y también enemigos; sobre este aspecto se afirma que “[...] creaba la fría e implacable hostilidad que el genio arrogante, sin humildad, genera entre los mediocres” (Sharratt, 1996: 196).

Poco después, en diciembre de 1613, Galileo se entera de que circulan rumores en la corte de los Médici sobre graves errores en sus ideas y escritos, los cuales han generado cierto malestar, en especial a la madre del Gran Duque, Cristina de Lorena. Se afirma que las nuevas teorías parecen contradecir lo afirmado en la Biblia respecto al movimiento de los astros. Galileo se muestra sereno, confiado y convencido de sus argumentos, y asegura que sus descubrimientos no pueden despreciarse basándose en algunos pasajes de las Sagradas Escrituras:

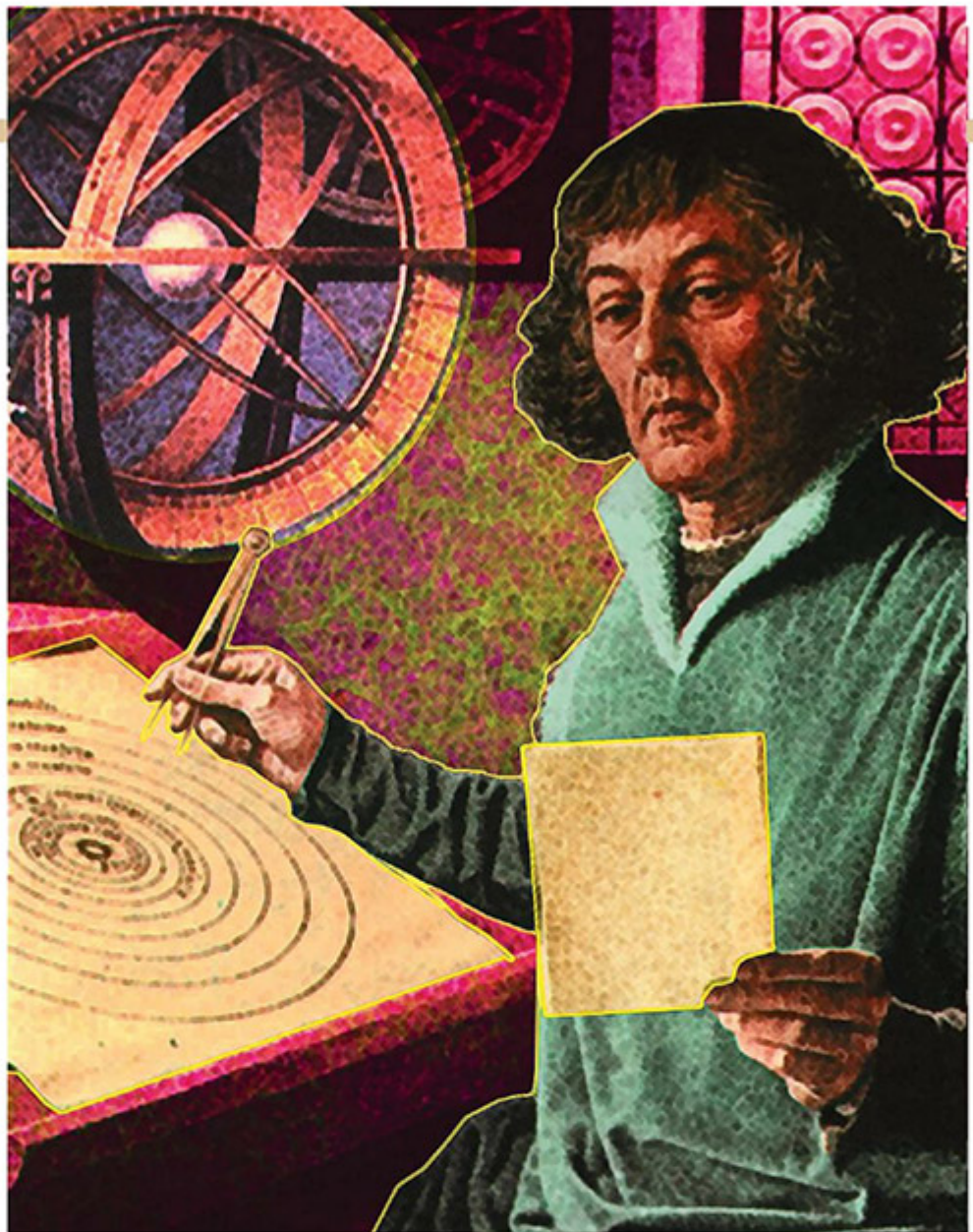
Si bien la Escritura no puede equivocarse, pueden equivocarse sus intérpretes y comentaristas de varios modos. En las Escrituras se encuentran muchas proposiciones falsas si se toma el desnudo sentido de las palabras (Benazzi y D’Amico, 2001: 146).

