

# TRANSATLÁNTICA DE EDUCACIÓN

TRANSATLÁNTICA DE EDUCAÇÃO

## Ciencia y tecnología: hacia las sociedades del conocimiento

SALVADOR BARBOSA

JOSE LÓPEZ BARBOSA

MA. LUISA CAYO

VÍCTOR DE MONTE

ANTONIO GARCÍA BARRERO

JOSE CARLOS GARCÍA BARRERO

RODOLFO GUTIÉRREZ

GUILLERMO GUTIÉRREZ

ROBERTO TORRES DE GÓMEZ

RODRIGO DE LUNA

IRIS MARTÍNEZ

DAVID PÉREZ

RODRIGO RIVERA

EDUARDO RIVERA

RODRIGO SANCHEZ

JUAN TAGUENA

LUIS TORRES

JOSE VILLALBA

RODRIGO VILLALBA

RODRIGO VILLALBA

# Transatlántica de educación

transatlântica de educaçã



D.R. Transatlántica de Educación, *transatlântica de educaçã*. Marca registrada. Año III, volumen 3. Fecha de publicación: Septiembre 1 de 2007. Revista anual editada y publicada por Editorial Santillana, S.A. de C.V., Avenida Universidad núm. 767, Colonia Del Valle, 03100, México, D.F. Teléfono 5420 7530. Editor responsable: Clemente Merodio López. Número de Certificado de Reserva de derechos de autor 04-2006-111812074900-102. Número de certificado de Licitud de título 13608. Número de certificado de Licitud de contenido 11181. Domicilio de la publicación: Av. Universidad núm. 767, Colonia Del Valle, 03100 México, D.F. Distribuido por Editorial Santillana, S.A. de C.V., Avenida Universidad núm. 767, Colonia Del Valle, 03100 México, D.F. Impresa por Grupo CAZ, Marcos Carrillo 159, Col. Asturias, 06850 México, D.F. Prohibida la reproducción parcial o total del material editorial publicado en este número. Todos los derechos reservados. Copyright 2007. Todos los contenidos son responsabilidad de los autores.

## NÚMERO III

DICIEMBRE 2007

## DIRECCIÓN

MIGUEL ÁNGEL MORETA LARA  
CONSEJERO DE EDUCACIÓN EN MÉXICO

## COORDINACIÓN

JOSÉ ALFONSO AÍSA SOLA  
SECRETARIO GENERAL DE LA CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN

## COORDINACIÓN CIENTÍFICA

SALBADOR BARRERÁ SÁNDEZ  
UNIVERSITAT AUTÓNOMA DE BARCELONA

## CONSEJO DE REDACCIÓN

JOSÉ ALFONSO AÍSA SOLA  
CLEMENTE MERODIO LÓPEZ  
MIGUEL A. MORETA LARA

## EDITAN

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA  
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA  
SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFORMACIÓN Y PUBLICACIONES  
CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN-EMBAJADA DE ESPAÑA EN MÉXICO  
FUNDACIÓN SANTILLANA

## EQUIPO DE EDICIÓN

DIRECCIÓN DE ARTE MAURICIO GÓMEZ MORIN FUENTES  
COORDINACIÓN DE DISEÑO J. FRANCISCO IBARRA MEZA  
COORDINACIÓN EDITORIAL LAURA MILENA VALENCIA ESCOBAR  
DIAGRAMACIÓN ADRIÁN HERNÁNDEZ JIMÉNEZ  
EDICIÓN ICONOGRÁFICA CARLOS ARTURO VELA TURCOTT  
CORRECCIÓN DE ESTILO GILDA MORENO MANZUR  
PREPrensa GABRIEL MIRANDA BARRÓN  
DIGITALIZACIÓN DE IMÁGENES GERARDO HERNÁNDEZ ORTIZ

ISSN 1870-6428

NIPO: 651-07-329-5

## DISEÑO, IMPRESIÓN Y MAQUETACIÓN

EDITORIAL SANTILLANA

TRANSATLÁNTICA DE EDUCACIÓN NO COMPARTE NECESARIAMENTE LAS  
OPINIONES EXPUESTAS POR LOS COLABORADORES

## EJEMPLAR GRATUITO

Consejería de Educación-Embajada de España  
Hegel núm. 713 Colonia Chapultepec-Polanco. 11580 México, D.F.  
Tels.: (5255) 1209 7654. Fax: (5255) 5250 5463  
<http://www.mec.es/exterior/mx>  
e-mail: [consejeria.mx@mec.es](mailto:consejeria.mx@mec.es)

Consulta los números anteriores en:

<http://www.mec.es/exterior/mx/es/transatlantica/numero1.shtml>  
<http://www.mec.es/exterior/mx/es/transatlantica/transatlantica02.shtml>

# Transatlántica de educación

Diciembre 2007, Año III, Volumen 3

Artista invitado

Juan Sebastián Barberá

## transatlântica de educaçã

### BITÁCORA



4

Ciencia y tecnología: hacia las sociedades del conocimiento

MIGUEL A. MORETA LARA

Consejero de Educación de la Embajada de España en México

### FARO



8

Economía y ciencia

SALVADOR BARBERÁ SÁNDEZ

Universidad Autónoma de Barcelona

### JUNTO AL TIMÓN



18

La renovación de las políticas de educación superior, ciencia y tecnología: una tarea estratégica para la construcción de las sociedades del conocimiento

DRA. ROSAURA RUIZ GUTIÉRREZ

Secretaria de Desarrollo Institucional, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Vicepresidenta de la Academia Mexicana de Ciencias

DRA. RINA MARÍA MARTÍNEZ ROMERO

Asesora, Secretaría de Desarrollo Institucional, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)



32

Entrevista al doctor García-Bellido, Premio México de Ciencia y Tecnología 2006

JULIA TAGÜEÑA

Directora General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM

### SALA DE MÁQUINAS



38

El Gran Telescopio Canarias, un proyecto transatlántico de cooperación

FRANCISCO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

Director del Instituto de Astrofísica de Canarias



46

La fuente de luz de sincrotrón ALBA

RAMÓN PASCUAL

Presidente de la Fundación Parc Taulí



52

European Espalation Source (ESS)

JUAN URRUTIA

Presidente de la Comisión Ejecutiva del Consorcio ESS-BILBAO



60

Biocerámicas: regeneradoras de hueso y portadoras de sustancias biológicamente activas

MARÍA VALLET REGÍ

Catedrática de Química Inorgánica Universidad Complutense de Madrid



74

Aplicaciones terapéuticas de las células madre, ¿mito o realidad?

JOSÉ LÓPEZ BARNEO

Hospital Universitario Virgen del Rocío, Universidad de Sevilla, España

EN CUBIERTA



82

La fuga de cerebros. El caso de la investigación científica en economía

JAVIER RUIZ CASTILLO

Catedrático de Teoría Económica

Universidad Carlos III de Madrid



88

Humanidades en la encrucijada. El caso de la lingüística

VIOLETA DEMONTE

Catedrática de la Universidad Autónoma de Madrid



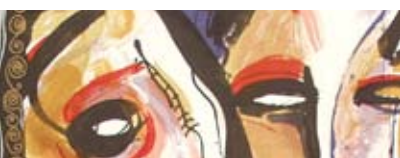
96

Apuntes sobre el reforzamiento del sistema de patentes

JUAN CARLOS GARCÍA-BERMEJO OCHOA

Universidad Autónoma de Madrid

BRÚJULA



108

Red de repositorios digitales para diseminación de información

ADOLFO GUZMÁN Y VÍCTOR-POLO DE GYVES

Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México

ESCOTILLA



116

La cooperación matemática española con Latinoamérica

MANUEL DE LEÓN

Instituto de Ciencias Matemáticas & IMDEA-Matemáticas

Consejo Superior de Investigaciones Científicas

ENRIQUE ZUAZUA IRIONDO

Departamento de Matemáticas & IMDEA-Matemáticas

Universidad Autónoma de Madrid



128

Óptica y Fotónica: contexto iberoamericano

MARÍA LUISA CALVO, ÁNGELA GUZMÁN Y LLUIS TORNER

Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas,

Universidad Complutense de Madrid/Profesora Emérita

de la Universidad Nacional de Colombia/ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas,

Universidad Politécnica de Cataluña, Parque Mediterráneo de la Tecnología



# CIENCIA Y TECNOLOGÍA: HACIA LAS SOCIEDADES DEL CONOCIMIENTO

MIGUEL A. MORETA LARA

Consejero de Educación de la Embajada de España en México

**L**A CIENCIA COMO MOTOR DE DESARROLLO DEL ENTORNO FÍSICO, ECONÓMICO Y CULTURAL... Pensemos, con el doctor Barberá, en las *posibilidades de alargar la vida humana, la disponibilidad futura de recursos energéticos, la conservación de las especies, la mejora de las fuentes de alimentación, el cambio climático, o el aprovechamiento de las nuevas tecnologías...* Esta humanísima aplicabilidad a la solución de problemas de interés general, en un marco de colaboración internacional, es parte definitoria de los proyectos de grandes instalaciones científicas, de los que aquí hay tres muestras, brillantemente expuestas por los profesores Francisco Sánchez, Ramón Pascual y Juan Urrutia: el Gran Telescopio CANARIAS (GTC), la Fuente de Luz de Sincrotron ALBA y la Fuente Europea por Espalación (European Espalation Source, ESS). Son proyectos que, al decir del doctor Urrutia, “reforzarán los pilares de la nueva sociedad europea: el conocimiento, la innovación y el diálogo ciencia-sociedad”.