Aquí Galileo comete otro error al abandonar el campo estrictamente científico para adentrarse en temas teológicos, en donde queda más expuesto a los ataques de los defensores del aristotelismo. El 7 de febrero de 1615, el cardenal Paolo Emilio Sfrondati, prefecto de la Congregación del Índice y del Santo recibe una copia de la carta de Galileo y decide abrir el caso. Este comprende el verdadero peligro que debe evitar a toda costa, es decir, que la Iglesia condene la nueva concepción científica prolongando el oscurantismo medieval. Decide entonces ir a Roma para explicarlo todo verbalmente, optimista y confiado en sus apoyos políticos y en su propio prestigio. Sin embargo, no advierte a tiempo su verdadera debilidad: la ingenuidad. Confía en su gran capacidad para demostrar la veracidad del sistema copernicano y evitar su condena, pero no capta el problema real. La Iglesia está decidida a mantener la hegemonía absoluta en la interpretación de las Sagradas Escrituras y a erosionar, en lo posible, el poder de las iglesias reformadas. No es la argumentación científica lo que está en juego, es la autoridad de la Iglesia.

Los amigos de Galileo en la jerarquía eclesiástica hacen todo lo posible por evitar el conflicto, en especial el cardenal Mateo Barberini quien tiene gran influencia sobre el Santo Oficio. En febrero de 1616 el proceso ya ha tomado una dirección precisa: se renuncia a atacar al científico, de manera directa, como hereje —demasiado famoso y sólidamente protegido— y se lanza todo el peso del tribunal sobre las tesis científicas para censurar las siguientes dos proposiciones: “Que el Sol sea el centro del mundo y en consecuencia inmóvil de movimiento local”, y “Que la Tierra no es el centro del mundo ni inmóvil, sino que se mueve toda según el movimiento diurno”. Así las cosas, Galileo se somete y promete enseñar el sistema copernicano solo como hipótesis, y se emite un decreto atacando a Copérnico y su obra, *De revolutionibus orbium celestium*, puesta en el índice de libros prohibidos.

A pesar de que su proyecto de convencer a la Iglesia de abrazar la nueva visión científica queda seriamente lesionado, Galileo sale bastante indemne del proceso y con su prestigio intacto. Las consecuencias reales del asunto serán históricamente más graves para la Iglesia pues, al abandonar el camino de la investigación y de la nueva cultura —ya transitado por muchos en sus propias filas, notablemente los jesuitas—, se ancla en la visión aristotélica del mundo, irreversiblemente superada. Así, se certifica el conflicto entre la Iglesia y la modernidad, que tendrá tremendas consecuencias en poco tiempo en toda Europa.

Nicolás Copérnico
y su obra *De
revolutionibus
orbium celestium*
(1543).



Diálogos con el universo

De nuevo en Florencia, Galileo decide no cambiar su táctica y esto se vuelve objeto de debate de varios estudiosos, ¿por qué su insistencia en convencer a la Iglesia de conciliar la fe y la investigación científica?, ¿por qué un hombre de tal inteligencia no advirtió el terreno tan escabroso que transitaba? La explicación más plausible afirma que Galilei era un individuo carente por completo de toda tendencia mística o contemplativa que le abrigara alguna alternativa, su única opción era la interpretación de la naturaleza mediante la geometría y las matemáticas. En otras palabras, Galileo era absolutamente moderno.

Retorna con renovado vigor a sus estudios del movimiento y de la mecánica celeste, y publica // *saggiatore* (*El ensayista*) que contiene apartes memorables. Aquí Galileo establece por primera vez la distinción moderna entre el universo cuantitativo y objetivo de las ciencias experimentales, y aquel subjetivo de los valores éticos, estéticos y religiosos. En uno de sus apartes se lee un verdadero manifiesto de lo que está por venir:

El universo está escrito en lenguaje matemático y los caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas. Sin estos medios, es humanamente imposible entender nada; sin ellos lo único que queda es dar vueltas sin sentido por un oscuro laberinto (Koestler, 1964: 13).

En este mismo año muere el Papa Paulo V y ¡Oh maravilla!, es el ilustrado amigo de Galileo, el cardenal Mateo Barberini, quien sube al trono pontificio el 6 de agosto de 1623, bajo el nombre de Urbano VIII. El nuevo Papa se proclama protector de las artes y las ciencias, y entre los Linceos estalla la euforia. Galilei se precipita de inmediato a Roma, obtiene seis audiencias con el pontífice, pero no consigue la supresión del decreto de 1616. Urbano VIII le explica que puede escribir lo que se le ocurra, siempre y cuando evite los argumentos teológicos y presente todo como hipótesis. Y le advierte:

Aunque una hipótesis explique de manera satisfactoria un fenómeno dado, esto no significa que sea necesariamente cierta, pues Dios es todopoderoso y puede producir el mismo fenómeno por otros medios que escapan al entendimiento humano (Sharratt, 1996: 253).

Este se conocería después como “el argumento de Urbano VIII”, que le ocasionará serios problemas a Galileo. Pero en su caso también ocurre que la pasión sustituye la razón; con la seguridad del respaldo del Papa, de los mecenas —en especial de los Médici—, de sus muchos amigos —algunos de ellos simples aduladores— y en la cumbre de su prestigio, se siente invulnerable y libre de hacer lo que le plazca, y se lanza a escribir su monumental obra *Il Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (*Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*), una apología al sistema copernicano que tarda mucho tiempo en redactar a causa de sus frecuentes enfermedades, incluyendo problemas de visión. El *Diálogo* se basa en el encuentro entre tres personajes: Salviati, Sagredo y Simplicio, quienes en cuatro jornadas deben debatir sobre las razones a favor y en contra de las hipótesis astronómicas más importantes: la aristotélica-tolemaica y la copernicana. Simplicio defiende el geocentrismo y el aristotelismo, se presenta como un personaje oscuro, mal informado y que, con frecuencia, raya en la estupidez, por lo que se afirma que su nombre es sinónimo de “simple”.

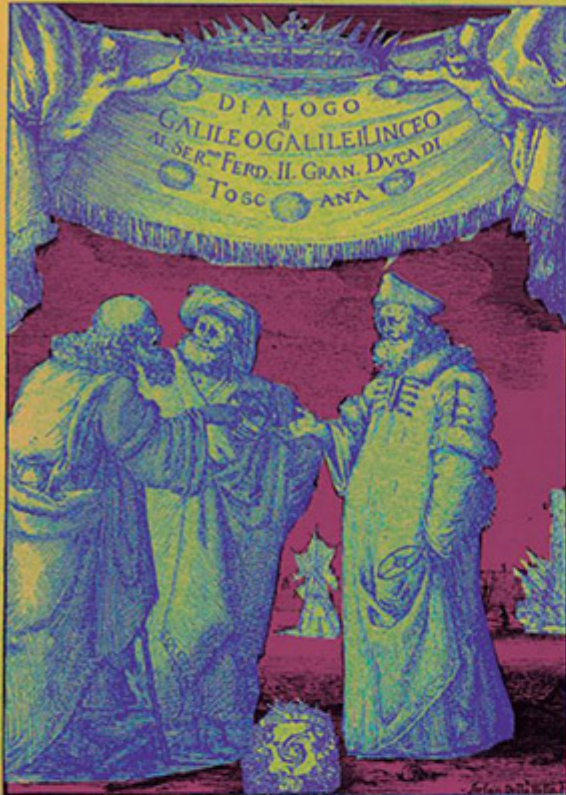
El *Diálogo* obtiene una gran acogida tanto en Italia como en el extranjero. Está escrito en italiano, contiene numerosas y bellas ilustraciones y dibujos, y rápidamente es traducido a varias lenguas. Sin embargo, comienzan a circular algunos rumores hostiles al texto y a su autor, sobre todo aquellos que afirman que la figura de Simplicio es una irónica representación del mismo Papa. El autor pone algunos argumentos sobre la esencia divina de la naturaleza en boca de Simplicio, quien afirma haberlos obtenido “de un personaje muy eminente y erudito delante del cual solo podemos agachar la cabeza”.