Acompañan a estos trabajos, en nuestra **sala de máquinas**, el que nos brinda la doctora Vallet sobre su investigación de biomateriales aplicados a implantes, y la clarificadora pieza sobre las células madre del doctor López Barneo en la que ejemplifica magistralmente esta declaración: “el científico debe comprometerse no sólo con la divulgación de la ciencia, para facilitar que la sociedad la comprenda y acepte sus aplicaciones, sino que también debe involucrarse en el uso correcto de la misma en beneficio de todos”.

**En cubierta** aparecen tres incisivas reflexiones sobre la fuga de cerebros (doctor Ruiz-Castillo), la investigación en humanidades (doctora Demonte) y, uno de los temas menos tratados en publicaciones científicas, el sistema de patentes (doctor García-Bermejo). Para la doctora Demonte es muy posible que la internacionalización, la interdisciplinariedad y la movilidad sean claves en la renovación de los futuros estudios humanísticos: “Se habla del papel de estas disciplinas en la visión y el cambio de la sociedad, y en su convergencia hacia la estabilidad social, política y económica. Europa se plantea reflexiones de relieve sobre su identidad, sobre los cambios demográficos, sobre el cambio global, sobre el envejecimiento de la población, sobre la inmigración, sobre la desigualdad por razones de género. Es una expectativa más que razonable que las humanidades y las ciencias sociales puedan tener un papel de relieve en la estructuración de esas reflexiones”.

Atentos a la **brújula** de la información, los ingenieros del “Poli” (IPN) de México, doctor Guzmán e Ingeniero De Gyves, nos describen su biblio-

teca digital distribuida, BiblioDigital, para repositorio, indexación y consultas de documentos electrónicos.

Con un criterio de evaluación, sin olvidar la visión transatlántica, en la **escotilla** se aborda el estado de la cuestión de la cooperación en Matemáticas (doctor De León y doctor Zuazua) y en Óptica/Fotónica (doctora Calvo, doctora Guzmán y doctor Torner). Estos tres físicos reclaman la necesidad de una atención prioritaria de las instituciones y empresas privadas que pueden beneficiarse del extraordinario potencial de las tecnologías concernidas por las ciencias de que se ocupan en su artículo.

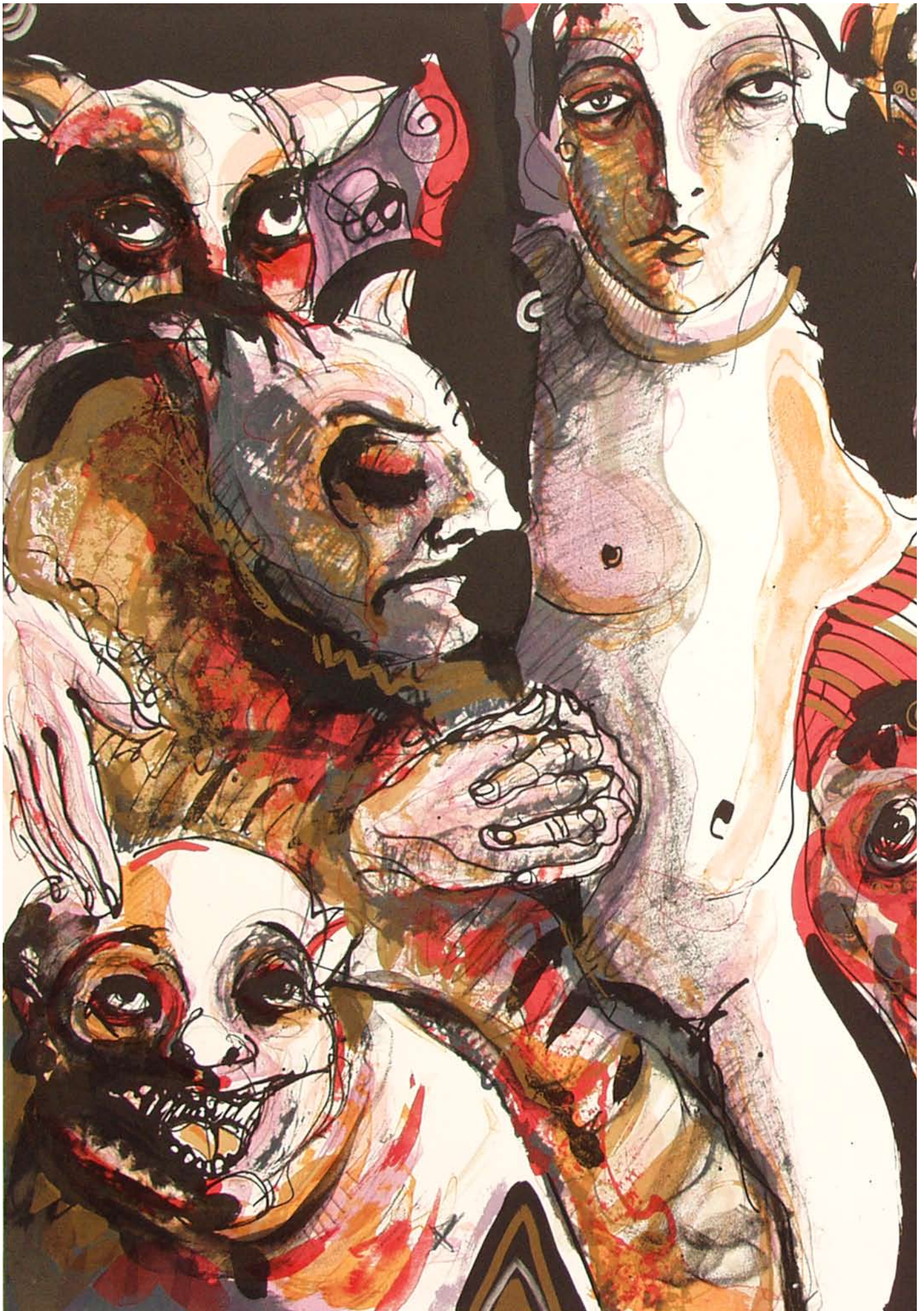


Concordamos con la doctora Ruiz y la doctora Martínez de la UNAM de México, **junto al timón**, en la idea de que la educación, la ciencia y la tecnología “son los catalizadores hacia sociedades sustentables, más justas, democráticas y equitativas” y que con información, conocimiento e innovación “las naciones pueden incrementar su capacidad para prevenir y resolver conflictos, constituyéndose en auténticas sociedades del conocimiento”. A partir de una comparativa de datos concluyen en la “existencia de una brecha multidimensional que da cuenta de un panorama de rezago entre los países iberoamericanos”. Reclaman ante esta situación una mayor imbricación entre la investigación y la educación superior: “De otro modo, las asimetrías en la ciencia, la tecnología, las humanidades y la educación superior se pronunciarán cada vez más, haciéndose evidentes en aspectos relativos a los indicadores internacionales que dan cuenta del desarrollo social y económico de los países”.

El Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República mexicana instituyó en 1990 el Premio México de Ciencia y Tecnología para estimular el enlace de las comunidades científicas de los países de Iberoamérica. El premio se concede cada año a una persona de reconocido prestigio profesional que haya contribuido de manera significativa al conocimiento científico universal o al avance tecnológico. La edición de 2006 ha recaído en el científico español Antonio García-Bellido, quien ha accedido en tan feliz ocasión a responder a las cuestiones que le plantea la doctora Tagüeña de la UNAM para nuestra entrevista.

Finalmente, alumbra el **faro** un discurso del doctor Barberá Sánchez, en el que menudean opiniones sabrosas sobre temas de su especialidad económica, sin desdeñar muchas otras acerca de la ciencia: “las leyes, las instituciones, los condicionamientos económicos, las políticas públicas y las formas de gobierno de las instituciones son, entre otras, las que marcan los canales dentro de los cuales la ciencia debe ir progresando hasta llegar a influir en nuestra vida diaria”.

La Fundación Santillana y la Consejería de Educación de España en México queremos agradecer a todos los científicos y autores el haber despedido de sus valiosas ocupaciones –proyectos, tareas docentes, trabajos académicos e investigaciones– tiempo suficiente para embarcarse en esta Transatlántica. Gracias también a Juan Sebastián Barberá, creador inagotable, que con la ciencia de su arte ilustra nuestra revista. Y, por último, muy especialmente, gracias al doctor Barberá Sánchez, *primum inter pares*, quien creyó en este proyecto y le dio aliento: atendió cientos de correos, leyó, sugirió, corrigió y tradujo, con jovialidad, paciencia y generosidad sin límite. Gracias al trabajo de todos ellos y a ciertas dosis de chiripa o *serendipity*, que, como dice el escritor mexicano Jorge Hernández –empeñado en convencer a la Real Academia de la Lengua de incluirla en nuestra lengua como *serendipia*–, incluye entre sus acepciones “los laberintos mágicos de los amores y amistades a primera vista, los descubrimientos milagrosos de nuestra memoria y no pocos recovecos ignotos de la imaginación”, hemos conseguido concluir felizmente este tercer viaje de Transatlántica de Educación.







# ECONOMÍA Y CIENCIA

SALVADOR BARBERÀ SÁNDEZ  
Universidad Autónoma de Barcelona

EL ARTÍCULO SE REFIERE, EN PRIMER LUGAR, A LA IMPORTANCIA DE LA CIENCIA EN la actividad económica y, de manera recíproca, a los límites y estímulos que la organización de la economía puede imponer y ejercer sobre el desarrollo científico de un país, de un continente, o del mundo en general. En segundo lugar, invita a los estudiantes de economía, y a los economistas en general, a interesarse por estas cuestiones; asimismo, señala posibles nuevos campos de dedicación profesional. En tercer lugar, indica la conveniencia de estimular contactos entre todos aquellos que forman la universidad, de romper las fronteras de comunicación que no sólo nos aíslan en el aspecto físico, sino, sobre todo, intelectual, de otros miembros de la comunidad universitaria y de sus conocimientos.