Urbano VIII, tal vez instigado por alguien, se enfurece al creerse caricaturizado en el tonto Simplicio y los enemigos ven la ocasión para desembarazarse del incómodo Galileo. La hora de arreglar cuentas había llegado.

El nacimiento de la nueva ciencia

Resultan vanos todos los esfuerzos y apelaciones de los influyentes amigos de Galileo para obtener un trato benevolente por parte de la Inquisición. Su avanzada edad —sesenta y nueve años—, sus enfermedades, su problema de visión causado, tal vez, por la imprudente observación del Sol, el largo viaje desde Florencia a Roma en pleno invierno y los riesgos de la peste, nada impide que el Santo Oficio ordenara la comparecencia del científico en Roma “encadenado si fuera necesario”, como un bandido cualquiera. Galileo llega a Roma en febrero de 1633 luego de un penoso viaje de veintitrés días, y se le permite alojarse en la embajada toscana en una situación parecida a la casa por cárcel. Sin embargo, la severidad del proceso resulta inalterable.

En este histórico proceso la Iglesia trata a Galileo con cierta indulgencia, pues su objetivo es silenciar al sabio, no convertirlo en mártir, sin repetir el error cometido con Giordano Bruno que en la historia ocupa el puesto de mártir del libre pensamiento, incluso más que Galileo. Ahora se trata de mostrarle al mundo que nadie, así fuese el gran Galilei, podía burlarse impunemente del Papa y desafiar a la Iglesia. Esta vez no se debaten las ideas, pues incluso los jesuitas se preparan para hacerle tragar a los teólogos la amarga píldora del heliocentrismo.



DIALOGO
 DI
GALILEO GALILEI LINCEO
 MATEMATICO SOPRAORDINARIO
 DELLO STUDIO DI PISA.
E Filosofo, e Matematico primario del
 SERENISSIMO
GR. DVCA DI TOSCANA.

Due ne i congressi di quattro giornate si discorre
 sopra i due

MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;

*Propoñendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
 tanto per l'una, quanto per l'altra parte.*

CON PRI



VILEGI.

IN FIRENZA, Per Gio. Batista Landini MDCXXXII.

CON LICENZA DE' SUPERIORI.

Galileo es condenado como sospechoso de herejía y le otorgan la casa por cárcel de por vida. La leyenda afirma que luego del fallo el sabio dijo entre dientes: "¡Eppur si muove!" ("¡Pero se mueve!"). Esto es falso pues si alguien lo hubiera escuchado, nada lo habría salvado. No lo dijo, pero tal vez lo pensó.

Enviar a prisión a Galileo también habría sido un despropósito, lo esencial era aislarlo y controlarlo por lo que se acuerda su traslado a su casa de campo en Arcetri, en las colinas vecinas a Florencia, cerca del convento de sus hijas. Algunos historiadores afirman que fue en ese momento cuando les expresó a varios amigos la siguiente sentencia:

Admitir que personas absolutamente ignorantes de un arte o una ciencia sean llamados a ser los jueces de aquellos que las saben, he ahí lo que arruina a los Estados (Rops, 1964).

Ahora es el momento de recuperar el tiempo perdido, sobreponerse al infortunio y volver a su verdadera pasión: los estudios del movimiento. Y de esta forma, a los setenta y un años, con grandes dolencias físicas y casi totalmente ciego, legalmente prisionero, a partir de un enorme acopio de los materiales y escritos guardados desde su juventud y con ayuda de sus asistentes, Galileo escribe su obra magna: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (*Discursos y demostraciones en torno a dos nuevas ciencias*).

En este, su último escrito, Galileo despliega todo su genio concentrándose en el estudio de la resistencia de los materiales y del movimiento, las dos nuevas ciencias. Entre otros temas establece que la distancia recorrida por un objeto que cae es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido, ahora conocida como la Ley de la caída libre de los cuerpos, y actualmente su demostración es señalada por los estudiosos como el verdadero inicio de la física moderna.

Los *Discursos* anticipan cómo deben ser los libros de física: serios, con análisis matemáticos de los experimentos y seguidos por deducciones. El mensaje implícito en la obra es muy claro: sin saber matemáticas nadie puede emprender el estudio del movimiento; por lo tanto, los aristotélicos son

unos analfabetos ante el libro de la naturaleza. Paradójicamente, es con esta obra que Galilei aporta su contribución al triunfo decisivo del heliocentrismo, pues, al aplicar al mundo celeste de Kepler la dinámica terrestre de Galileo, Newton realizará la síntesis maravillosa en su obra *Principia Matemática*, publicada cincuenta y tres años después.

Galileo Galilei es finalmente vencido por la muerte el 8 de enero de 1642, a la avanzadísima edad, para su tiempo, de setenta y ocho años. El Papa prohíbe erigir monumento alguno si en él se pone alguna palabra que pueda ofender la reputación del Santo Oficio. En un mausoleo que hizo erigir Viviani se lee entonces una sencilla inscripción que dice: "Galileo Galilei. Lo entregó todo a la geometría, la astronomía y la filosofía. Ningún otro de su tiempo se le compara".

¡Venciste Galileo!

En efecto, las obras de Copérnico, Kepler y Galileo no fueron eliminadas del índice hasta 1820 por decisión del Papa Pío VII, y su lectura dejó de amenazar a los lectores con consecuencias nefastas en esta y en la otra vida. Hacia el año 1894 el Papa León XIII estableció que el dogma de la infalibilidad regia únicamente dentro del terreno de la fe y la temática apostólica. En 1979, el papa Juan Pablo II reconoció que la Iglesia católica romana se había equivocado al condenar a Galileo. En 1998, en su encíclica *Fe y Razón*, el Papa Juan Pablo II rehabilitó por completo al científico y tomó citas de una carta del mismo de 1613:

Las Sagradas Escrituras y el libro de la naturaleza proceden igualmente de la palabra divina, las primeras dictadas por el Santo Espíritu, el segundo por un fiel ejecutando la voluntad de Dios. La investigación metódica en todos los dominios del conocimiento, si respeta las normas morales, no se opondrá jamás a la fe (Galilei, 1615).

Galileo es ahora el símbolo del pensamiento científico moderno, según el cual, aunque las verdades de la ciencia serán siempre incompletas, el científico tiene la obligación de buscar la verdad. Y aunque por fin desapareció la Inquisición, aún prosperan las "Ligas de los pichones" agazapadas en las burocracias, listas a ejercer su intolerancia para conservar sus privilegios a costa de los innovadores. Galileo y su carácter son el ejemplo para derrotarlas.

Referencias

Benazzi, N. y D'Amico, M. (2001), *El libro negro de la Inquisición*, Bogotá, Editorial Printer Latinoamericana.

Brecht, B. (1939), *Galileo Galilei*, Bogotá, Panamericana Editorial.

Koestler, A., B. (1964, septiembre 13), "El proceso de Galileo", en *El Tiempo*, Bogotá.

Rops, D., (1964, febrero 16), "¿Qué se debe pensar en torno al asunto Galileo?", en *El Espectador*, Bogotá.

Sharratt, M. (1996), *Galileo, El desafío de la verdad*, Madrid, Ediciones Temas de Hoy.