SALVADOR BARBERÀ SÁNDEZ ES CATEDRÁTICO DE ECONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD Autónoma de Barcelona y profesor afiliado a la Barcelona Graduate School of Economics, donde dirige un *Master* sobre Economía de la Ciencia y de la Innovación; PhD en Economía por la Northwestern University. Es *fellow* de la Econometric Society y de la Asociación Española de Economía. Receptor del Premio Rey Juan Carlos de Economía, del Premio de la Fundació Catalana per la Recerca i la Innovació y Doctor Honoris Causa por la Universidad Pablo de Olavide. Como investigador, se ha centrado en los campos de la economía pública, la teoría de la utilidad, la teoría de juegos y el análisis de incentivos. De manera más específica, es experto en teoría de la elección social, diseño de mecanismos no manipulables y análisis de métodos de votación. Ha coeditado en *Handbook of Utility Theory*, y publicado en *Econometrica*, *Journal of Political Economy*, *Quarterly Journal of Economics*, *Review of Economic Studies*, *Journal of Economic Theory*, *Games and Economic Behavior*, o *Social Choice and Welfare*, entre otras revistas. Fue presidente de la Social Choice and Welfare Society y de la Southern European Economic Association. Ha sido miembro de los consejos de diversas sociedades científicas, como la Econometric Society, la Social Choice and Welfare Society y la Society for the Advancement of Game Theory. Fue director de la *Revista Española de Economía* y de su su-

cesora, la *Spanish Economic Review*. Ha formado parte de los consejos editoriales de diversas revistas, entre ellas *Econometrica*, *Mathematical Social Sciences* o el *Journal of Public Economic Theory*. Fue secretario general de Política Científica y Tecnológica del gobierno de España entre 2004 y 2006. Antes, fungió como el primer director de la Institució Catalana de Recerca i d'Estudis Avançats (ICREA), institución creada por la Generalitat de Catalunya para atraer a científicos de alto nivel.

# ECONOMÍA Y CIENCIA<sup>1</sup>

SALVADOR BARBERÁ SÁNDEZ  
Universidad Autónoma de Barcelona

**L**AS SIGUIENTES SON ALGUNAS REFLEXIONES EN TORNO A la relación entre economía y ciencia que he comenzado a hacer, que confío en seguir desarrollando y que deseo compartir con mis lectores. De momento son muy generales y me excuso ante aquellos colegas que ya han pensado durante un tiempo en estas direcciones y quienes, con seguridad, encontrarán mis comentarios demasiado simples. Espero, no obstante, poder continuar mi trabajo en el tema en el futuro y enriquecer mi conocimiento.

Comenzaré por aclarar aquello sobre lo que no quiero hablar. No me propongo argumentar que la economía es una ciencia. Sin lugar a dudas, una parte importante de lo que hacemos los economistas es ciencia, otra es ingeniería, y otra, arte, y aún más, artesanía. En tiempos antiguos, cuando los economistas nos sentíamos menospreciados y a la defensiva, hacía falta aclarar que muchas de estas actividades tienen fundamento científico. Me parece que ya no hace falta, porque nuestra profesión, en toda su diversidad, goza de ámbitos de actuación muy extendidos: basta con que cada uno de nosotros encuentre el sitio que más convenga a su forma de ser o a sus intereses personales, sin pedir perdón a nadie.

Me propongo, en primer lugar, abordar la importancia de la ciencia en la actividad económica, y, en forma recíproca, de los límites y

estímulos que la organización de la economía puede imponer y ejercer sobre el desarrollo científico de un país, de un continente o del mundo en general.

En segundo lugar, invito a los estudiantes a que se interesen en estas cuestiones como economistas. Mi intención es contribuir a despertar su curiosidad con respecto a las posibilidades que nos brinda la ciencia en las diferentes dimensiones en que, como he comentado, se despliega nuestra profesión. A los más inclinados al estudio y a la reflexión, planteo que hay abiertas muchas cuestiones relevantes, teóricas y empíricas, en el análisis de las relaciones entre ciencia y economía. Para los más inclinados a la acción, puede ser interesante insistir en que conocer los espacios de interacción entre ciencia y economía abre nuevos horizontes profesionales atractivos y hasta ahora poco explorados. La administración de la ciencia, tanto desde el sector público como de las empresas, me parece una actividad de gran futuro. Y la puesta en marcha de empresas innovadoras basadas en aplicaciones creativas de la ciencia también puede ser una fuente muy prometedora de beneficios individuales y colectivos para aquellos que tengáis un carácter más emprendedor.

En tercer lugar, me permitirá alguna reflexión sobre la conveniencia de estimular más los contactos entre todos aquellos que formamos la universidad, de romper las fronteras de comunicación que no sólo nos aíslan en el aspecto físico, sino, sobre todo, intelectual, de otros miembros de la comunidad universitaria y de sus conocimientos.

Comienzo, pues, por el primer punto. Las ciencias, en un sentido amplio, y las ciencias experimentales merecen la atención del economista. En una dirección, porque la ciencia es el motor del progreso social y económico. En la otra, porque las circunstancias en que se produce ciencia, los canales institucionales y económicos por donde discurre, pueden estimular o frenar ese progreso y marcar la dirección de sus aplicaciones.

<sup>1</sup> Éste es el texto, prácticamente sin cambios, de la conferencia inaugural que dirigí a los estudiantes de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Autónoma de Barcelona en octubre de 2006. Me atrevo a publicarla pensando que el tema puede tener interés para un público más amplio, pero me excuso ante el lector por el tono de algunas recomendaciones y comentarios que sin duda reflejan el origen del texto.

## LA CIENCIA COMO MOTOR

Comenzaré por la dirección más estimulante a mi entender: la que nos habla del potencial de la ciencia para ayudar a la humanidad a hacer frente a los retos más decisivos. Pensemos en grandes cuestiones abiertas, como las posibilidades de alargar la vida humana, la disponibilidad futura de recursos energéticos, la conservación de las especies, la mejora de las fuentes de alimentación, el cambio climático, o el aprovechamiento de las nuevas tecnologías, entre otras. Cada una de estas cuestiones supera el ámbito económico, pero lo incluye. De los caminos que se tomen en relación con cada una dependerá el tipo de vida de las sociedades del futuro. Y estos caminos deberán venir marcados, en su origen, por el avance de los conocimientos científicos.

Consideremos, por ejemplo, el problema de la disponibilidad energética. En la década de 1990 el consumo mundial de energía se basaba en 43% en petróleo, 22% en carbón, 20% en gas, 8% en nuclear, 5% en hidráulica, y sólo el 2% restante en otras fuentes de energía. Cálculos moderados permiten estimar que este consumo habría de triplicarse en algún momento del siglo XXI, y esto plantea diversos temas sobre la disponibilidad de recursos, pero también con respecto a las consecuencias medioambientales y a la seguridad de los suministros. Las estimaciones de reservas de petróleo apuntan a un agotamiento en 50 años, y las de carbón en unos 200 años. Si bien sabemos que estas estimaciones son aproximativas, el orden de magnitud es muy pequeño, en comparación con otras fuentes alternativas: las reservas de combustibles por fisión permitirían generar energía en los niveles deseados durante miles de años. Pero esto tampoco es mucho en comparación con las posibilidades de la energía solar, que todavía nos llegará durante algunos billones de años, los mismos que nos prometen los físicos de fusión si llegan a controlar estos procesos en niveles industriales.

Hay muchas otras opciones abiertas y cada una se enfrenta con problemas que requieren más y mejores conocimientos científicos. La energía solar térmica o fotovoltaica, la eólica, la de hidrógeno, son opciones para un futuro que no llegará si no sobrevienen diferentes avances científicos y de ingeniería que permitan, entre otras cosas, almacenar con eficiencia la energía producida y obtener mejoras sustanciales en los rendimientos. Tampoco es menospreciable la opción de mejorar las fuentes que ahora predominan y seguir en busca de la forma de poder acceder a costos razonables a los depósitos naturales que hoy día todavía son inexplorables, haciendo crecer, por decirlo así, las reservas. De igual forma, la energía nuclear basada en la fisión pasa por momentos de gran impopularidad en muchas partes del mundo, pero no se debería dejar de trabajar para saber cómo reducir los diversos tipos de riesgos que comporta.

En todos estos casos hablamos de mejorar procesos conocidos en esencia, que querríamos hacer más eficientes, más seguros, más rentables. Hablamos de progresos científicos y de ingeniería basados en el progreso normal del conocimiento, útiles pero tal vez no demasiado espectaculares.

Pero la ciencia también ofrece, en este campo de la energía, horizontes más inciertos y polémicos, y a la vez más extraordinarios, que permiten soñar en la solución, de golpe, de los problemas energéticos de muchas generaciones. Este toque más futurista viene asociado a la energía producida por fusión. Y es que, en este caso, todavía falta mucha ciencia básica antes de que se logre saber si las expectativas de utilizar esta fuente de energía tienen un fundamento sólido. Ya existen dispositivos experimentales en los que se han conseguido reacciones de fusión, al calentar materiales como el deuterio y el tritio a temperaturas de 100 millones de grados. Pero se trata de ver si

se puede conseguir sostener un proceso de fusión durante tiempo prolongado, en condiciones seguras y que generen más energía que la necesaria para dar lugar al proceso. Porque, hasta ahora, se necesita más de la que se obtiene.

Hay científicos importantes que son muy escépticos. Incluso se bromea que una de las constantes de la física es el plazo que siempre dan los físicos de fusión para poder cumplir sus promesas, plazo que se mantiene invariablemente en 30 años. Pero la promesa es golosa y hay también otros científicos convencidos de las posibilidades de éxito. Para ponerlas a prueba, se está poniendo en marcha un proceso cooperativo internacional, el Proyecto ITER, en el que participan, en conjunto, Europa, Estados Unidos de América, Japón, China, India, Corea y Rusia.

Después de largas negociaciones sobre el emplazamiento, los costos para cada país y las ventajas para cada uno, en términos de contratos industriales y otros beneficios, están a punto de implantarse los primeros pasos para la construcción en Cadarache (Francia), de un dispositivo. Éste tardará unos 10 años en construirse y después de unos años de funcionamiento debería permitir decidir si se afronta una nueva fase, a partir de su vigésimo año, para construir, hacia 2030, un prototipo que ya fuera capaz de generar energía consumible, en fase de pruebas.

El caso de ITER constituye un ejemplo de cómo la ciencia puede ser fuente de esperanzas para orientar la solución de problemas de ámbito universal. Y también representa un caso en que el trabajo científico inicia el vuelo, mira a largo plazo, y juega un papel esencial para promover la colaboración internacional orientada a la solución de problemas de interés general. Hay otros igualmente fascinantes. A punto de acabarse la construcción del Gran Telescopio de Canarias, que será, con sus 10 metros de diámetro, uno de los más grandes del mundo, ¡ya se están reuniendo comités internacionales para comenzar a decidir si el paso siguiente es el telescopio de 100 metros, o si sería mejor pensar en uno intermedio, de 30 metros, para la primera mitad del siglo!

Pero tampoco hace falta dar una imagen idílica de la ciencia como fuente de armonía universal. Si la ciencia genera riqueza, los economistas tenemos que esperar que también induzca una fuerte competición para obtener beneficios. El hecho es que, incluso en la búsqueda de soluciones que nos interesan a todos, como la prolongación de la vida, conviven procesos cooperativos



con otros fuertemente competitivos. Tal competencia ocurre entre países y regiones, y también entre empresas. Esto es porque, por un lado, los beneficios del progreso científico no se extienden de forma homogénea entre las diferentes regiones y países del mundo. Por el contrario, es una creencia común que el crecimiento absoluto y relativo de las diferentes economías, la distribución y características de las actividades en que se base cada una de ellas, dependen de sus capacidades para generar nuevo conocimiento, y para beneficiarse de él. Entonces, la ciencia puede ser una actividad estratégica diferenciadora entre países y por esto es objeto de políticas concretas, tendientes a promover la investigación en el propio territorio.

Por otro lado, los desarrollos científicos no se traducen automáticamente en aplicaciones de interés económico, ni tampoco lo hacen de forma homogénea en todos los campos, ni a la misma velocidad, ni para los mismos canales de transmisión. Pero al final de la cadena, la comercialización de los productos que, en forma directa o remota, resultan de nuevos descubrimientos, son llevados a término, en la mayoría de los casos, por empresas privadas guiadas por la posibilidad de hacer beneficios. De ahí que no sean sólo los países los que compitan entre ellos para beneficiarse de la prosperidad que pueda aportar una ventaja científica, sino que, sobre todo, sean las empresas las que hayan de competir en los mercados de base científico-tecnológica.

De hecho, no es que haya una ciencia cooperativa y otra competitiva; más bien, la naturaleza de los descubrimientos esperados determina en gran medida si se avanza en una u otra dirección. Aquellos desarrollos que son más básicos, de rentabilidad incierta y a largo plazo, son los que acaban por financiarse con recursos públicos y con una mirada más amplia hacia el progreso general del conocimiento. A medida que nos acercamos a descubrimientos de posible aplicación inmediata y económicamente explotables, entran en juego las consideraciones de mercado y los elementos competitivos. En cualquier caso, no hay una relación sencilla que permita identificar las iniciativas estatales con actitudes de cooperación y las empresariales con instintos de competencia. Los financiadores públicos también compiten para favorecer a sus países o incidir positivamente en sus ámbitos de influencia; asimismo, promueven la competencia entre equipos de investigación, como fuente de eficiencia. Las empresas, cuando hay cuestiones de interés que no pueden resolver por ellas mismas, también exploran mecanismos cooperativos, como la creación de plataformas tecnológicas en los niveles estatal y europeo.

No se trata de lamentarse de esta mezcla de motivaciones, sino de asegurarnos de que la cooperación y competencia, dos motores esenciales en todos los ámbitos de la vida social, y en especial dentro de la vida económica, se combinen de la forma más eficiente, mediante instituciones y políticas que proporcionen los mejores mecanismos para asegurar que progreso científico y bienestar vayan de la mano.

La propia Unión Europea se plantea la necesidad de dar un nuevo impulso a sus estructuras productivas al basarlas cada vez más en el conocimiento, la tecnología y la innovación. Es la estrategia de Lisboa, resultado de un análisis del retroceso europeo con respecto a Estados Unidos y el Japón en muchos indicadores de progreso, y de la conciencia de que nuevos gigantes como China e India pueden entrar con fuerza en una competencia ante la cual Europa debe buscar sus puntos más fuertes. Esta estrategia empezó a perfilarse en el Consejo Europeo celebrado en Lisboa en 2000, y se tradujo en objetivos cuantitativos en el Consejo de Barcelona, efectuado en 2002: se pretende que Europa llegue a invertir 3% del PIB en 2010, cuando toda-

vía no llega, como media, a 2% y se aspira a que los dos tercios de este gasto lo haga el sector privado. Los mecanismos previstos para lograrlo son relativamente poco dirigistas: la Comisión Europea propone un nuevo programa marco de apoyo a la I+D, un nuevo programa de estímulo a la innovación y un seguimiento de los procesos llevados a cabo por los diferentes países, que procuran coordinarse para alcanzar aquellos objetivos comunes.

Y es que, en efecto, cada país parte de situaciones diferentes. España, y también Cataluña, aunque un poco menos, está lejos de las medias europeas en todos los indicadores, y muy en especial en lo referente a la financiación privada y al número de patentes. Es por este motivo que el gobierno español ha acelerado las inversiones en I+D y generado políticas de estímulo bastante enérgicas, algunas de las cuales se han recogido en un plan de choque denominado Ingenio 2010.

También en Cataluña tenemos un plan de investigación donde se proponen objetivos de progreso, partiendo de una situación ligeramente mejor que la media española, pero todavía por debajo de la europea de partida, por no hablar de los objetivos de Lisboa, que nos quedan a todos muy lejos.

En fechas recientes, Cataluña ha logrado buenos impulsos en ciencia. Una prueba de ello son las grandes instalaciones científicas. Ya mencioné ITER y los grandes proyectos en astrofísica, que suelen ser fruto de la cooperación internacional. Otros proyectos, a pesar de su envergadura, son asequibles a países individuales, e invertir en ellos puede ser una buena estrategia para obtener ventajas competitivas. Tal es el caso de una gran instalación que ya se está construyendo en el entorno de la Universidad Autónoma de Barcelona, el sincrotrón ALBA, y que debería entrar en funcionamiento en 2009. Un sincrotrón es una fuente de luz de gran intensidad, obtenida por aceleración de electrones en torno a un anillo que, en nuestro caso, tendrá 268 metros. Alrededor del anillo se situarán siete líneas (o salidas) de luz, que es donde, de hecho, se llevarán a cabo los experimentos, al servicio de diferentes grupos de investigación en diversas áreas, sobre todo para el estudio de materiales y de varias estructuras de interés biomédico, como es el caso de las proteínas. Se espera que no sean sólo los grupos de investigación básica los que se beneficien de esta instalación, sino también las empresas de diferentes sectores. Y que el sincrotrón puede tener usuarios de distintas partes del mundo, contribuyendo de este modo a la vigorización de nuestro tejido científico y tecnológico. No es la única inversión ambiciosa en Cataluña, si bien es la mayor. Otras instalaciones recientes y con notoriedad internacional son dos centros dedicados a formas avanzadas y diferentes de computación masiva: la supercomputadora Mare Nostrum, ubicada en la Universidad Politécnica de Cataluña, y el Puerto de Información Científica, este último también situado en el campus de la UAB.

### LIMITACIONES Y ESTÍMULOS A LA CIENCIA, Y A LA DIFUSIÓN Y APLICACIÓN DE SUS CONOCIMIENTOS

Como comenté al principio, la ciencia puede jugar un papel esencial para superar las limitaciones de nuestra vida actual. Pero también, de manera recíproca, es influida por las condiciones institucionales bajo las que se realiza.