Sitios web



Creces educación

<http://www.creces.cl/new/index.asp>

La Corporación para la Nutrición Infantil, CONIN, en Chile, desarrolla el Programa Educacional de Divulgación Científica con el apoyo de la revista *Creces*, ahora en formato virtual. Este sitio web publica contenidos con respecto a la salud, y las ciencias naturales, medioambientales y tecnológicas, dirigidos a profesores y estudiantes de educación media y superior. Dicen en su presentación: "Nuestro sitio está pensado para apoyar la labor pedagógica y satisfacer las demandas de conocimiento del público general".

Viaje a la Luna

<http://www.wechoosethemoon.org>

Mientras llegan los tiempos en que podamos planear nuestra luna de miel en la Luna, esta es una magnífica página que permite vivir y revivir, cuantas veces se quiera, un viaje a la Luna con excelentes imágenes y animaciones. Aunque su idioma único es el inglés, cualquiera puede disfrutar sin inconveniente toda la experiencia del viaje a la Luna en el Apolo 11, que cumple cuarenta años.

Astronomía

<http://www.astromia.com/tierraluna/origenluna.htm>

Para rememorar el Año Internacional de la Astronomía que acaba de pasar (2009), esta página aporta gran cantidad de material sobre el universo, el sistema solar, la Tierra, la Luna y demás temas importantes sobre astronomía.