No hay un camino inevitable por el cual los avances científicos y tecnológicos deban determinar las opciones de futuro. La elección de un camino, entre los muchos otros posibles, depende de restricciones institucionales y de políticas deliberadas. Y, una vez iniciado, puede hacerse muy difícilmente

reversible, incluso cuando hay alternativas viables y en principio más atractivas. De esto saben mucho los historiadores económicos, quienes a menudo se refieren, como un caso extraordinario de irreversibilidad, a la configuración de los teclados de las computadoras. La razón por la cual éstos comienzan, por arriba y a la izquierda, con QWERTY, y por arriba a la derecha con POIUY, es porque así lo hacían los teclados de las antiguas máquinas de escribir. Y esto se debía a dos razones que hace mucho tiempo dejaron de tener sentido. Una, repartir las letras de manera que las varillas que, una vez presionado el teclado, llevaban las letras hasta el papel, se engancharan lo menos posible. La otra, todavía más peregrina, porque la marca Typewriter, una de las primeras en competir por el mercado de máquinas de escribir a finales del siglo XIX, y que acabó por dar el nombre a la máquina en inglés, encontró que sus vendedores, con esta configuración concreta, podían deslumbrar a los posibles clientes escribiendo el nombre de la marca a una gran velocidad, haciendo uso sólo de la primera fila. Un siglo y medio más tarde, ¡utilizamos aún un teclado bastante irracional debido al éxito de aquella campaña publicitaria encubierta!

Pasemos a un ejemplo más cercano. En el caso de las fuentes de energía, está claro que los caminos que se sigan no dependerán únicamente de las posibilidades abiertas por la ciencia y por la técnica. Las condiciones de mercado, y más en concreto el precio del petróleo, tendrán mucho que decir, así como la evolución de las actitudes ciudadanas con respecto a las opciones nucleares.

Sea como sea, antes de poder escoger caminos, se deben dibujar las opciones, hay que hacer ciencia. Y aquí menciono algunas de las cuestiones a las que debe hacer frente un país, o una entidad supranacional, cuando se plantea estimular la ciencia dentro de sus ámbitos.

De entrada, deberá aclarar si, para favorecer el progreso de un país, le conviene dar apoyo a la ciencia, en general, o si es mejor ser selectivo. Mi impresión es que más vale favorecer actividades concretas en las que el país se sienta mejor dotado, o quiera invertir. Es una decisión difícil, escoger siempre lo es, pero con seguridad ésta es una primera encrucijada donde se puede distinguir entre los gobiernos que saben dónde van y los que lo ignoran. En Cataluña tenemos ejemplos recientes de esfuerzos en general bien orientados. La decisión de construir infraestructuras importantes, como el sincrotrón ALBA, o la supercomputadora Mare Nostrum, la creación

de centros altamente especializados en fotónica, telecomunicaciones, regulación genómica, entre otros; o los esfuerzos para coordinar las actuaciones de empresas, hospitales y centros de investigación básica dentro de una biorregión, son ejemplos de actuaciones selectivas. La única reserva ante ellas es que nunca deberían cerrar la puerta a otras buenas propuestas nuevas, y que deben existir mecanismos que permitan detectar y apoyar otras actividades que puedan des-puntar en cualquier momento.

Una cuestión diferente es si es necesario orientar la investigación hacia la resolución de problemas definidos, o bien si se debe dejar grandes márgenes a la creatividad, dada la experiencia frecuente de descubrimientos en apariencia casuales.

Éste es un viejo debate sobre el que tenemos evidencias contradictorias. Algunos grandes descubrimientos son el producto deliberado de una planificación detallada. Otros, en cambio, son el resultado de aquello que en inglés se llama *serendipity*, la facultad de hacer descubrimientos felices e inesperados. La dualidad entre estos dos tipos de descubrimientos la ilustró de manera magistral el Premio Nobel de Física Sheldon Glashow en un ensayo muy rico en ejemplos. Mencionaré sólo uno de los muchos en que, de hecho, la misma persona hizo descubrimientos de uno y otro estilo.

William Herschel fue uno de los más grandes astrónomos de la historia y catalogó una gran cantidad de nebulosas, gracias a un plan de investigación sistemático y a su capacidad para construir el telescopio más potente de su tiempo. De pasada, también descubrió el planeta Urano, dos de sus lunas y dos satélites de Júpiter.

Pero, junto con estos descubrimientos sistemáticos, hizo otro por completo fortuito (*serendipitous*). Quería investigar si el calentamiento de los rayos solares se asociaba con alguno de los colores en que se descompone la luz. Colocó termómetros en cada una de las bandas de color generadas por un prisma, para medir la temperatura de cada una. Además, situó otros en diversos puntos fuera del espectro luminoso, para controlar la temperatura. Y así vino el hallazgo. El termómetro de control que estaba más cerca del rojo se calentó más que ningún otro. Es así como en 1800, de manera inesperada, Herschel descubrió los rayos infrarrojos.

Hace poco que conozco esta historia, y no puedo decir que haya cambiado mis opiniones drásticamente. Siempre he tenido un cierto rece-

lo hacia el dirigismo científico, por mucho que entienda que en determinados proyectos hace falta saber a dónde se quiere llegar. Pero, en general, soy partidario de dejar mucha libertad al científico, exigiéndole sobre todo calidad, medida por la repercusión internacional de su trabajo. Una buena ciencia aplicada y orientada sólo puede emerger del sustrato de una gran ciencia básica, dejada en libertad.

No creo que valga la pena, para un país, especializarse en ciencia mediocre. Por ello, debe asegurarse de que las instituciones y los investigadores que trabajan se vean estimulados por una buena estructura de incentivos para buscar la excelencia. Yo creo que los economistas podemos ayudar, y mucho, a analizar esta cuestión.

Dejadme hacer un listado de preguntas que se plantean de entrada, en cuanto alguien piensa que la finalidad de una política científica local es, al menos en parte, hacer que el propio país salga ganando. ¿Quiere esto decir que debemos juzgar nuestra ciencia por su capacidad de inducir actividad económica? ¿Por su capacidad de generar empresas de base científica y tecnológica? ¿Por su capacidad de diálogo y de comunicación con las empresas que necesiten el conocimiento científico para seguir adelante? ¿Queremos que la investigación atañe al sector productivo? ¿Que el sector privado se haga cada vez más cargo de ella?

Uno de los discursos más extendidos entre quienes se dedican al análisis de la ciencia española se concentra en la escasa actividad de investigación por parte de las empresas, en el bajo número de patentes que se derivan de nuestra ciencia básica, en la poca atención de los investigadores para aspectos aplicados, a las dificultades de relación entre centros de investigación y empresas. Éstos son hechos probados. Quizás el caso concreto de Cataluña es un poco menos grave, pero también se ajusta a los mismos trazos generales.

El problema es que, a menudo, aquella escasez acaba por traducirse en argumentos contrarios a la ciencia básica, o incluso lleva a poner en duda la capacidad de los científicos para orientar su propia investigación. Y esto no me parece ni justo ni productivo. No es justo, porque los científicos españoles, en muchos ámbitos, incluso en economía, han contestado con éxito al reto que se les hizo, hacia la década de 1980, de publicar cada vez más y mejor en ámbitos internacionales. En cambio, y con excepciones muy meritorias, es el sector privado el que no ha acabado de hacer los deberes. Y el argumento tampoco es productivo, porque olvida la capacidad demostrada de los científicos para adaptarse a nuevas demandas y estímulos, siempre que sean coherentes y bien expresados. Si no tenemos mejor conexión entre ciencia e industria, tendremos que analizar por qué a la industria le ha costado tanto hacer investigación, y a la vez seguir estimulando, del lado de los investigadores, una actitud más positiva al acercamiento con el mundo empresarial. Pero me parecen inaceptables los diagnósticos que, a partir de las carencias existentes, declaran que hay demasiada ciencia básica. Por el contrario, hay todavía demasiado poca, y de calidad mejorable, si se quiere llegar a posiciones de élite, que son las que en realidad cuentan. Esto no niega la necesidad de resolver el problema de la poca inversión empresarial, o la necesidad de establecer puentes: pero nunca desde una óptica de culpabilización exclusiva de los científicos.

Sin querer, y de forma un poco abrupta, he sustituido aquello que debería haber sido una exposición pausada de cómo las instituciones influyen en el desarrollo de la ciencia por una especie de declaración apasionada en favor de la ciencia básica. Se me ha escapado un poco, pero no lo borraré, porque me parece que hay que defenderla. Aun así, aprovecharé para reto-

mar el hilo y destacar algunas de las cuestiones que han surgido un tanto en desorden. Comenté ya que el reparto de la tarea investigadora entre el sector público y el privado no es un dato inamovible, sino una variable, que puede marcar la orientación de la investigación. Sugerí que los incentivos son importantes tanto para las instituciones públicas como para las privadas, y que la calidad y dirección de la investigación que promueven pueden depender de diversas variables. Algunas de éstas son legales: por ejemplo, la protección que cada legislación proporciona a las empresas que financian investigación y a los investigadores que consiguen hacer descubrimientos. Las normas y las prácticas sobre patentes, por ejemplo, pueden marcar diferencias clave entre estructuras de incentivos bajo situaciones por lo demás similares. También operan sobre la ciencia variables económicas: por ejemplo, las universidades, donde se genera gran parte del conocimiento científico, no siempre se ven recompensadas por hacer la mejor investigación. En España, su financiamiento tiene más que ver con su función docente que con su papel investigador. Eso las sitúa, como centros de investigación, en desventaja con respecto a instituciones de otros países donde la investigación es prioritaria. De igual manera inciden en el desarrollo de la ciencia las formas de organización y de gobierno de las instituciones: un mismo proyecto puede evolucionar de maneras muy distintas dentro de una empresa, de un centro de investigación especializado, o en el seno de una organización amplia y con pocos mecanismos de control. Dentro de este apartado de organización, también aparecen diferencias en el rendimiento y la orientación de la ciencia basadas en la existencia, o no, de intermediarios especializados en la transferencia del conocimiento. Cerca de las universidades aparecen parques científicos y tecnológicos, dedicados a acoger a grupos de investigación y de empresas que quieran interaccionar unas con otras, y a favorecer la creación de nuevas empresas basadas en los conocimientos generados en el entorno, integrándolas en viveros de empresas. Por su parte, las pequeñas y medianas empresas interesadas en incorporar tecnologías e innovaciones basadas en la ciencia también se dotan de canales para impulsar en conjunto los estudios de interés para todo su sector. Éste es, en particular, el papel de los centros tecnológicos.