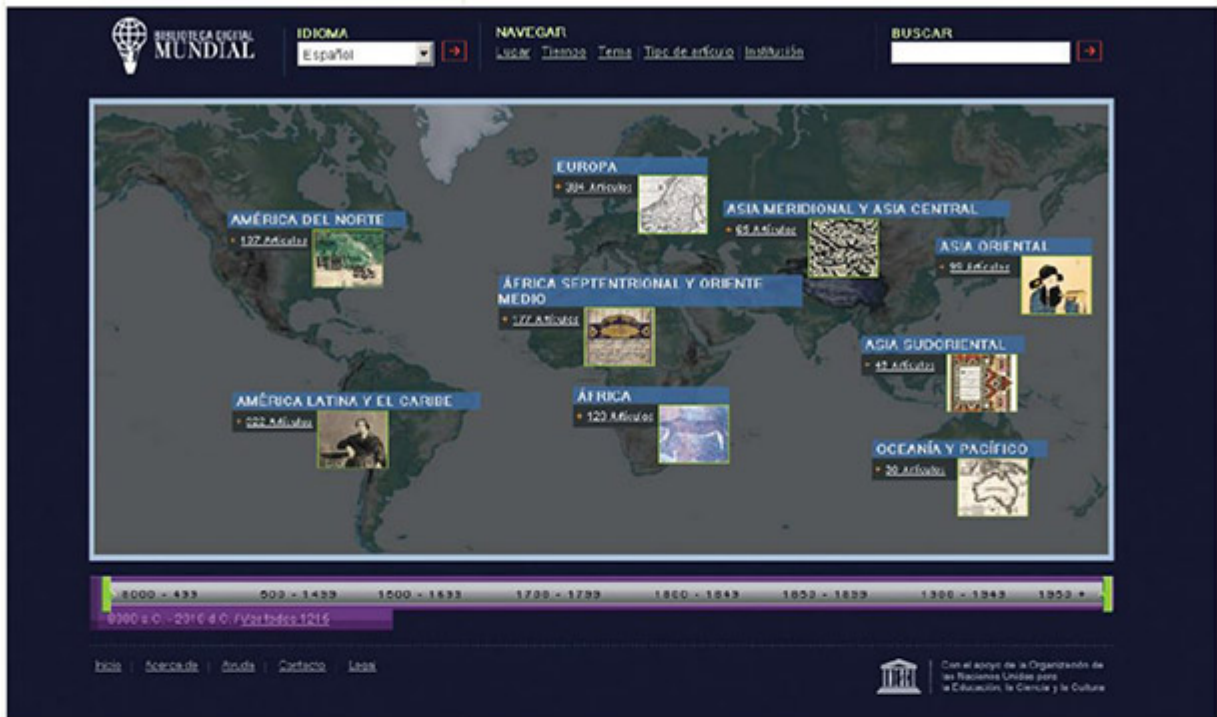


Darwin on line

<http://darwin-online.org.uk>

Como destacamos en el primer número de nuestra revista del año pasado (2009), además de la conmemoración del Año Internacional de la Astronomía, en 2009 también se conmemoró el bicentenario del nacimiento de Darwin y los ciento cincuenta años de la publicación de su obra fundamental *El origen de las especies*. Por este motivo recomendamos especialmente esta página. Contiene cerca de noventa mil imágenes electrónicas con documentos de Darwin e información sobre él mismo, custodiados por la Biblioteca de la Universidad de Cambridge, que podrá consultar cualquier persona de manera gratuita.





Biblioteca Digital Mundial

www.wdl.org



Por considerarla de gran importancia como herramienta pedagógica y de información general, queremos presentar de manera más amplia esta página de la Biblioteca Digital Mundial. De acuerdo con la información que se encuentra en su portal de Internet, sus aspectos principales son:

Misión:

La Biblioteca Digital Mundial pone a disposición en Internet, de manera gratuita y en formato multilingüe, importantes materiales fundamentales de culturas de todo el mundo.

Objetivos:

- Promover el entendimiento internacional e intercultural.
- Ampliar la cantidad y la variedad de contenidos culturales en Internet.
- Facilitar recursos a los educadores, estudiosos y el público en general.
- Permitir a las instituciones asociadas reducir la distancia digital dentro de los países y entre los mismos.

Este sitio:

La Biblioteca Digital Mundial permite descubrir, estudiar y disfrutar de los tesoros culturales de todo el mundo en un único lugar y de diversas maneras. Estos tesoros culturales incluyen, pero no se limitan a, manuscritos, mapas, libros poco comunes, partituras musicales, grabaciones, películas, grabados, fotografías y dibujos arquitectónicos.

Las herramientas de navegación y las descripciones de contenidos están disponibles en árabe, chino, inglés, francés, portugués, ruso y español. Los libros, manuscritos, mapas, fotografías y otros materiales fundamentales representan una variedad más amplia de idiomas, ya que se ofrecen en los originales.

Hitos de la Biblioteca Digital Mundial:

Junio de 2005:

James H. Billington de la Biblioteca del Congreso, propone el establecimiento de una Biblioteca Digital Mundial a la UNESCO.

Diciembre de 2006:

La UNESCO y la Biblioteca del Congreso copatrocinan una reunión de expertos con los principales interesados de todas las regiones del mundo. La reunión de expertos tiene como resultado la decisión de establecer grupos de trabajo para elaborar normas y directrices de selección de contenidos.

Octubre de 2007:

La Biblioteca del Congreso y cinco instituciones asociadas presentan un prototipo de la futura Biblioteca Digital Mundial en la Conferencia General de la UNESCO.

Abril de 2009:

La Biblioteca Digital Mundial se lanza a un público internacional, con contenido acerca de cada estado miembro de la UNESCO.



pagosonline.net 
El pago seguro en Internet

Vende fácilmente por Internet con toda tranquilidad, usando la más avanzada tecnología en detección contra el fraude electrónico.

Contáctanos ya en:
www.pagosonline.net



PBX: (+1)7 563 126



ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA

Publicación trimestral
que informa sobre los
últimos avances en
Ciencia y Tecnología
realizados en Colombia
y el mundo

Revista Innovación
y Ciencia
Un paso adelante en Ciencia y Tecnología

Cupón de suscripción

Suscripción anual para Bogotá \$50.000 • Precio número regular \$12.000 • Precio edición especial \$15.000 • Suscripción gratuita para asociados