En definitiva, y sin ser exhaustivo: las leyes, las instituciones, los condicionamientos económicos, las políticas públicas y las formas de gobierno de las instituciones son, entre otros, los factores que marcan los canales dentro de los cuales la ciencia debe progresar hasta llegar a influir en nuestra vida diaria.

### **EL PAPEL DEL ECONOMISTA COMO OBSERVADOR, COMO CONSEJERO Y COMO ACTOR**

El listado de las diferentes formas en que la ciencia se ve condicionada resulta una primera indicación sobre las diferentes oportunidades que se nos abren, como economistas, si nos acercamos a esta problemática y la tomamos como objeto de estudio.

Pensemos en las patentes, por ejemplo. En principio, son el reconocimiento de unos derechos de propiedad que provienen de haber descubierto una nueva forma de hacer, basada en nuevos conocimientos. Aparecen como una garantía para los inversionistas, y en muchos ámbitos representa una carrera con aquellos competidores que también quieren llegar al mismo puerto. La patente es necesaria para dar incentivos a la inversión





en investigación y debe proporcionar la debida protección. Pero, una vez concedida, podría ser también un freno para progresos posteriores, si quien la tiene pierde incentivos para seguir mejorando el conocimiento durante el tiempo en que se beneficia de derechos de monopolio; además, puede evitar el progreso de otros. Hay debates sobre este tema, bien vivos, entre los economistas, favorecidos por la variedad de tecnologías posibles, que acaso sugieran la posibilidad de tratamientos diferenciados según campos de actividad. ¿Puede ser que lo que es válido para la industria farmacéutica no lo sea tanto para las tecnologías de la información? Hay muchas personas con mayor experiencia que yo, y con fuertes opiniones sobre el tema. Yo me limito a señalar, como ejemplo, que la mirada del economista es imprescindible en el debate sobre patentes y, por tanto, en el estudio de una pieza clave de la política científica, como es el estímulo al sector privado para invertir en ciencia.

Las patentes son sólo un ejemplo de cómo se pueden incentivar comportamientos que favorezcan la conexión entre los caminos de la ciencia y los intereses sociales. También me he referido a la variedad de formas alternativas en que se puede organizar la investigación, cada una de las cuales comporta formas diferentes de remunerar a los investigadores y diferentes estímulos para invertir en ciencia. Algunos países, como Canadá, favorecen más los centros tecnológicos, muy ligados a la industria, para todo aquello que sean aplicaciones, y reservan a las universidades la ciencia básica. En otros todo está más mezclado y se espera que la totalidad de los agentes acabe por cubrir el arco que va desde lo más básico a lo más aplicado, a menudo sin explicar qué incentivos pueden llevar a una institución a complicarse la vida de tal manera, o qué medios se ponen en manos de sus dirigentes para poder estimular a los que trabajan en ciencia para ser dúctiles a las demandas sociales. En cualquier caso, un economista puede encontrar muchísimos temas de interés si se asoma, con mirada crítica, a las necesidades de organizaciones complejas donde no resulta evidente cómo conviene alinear los incentivos.

Y si alguien alberga intereses más empíricos, tampoco le faltará trabajo. Medir la productividad de los recursos destinados a la ciencia, adivinar por qué las empresas que no hacen investigación se sienten cómodas a pesar de todas las advertencias teóricas de que acabarán por morir si no se dedican a ello, valorar los efectos de las

grandes instalaciones, evaluar la calidad de los equipos y los proyectos, anticipar sus consecuencias sobre la economía... ¡Hay para todos!

Ya hemos visto que el paso desde los descubrimientos básicos hasta las aplicaciones concretas, y su incorporación al mercado son preocupaciones muy presentes hoy día. Por esto puede ser positivo ilustrar que también los descubridores del pasado estaban interesados en este tránsito, aunque los métodos fueran distintos.

En 1642, el gran pensador francés Blaise Pascal inventó, a los 19 años de edad, una máquina de aritmética, la primera calculadora mecánica. Tres años más tarde escribió un opúsculo en el que explicaba sus principios y aplicaciones. El texto, que merece la pena leer completo, termina de la manera siguiente: "Espero que estéis de acuerdo, estimado lector, que me he esforzado para conseguir que todas las operaciones que resultaban penosas, largas e inciertas según los métodos preexistentes, se vuelvan fáciles, sencillas, rápidas y seguras".

Si llevo esta historia aquí es para comentar su curioso método para hacer aquello que ahora denominamos "transferencia de tecnología".

Decía Pascal, al final del panfleto:

"Los curiosos que deseen ver la máquina en cuestión pueden dirigirse al señor de Roverbal, profesor ordinario del Collège Royal de France, quien les mostrará detalladamente y de forma gratuita la facilidad de las operaciones, la venderá, y enseñará su funcionamiento.

El referido señor de Roverbal vive en el Collège Maître Gervais, en la rue du Foin, cerca de los Marthurins. Se le puede encontrar cada mañana hasta las ocho, y los sábados por la tarde".

¡Como podemos ver, los métodos de transferencia, desde entonces, se han ido complicando!

Hasta ahora únicamente he hablado, aunque con poco detalle, de algunos ejemplos que vienen de las ciencias "duras". Pero los científicos sociales también pueden encontrar muchos temas de investigación y jugar un papel como consultores en relación con el estudio del fenómeno de la producción científica, como recién mencioné, así como de los problemas sociales que, sin lugar a dudas, generarán algunos de los avances de otras ciencias. Por ejemplo, el alargamiento de la vida no quedará sólo como asunto de biólogos y médicos. También habrán de estudiar sus consecuencias los demógrafos, geógrafos humanos y sociólogos, para analizar los nuevos fenómenos que generaría la acumulación de más y más generaciones, con derechos, actitudes y necesidades divergentes, dentro de una misma sociedad.

Asimismo, los economistas nos deberemos preocupar, aún más que en el pasado, por los impactos económicos de este alargamiento de la vida en varias dimensiones: sobre los sistemas de pensiones, sobre los costos de la salud, o sobre el alcance y la sostenibilidad de los programas de bienestar social. Pienso, en concreto, en la importancia económica de la nueva ley de dependencia que ha aprobado el gobierno de España.

Analizar los procesos de creación científica con una mirada económica, prever y estudiar las consecuencias de los nuevos avances de la ciencia sobre nuestras economías, son dos de las actividades que quería señalar. Pero también hacen falta más gestores que entiendan las peculiaridades de la ciencia, para defenderlas allí donde sean justificadas, y que a la vez ayuden a los científicos a salir de sus espacios protegidos, a aceptar nuevos

retos, a moverse en entornos menos seguros pero más competitivos en salarios, a abrirse, en definitiva, a prácticas más comprensibles para el resto de la sociedad.

Y si la gestión de las tareas ajenas no os acaba de convencer, la sociedad está deseosa de descubrir nuevos empresarios, capaces de aprovechar las oportunidades que presenta el progreso del conocimiento.

Como comentaba al principio, tener un ojo puesto hacia la ciencia puede ser, además de una ventana al futuro, también una fuente de oportunidades laborales.

### ¿DÓNDE ESTÁN ESTOS CIENTÍFICOS?

¿Hacia dónde mirar, para encontrar estas ventanas y saber más sobre la ciencia, sin dejar de ser economistas? La buena noticia es que las tenemos en nuestro entorno. Vivimos en una universidad rica en investigación y amplia en especialidades. Aun así, ni profesores ni estudiantes tenemos demasiados incentivos para convivir con nuestros colegas de otras ramas del saber, aunque hay claras excepciones. Ciertamente, algunos profesores cultivan de manera decidida campos interdisciplinarios y colaboran con científicos de otros ramos del conocimiento. Otros, estoy seguro, tienen tratos de amistad y otras afinidades con una variedad de colegas. Otros, como yo mismo, los hemos conocido en reuniones o comisiones, o bien, sencillamente, de tanto tomar el tren juntos. Y estoy seguro de que los estudiantes también frecuentáis, por razones diversas, gente que trabaja en otros campos. Pero echo en falta un contacto más fácil entre todos. Quizá cada uno de nosotros tengamos demasiado trabajo, y además no hay canales evidentes para encontrarse. Es una lástima, porque nuestros vecinos son muchos y muy buenos.

Ya he dicho que cerca del campus se está construyendo un sincrotrón y que dentro del mismo contamos con un centro que será uno de los nodos principales de la red de comunicación que deberá llevar a cabo los cálculos derivados de las observaciones que comenzarán a hacerse dentro de poco en el CERN, uno de los centros de física de partículas más importantes del mundo. También tenemos, casi al lado, laboratorios donde se producen ratones transgénicos en condiciones particularmente controladas, lo cual permite no sólo experimentar con ellos en el campus, sino suministrarlos a otros centros de investigación. Tenemos expertos en cáncer que trabajan en la frontera entre la ciencia básica y la experiencia clínica, en proyectos de primera fila internacional, expertos en cambio climático, nanotecnólogos, biotecnólogos que trabajan para las agencias del espacio y un centro de acogida para matemáticos de fama mundial. Éstos son algunos de nuestros vecinos, junto con arqueólogos, filólogos y tantos otros expertos que nos rodean.

A mí, en lo personal, me gustaría poder compartir más con los compañeros de otras facultades los intereses comunes por la ciencia, a la vez de poder debatir también nuestras diferencias de enfoque, compartir informaciones sobre las prioridades, disponer de una visión más integral de la ciencia gracias a unos contactos profesionales mejorados. Con seguridad tendríamos que lanzar iniciativas en este sentido.

Pero tal vez más importante aún sea que los estudiantes no perdáis la oportunidad de aprender de los demás, de los que han llegado a vuestra misma universidad para estudiar otras realidades, con otras curiosidades. Siempre he creído que de quienes más aprenderéis es de los compañeros.

Cuanto más amplio sea vuestro círculo, más abierta vuestra curiosidad por lo que respecta a lo que hacen los demás, más rica será vuestra experiencia entre nosotros.

Para acabar, me he dado cuenta de que podríais pensar que he insinuado que aquello que estudian o enseñan los demás es mejor que lo que recibiréis en la Facultad de Económicas. Nada más lejos de mis intenciones. Hacerse economista es un proceso apasionante, que permite seguir creciendo durante muchos años. Disfrutad de ello, y disfrutad también de un entorno tan rico como es la Autónoma, donde se hace ciencia de todos los colores.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alejaldre, Carlos. 2006. "Grandes infraestructuras europeas. El proyecto ITER y España" (Cómo embotellar una estrella), presentado al curso Fortalezas y avances recientes en el sistema español de I+D+I, Universidad Internacional Menéndez Pelayo, agosto.

Coll, Miquel. 2005. "¡Hágase la luz!", en *Boletín de la Sociedad Española de Bioquímica y de Biología Molecular*, marzo.

David, Paul. 1985. "Cleo and the Economics of QWERTY", en *American Economic Review* 75 (2).

Glashow, Sheldon L. 2002. *Immanuel Kant and the Princes of Serendip. Does Science Evolve through Blind Chance or Intelligent Design?*, mimeo, Boston University.

León, Gonzalo. 2006. Notas para un curso de doctorado sobre políticas de I+D e innovación en la Unión Europea, UPM, Madrid.

Pascal, Blaise "Lettre dédicatoire à Monsieur le Chancelier sur le sujet de la machine nouvellement inventée par le sieur B.P. pour faire toutes sortes d'opérations d'arithmétique par un mouvement réglé sans plume ni jetons, avec un avis nécessaire à ceux qui auront curiosité de voir ladite machine et s'en servir", en *Oeuvres Complètes*, Editions du Seuil, París.

Pascual, Ramón. "El projecte de font de llum de sincrotró del Vallès", en *Coneixement i Societat*, núm. 1.



# LA RENOVACIÓN DE LAS POLÍTICAS DE EDUCACIÓN SUPERIOR, CIENCIA Y TECNOLOGÍA: UNA TAREA ESTRATÉGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS SOCIEDADES DEL CONOCIMIENTO

**DRA. ROSAURA RUIZ GUTIÉRREZ**

Secretaria de Desarrollo Institucional,  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM),  
Vicepresidenta de la Academia Mexicana de Ciencias

**DRA. RINA MARÍA MARTÍNEZ ROMERO**

Asesora, Secretaría de Desarrollo Institucional,  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

**L**AS DENOMINADAS SOCIEDADES DEL CONOCIMIENTO SE DESARROLLAN Y PROSPERAN

de forma heterogénea, dadas las enormes desigualdades culturales, económicas y políticas que se viven en los países del mundo. Estas diferencias son enmarcadas con claridad por la visión y las acciones que cada nación tiene y realiza con respecto a la generación y la transferencia del capital intelectual con que cuenta. Por ello cabe destacar el papel central de la educación superior y de la investigación científica, humanística y tecnológica, como ejes rectores en la producción, la transmisión, el uso y la transferencia de innovaciones y servicios de gran impacto y beneficio social. En este sentido, diversos indicadores –como el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación; el número de investigadores por cada mil integrantes de la población económicamente activa; la formación de doctores; la producción científica y el número de patentes, así como la inversión que hacen los gobiernos en investigación– reflejan que los países que dirijan su atención al campo del conocimiento estarán incluidos en la dinámica mundial a partir de que reorienten sus políticas públicas en torno a las acciones más pertinentes para hacer posible su desarrollo y la sostenibilidad, en donde también prevalezcan la equidad, la pluralidad y la justicia social.

**R**OSAURA RUIZ GUTIÉRREZ ES DOCTORA EN CIENCIAS. SECRETARIA DE DESARROLLO Institucional de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Vicepresidenta electa de la Academia Mexicana de Ciencias, periodo 2006-2008. Miembro del Sistema Nacional de Investigación Nivel II. Profesor de carrera titular “B” T. C. de la Facultad de Ciencias. Profesora invitada en la Universidad de California, Irvine. Su tema central de investigación se enfoca en las teorías evolutivas, que ha abordado desde las perspectivas científica, histórica y filosófica. En la actualidad dirige el Grupo Interdisciplinario de Historia, Filosofía y Estudios Sociales de la Ciencia. También se ha dedicado a la investigación en educación, en particular edu-

cación superior. En ambos temas, ha impartido conferencias y cursos en diversos foros nacionales e internacionales; además, ha publicado numerosos artículos en revistas de investigación y difusión nacionales e internacionales. Es autora y coautora de nueve libros.

**R**INA MARÍA MARTÍNEZ ROMERO ES DOCTORA EN psicología por la Universidad Autónoma de Madrid, España. Actualmente es profesor titular “C” de tiempo completo en el Colegio de Ciencias y Humanidades de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Fue profesora de la Facultad de Psicología-UNAM, de 1991 a 2005. Trabajó en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey-Campus Estado de México (ITESM-CEM) de 2002 a 2004. Fue profesora del Departamento de Comportamiento Organizacional, tutora del Modelo Educativo, asesora y tutora del Comité Educativo para elaboración de cursos rediseñados para la Plataforma Tecnológica Blackboard y responsable del Proyecto de Investigación “Ciencias cognitivas: construcción y administración del conocimiento”. De 2004 a la fecha es asesora de la Secretaría de Desarrollo Institucional-UNAM en temas de educación y sociedades del conocimiento, diseño curricular, reforma académica y educación a distancia.

# LA RENOVACIÓN DE LAS POLÍTICAS DE EDUCACIÓN SUPERIOR, CIENCIA Y TECNOLOGÍA: UNA TAREA ESTRATÉGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS SOCIEDADES DEL CONOCIMIENTO

**DRA. ROSAURA RUIZ GUTIÉRREZ**

Secretaria de Desarrollo Institucional,  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM),  
Vicepresidenta de la Academia Mexicana de Ciencias

**DRA. RINA MARÍA MARTÍNEZ ROMERO**

Asesora, Secretaría de Desarrollo Institucional,  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

## INTRODUCCIÓN

**L**OS GRANDES AVANCES DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA, así como los actuales problemas ambientales, económicos, culturales y políticos, obligan a nuestros países a dirigir su atención hacia sus diversas fuentes de conocimientos y desarrollo de capacidades para comenzar a hacer uso de ellas en beneficio de sus ciudadanos.

Ello ha dado lugar a las denominadas “sociedades del conocimiento”, las cuales se mundializan de una manera asimétrica, acentuando tanto las disparidades entre los países más ricos y los más pobres, como las enormes desigualdades entre los diferentes sectores sociales en el interior de las naciones.

Ante estas situaciones es necesario reflexionar en profundidad sobre cuál es el papel que le corresponde a la educación superior y a la investigación científica, humanística y tecnológica, y hacia dónde deben reorientarse las políticas públicas para el desarrollo de los países en las que prevalezcan la equidad, la pluralidad y la justicia social. Cada vez es más evidente que si los países de bajos ingresos y en vías de desarrollo no dirigen su atención al campo del conocimiento y a la innovación, serán entonces los más expuestos a quedar excluidos de la dinámica mundial en torno a la producción, transmisión, uso y transferencia del saber.

La fuga del capital humano, la falta de solución a conflictos locales o nacionales, el incremento de problemas de salud pública, de baja calidad en educación o ambientales, entre muchos otros, serán algunas de las consecuencias de

la carencia de una visión de prosperidad basada en el aprovechamiento de la riqueza intelectual existente y de su promoción en los planos educativo, industrial, sanitario, alimenticio, comercial, económico o político.

Ante este escenario de contrastes, para que el despertar y el florecimiento cognitivo e intelectual ocurran en los miembros de una sociedad, la UNESCO ha señalado tres grandes iniciativas orientadas a edificar auténticas sociedades del conocimiento (2005, p. 207):

1. *Una mejor valoración de los conocimientos existentes para luchar contra la brecha cognitiva.* Cada sociedad debe aprender a identificar los conocimientos y capacidades potenciales de que dispone, valorarlos y ponerlos al servicio de su progreso. Para ello es importante, en primer lugar, lograr que cada cultura adquiera una plena conciencia de la riqueza de saberes de que es poseedora.
2. *Un enfoque más participativo del acceso al conocimiento.* Se debe promover una cultura en la que exista un reconocimiento cada vez mayor del patrimonio y del potencial de conocimientos con los cuales cuenta cada sociedad, para aprender a aprovechar de modo compartido y sostenible estos saberes y sacar el máximo beneficio posible de las múltiples dinámicas que tienen lugar en el contexto mundial.
3. *Una mejor integración de las políticas acerca del conocimiento.* Un proyecto integral, plural e inclusivo de sociedad depende, en última instancia, de la formulación de políticas de Estado a largo plazo que permitan afrontar los desafíos planteados por el contexto internacional; ello, por supuesto, sin desatender las necesidades locales.