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|--|-----------------------------------|--|---------|--------------------------------------|------------|--|--|--|--|
| DÍA | | | MES | | | AÑO | | | | | |
| NOMBRE | | | | | | SUSCRIPCIÓN POR UN AÑO | | | | | |
| DIRECCIÓN | | | | | | 4 EJEMPLARES | | | | | |
| DIRECCIÓN | | | | | | A PARTIR DEL NÚMERO | | | | | |
| TELÉFONO | | | FAX | | CELULAR | | CC. O NIT. | | | | |
| CIUDAD | | | CORREO ELECTRÓNICO | | | | | | | | |
| PROFESIÓN | | | ESPECIALIDAD | | | | | | | | |
| FORMA DE PAGO | | | EFECTIVO <input type="checkbox"/> | | | TARJETA DE CRÉDITO N° | | | ACEPTO RENOVACIÓN AUTOMÁTICA SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> | | |
| DINERS <input type="checkbox"/> | | | VISA <input type="checkbox"/> | | | MASTER CARD <input type="checkbox"/> | | | AMERICAN EXPRESS <input type="checkbox"/> | | |
| VENGE | | | CUOTAS | | | NÚMEROS DE SEGURIDAD | | | | | |
| CHEQUE <input type="checkbox"/> | | | CHEQUE N° | | | BANCO | | | | | |

Consignación a nombre de «Asociación Colombiana para el avance de la Ciencia» en:
Banco de Occidente, cuenta de ahorros N° 26880746-5 • Banco Agrario, cuenta de ahorros
N° 0230-002930-5 • Banco Popular, cuenta corriente N° 160-203196.
Envíe su comprobante de pago junto con este cupón al fax: **2216950** y **2219953** o por correo a la
sede de ACAC en Bogotá: Calle 44 N° 45- 67 Unidad Camilo Torres • Bloque C • Módulo 3
innovacionyciencia@acac.org.co
Bogotá, Colombia • Más \$5.000, costo de envío fuera de Bogotá

FIRMA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA - ACAC



PROGRAMA ENCUENTRO CON EL FUTURO

Marzo 05 a Junio 04 de (1 Semestre)

Viernes 9:00 a.m. Biblioteca Luis Ángel Arango, Entrada Libre, Previa Inscripción

V ENCUENTRO CIENCIA Y ARTE

¡Derecho a la Libertad de Expresión!

Abril 22 y 23

DIPLOMADO EN INVESTIGACIÓN FORMULACIÓN Y GESTIÓN DE PROYECTOS

DIPLOMADO EN COMUNICACIÓN DE LAS CIENCIAS EN LA EDUCACIÓN

SEMINARIO TALLER CLUBES DE CIENCIAS: Abre un espacio crea un *Club de Ciencias*

Mayo 28

VI FORO DE POLÍTICAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA: Balance de la Ley de Ciencia y Tecnología

Agosto 19

XVIII CONVENCION CIENTÍFICA NACIONAL : Ciencia, Tecnología, Sociedad + Innovación

De septiembre 29 al 1 de octubre

PREMIO NACIONAL AL MÉRITO CIENTÍFICO

Apertura Convocatoria: mayo 10

Cierre convocatoria: octubre 8

Ceremonia de Entrega: noviembre 25

PROGRAMA ENCUENTRO CON LAS CIENCIAS

Primer martes de cada mes

6:00 p.m. Entrada Libre

VACACIONES conCiencia Y CAMPAMENTOS CIENTÍFICOS

Junio y diciembre

TALLERES CIENTÍFICOS PARA TODOS

PASANTÍAS CIENTÍFICAS

CLUBES DE CIENCIAS

CORREO DE LA CIENCIA, TUTORÍAS CIENTÍFICAS

Programas que se realizan durante el año

USTED PUEDE SER PARTE DE LO QUE SOMOS ASÓCIESE

Se miembro de ACAC le permite participar en actividades científicas y tecnológicas de capacitación permanente y desarrollo profesional; estar actualizado a través de publicaciones periódicas y eventos académicos y en general acceder a los diferentes beneficios que le confiere la membresía.

MAYORES INFORMES

Calle 44 Nº 45 - 67 Bloq C, Módulo 3 Unidad Camilo Torres

Tel 3155900 - 3150728 - 2219953 - 2214625

acac@acac.org.co

www.acac.org.co

Departamento de Atención al Asociado

Tel. 221 9953 315 4009

asociados@acac.org.co