Este último punto es de notable relevancia ya que, en el marco del presente escenario global complejo, es preciso rediseñar, rearticular y redirigir las políticas públicas hacia proyectos nacionales que sean sustentables e integrales.

En este trabajo se plantea que el desarrollo de sociedades del conocimiento depende de la adecuada articulación de las políticas educativas, científicas y tecnológicas y de la adopción de medidas públicas vanguardistas dirigidas al apoyo significativo de los sistemas de educación superior.

En la primera parte se describe qué son las sociedades del conocimiento y por qué éstas exigen dirigir la atención y concentrar los mayores esfuerzos en la conformación de sólidos sistemas nacionales de educación, ciencia y tecnología; luego se presentan algunos de los indicadores más relevantes para mostrar el estado de la ciencia, la tecnología y la educación superior en Iberoamérica. Por último, se propone que la reformulación articulada de políticas en torno a estos temas puede servir como estrategia para la construcción de sociedades del conocimiento, más justas y equitativas.

## I. LAS SOCIEDADES DEL CONOCIMIENTO

Aun cuando desde tiempos remotos se ha reconocido al conocimiento como una cualidad inherente a la humanidad o incluso como un rasgo adaptativo de ésta, no fue sino hasta hace algunas décadas que se comenzó a reflexionar sobre las implicaciones de una nueva configuración social emergente, distinta de la industrial y distinta de los tipos de sociedades que le precedieron, y que tiene como fundamento el conocimiento aplicado al bienestar económico y social.

La generación y la transferencia de los saberes resultan primordiales en las sociedades del conocimiento, puesto que permiten desarrollar teorías, elaborar nuevos métodos, reestructurar procesos, diseñar instrumentos y producir novedades y tecnologías en distintos ámbitos.

Es así que la producción intelectual se orienta a la satisfacción de una gran variedad de necesidades propias de cada país. Incluso, en muchos casos, estos avances benefician también a otros países, ya que con la transferencia de diversas tecnologías, métodos y herramientas, se logra el incremento y la mejora de su actividad experimental en las áreas educativas, científicas y tecnológicas, entre otras, para dar paso a las innovaciones.

En todas sus manifestaciones (educativas, científicas, tecnológicas, humanísticas, artísticas, sociales), las innovaciones son la base de estas nuevas sociedades y son uno de los motores del desarrollo social y humano que dan movilidad al conocimiento generado dentro de las instituciones educativas y de investigación.

En estas sociedades, los saberes generados en diferentes sectores se transmiten, se renuevan de manera constante, se usan y se transfieren mediante

flujos interdependientes y multidireccionales en los que se reconocen, al menos, las cuatro dimensiones siguientes:

- *La información, entendida como el insumo básico de producción de nuevo conocimiento.* Es necesario contar con estrategias y mecanismos para acceder, producir, almacenar, recuperar y usar la información.
- *La sistematización del capital intelectual y de las competencias de las personas altamente capacitadas en la generación de nuevos saberes.* Las metodologías y procedimientos elaborados e implantados por especialistas facilitan el manejo crítico de la información en la producción de nuevo conocimiento, así como el aprendizaje de nuevos procesos.
- *Las innovaciones educativas, científicas, humanísticas y tecnológicas al servicio de la sociedad.* Las innovaciones son el resultado de los avances dentro de las diversas áreas del conocimiento y constituyen los recursos indispensables para incrementar la competitividad de un país.
- *La eficiente y eficaz capacidad de respuesta del país en su conjunto.* La solución de problemas concretos e inesperados se ve favorecida con el uso de estrategias basadas en la anticipación, la rapidez y el abatimiento de costos.

Con información, conocimiento e innovación, en una retroalimentación continua (véase la Figura 1), las naciones pueden incrementar su capacidad para prevenir y resolver conflictos, constituyéndose en auténticas sociedades del conocimiento. Ello hace posible que tenga lugar una adecuada articulación de los sistemas educativos con los científicos y tecnológicos.

FIGURA 1.

MODELO INTEGRAL DE SOCIEDADES DEL CONOCIMIENTO (SC) EN EL QUE INTERACTÚAN DE MANERA SIMÉTRICA LA INFORMACIÓN, EL CONOCIMIENTO Y LA INNOVACIÓN, COMO BASES PARA EL DESARROLLO HUMANO Y LA COMPETITIVIDAD



En el caso de Iberoamérica, por ejemplo, se estima que más de 80% de las actividades de investigación y desarrollo son llevadas a cabo por las universidades, sobre todo públicas (Tünnermann y De Souza, 2003). De ahí que la constitución de sistemas de educación superior, en los que se incluya el fomento a la investigación científica, tecnológica y humanística, es un prerrequisito para que las sociedades basen su desarrollo en los saberes (Tilak, 2002; Brint, 2001). El papel de las universidades y de las instituciones de educación superior se considera como central dentro de este esquema en el cual “las organizaciones que producen conocimiento útil se vuelven más centrales en la estructura social” (Etzkowitz y Leydesdorff, 1997, p. 147).

## II. EL ESTADO DE LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA EDUCACIÓN SUPERIOR: UN PANORAMA GLOBAL PARA IBEROAMÉRICA

Un método para medir los avances en el conocimiento en que un país se basa cada vez más, es el análisis de diversos indicadores básicos de su sistema científico, tecnológico y educativo.

Un diagnóstico numérico como tal, al hacerse dentro de un marco comparativo entre distintas naciones, puede poner de relieve las diferentes formas que toma el proceso de consolidación de este nuevo orden social. Al mismo tiempo, permite describir algunos rasgos generales característicos del estado de las brechas existentes entre países.

En principio, se debe señalar que los indicadores que dan cuenta de la situación iberoamericana en cuanto a la educación superior y a la investigación en ciencia y tecnología para el desarrollo, señalan la existencia de un notable rezago frente a las naciones que se han mantenido a la vanguardia.

CUADRO 1.  
ACCESO A LAS TIC EN DISTINTOS PAÍSES

### TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN, 2005

Líneas telefónicas		Tel. celulares (suscriptores)		Computadoras personales Cifras 2004		Páginas de Internet Cifras 2004	
País	× 100 hab.	País	× 100 hab.	País	× 100 hab.	País	× 10 000 hab.
Suecia	71.5	República Checa	115.2	Suiza	82.3	E.U.A.	6 645.2
Suiza	68.7	Portugal	109.1	E.U.A.	76.2	Suecia	1 466.7
Alemania	66.6	Reino Unido	102.2	Suecia	76.1	Japón	1 286.8
Canadá	56.6	España	96.8	Canadá	69.8	Corea	1 130.1
E.U.A.	60.6	Alemania	95.8	Reino Unido	60.0	Canadá	1 110.9
Reino Unido	56.4	Suecia	93.3	Corea	54.5	Suiza	1 036.7
Francia	59.0	Suiza	91.8	Japón	54.2	Reino Unido	697.9
Corea	49.2	Francia	79.4	Francia	48.7	Portugal	552.4
Japón	45.9	Corea	79.4	Alemania	48.5	Francia	386.5
España	42.9	Polonia	75.9	España	25.4	República Checa	376.1
Portugal	40.4	Japón	74.0	República Checa	21.6	Alemania	366.2
República Checa	31.5	Chile	67.8	Polonia	19.1	Argentina	242.4
Polonia	32.3	E.U.A.	67.6	Chile	13.9	España	217.5
Turquía	25.9	Turquía	59.6	Portugal	13.3	Brasil	193.0
China	26.6	Argentina	57.3	Brasil	10.7	México	145.2
Brasil	23.5	Canadá	51.4	México	10.7	Chile	142.3
Argentina	22.8	Brasil	46.3	Argentina	8.0	Polonia	70.5
Chile	22.0	México	44.34	Turquía	5.1	Turquía	65.6
México	18.23	China	29.9	China	4.1	China	1.25

Fuentes: International Telecommunications Union, 2005, CONACYT, *Informe general del estado de la ciencia y la tecnología*, México, 2006.

Tal asimetría abarca desde lo tecnológico y lo científico, hasta lo social y lo económico.

En el Cuadro 1 se presentan algunas asimetrías entre países con respecto al acceso a algunas tecnologías de la información y la comunicación (TIC).

Las TIC se han convertido en herramientas que permiten y facilitan la circulación del conocimiento como nunca antes, lo que ha constituido formas novedosas de acceso y generación del saber, por un lado, así como nuevas maneras de interacción entre los distintos actores sociales, por el otro.

Internet, por ejemplo, al permitir el intercambio y la comunicación de manera más flexible y económica, ha transformado las relaciones sociales, culturales, económicas y políticas de las personas, e impactado en los modos de creación de innovaciones en la ciencia, la tecnología, las humanidades, incluso el arte.

El número de líneas telefónicas por cada 100 habitantes de países como Brasil, Argentina, Chile y México no representa siquiera la mitad del número de líneas telefónicas por cada 100 habitantes con las que cuentan países como Suecia, Suiza, Alemania o Canadá. Por su parte, España y Portugal, aunque se encuentran por debajo de las naciones que encabezan la lista, en general se colocan por arriba de los países latinoamericanos.

Una situación similar ocurre con el número de suscriptores de teléfonos celulares o el número de computadoras personales por cada 100 habitantes,

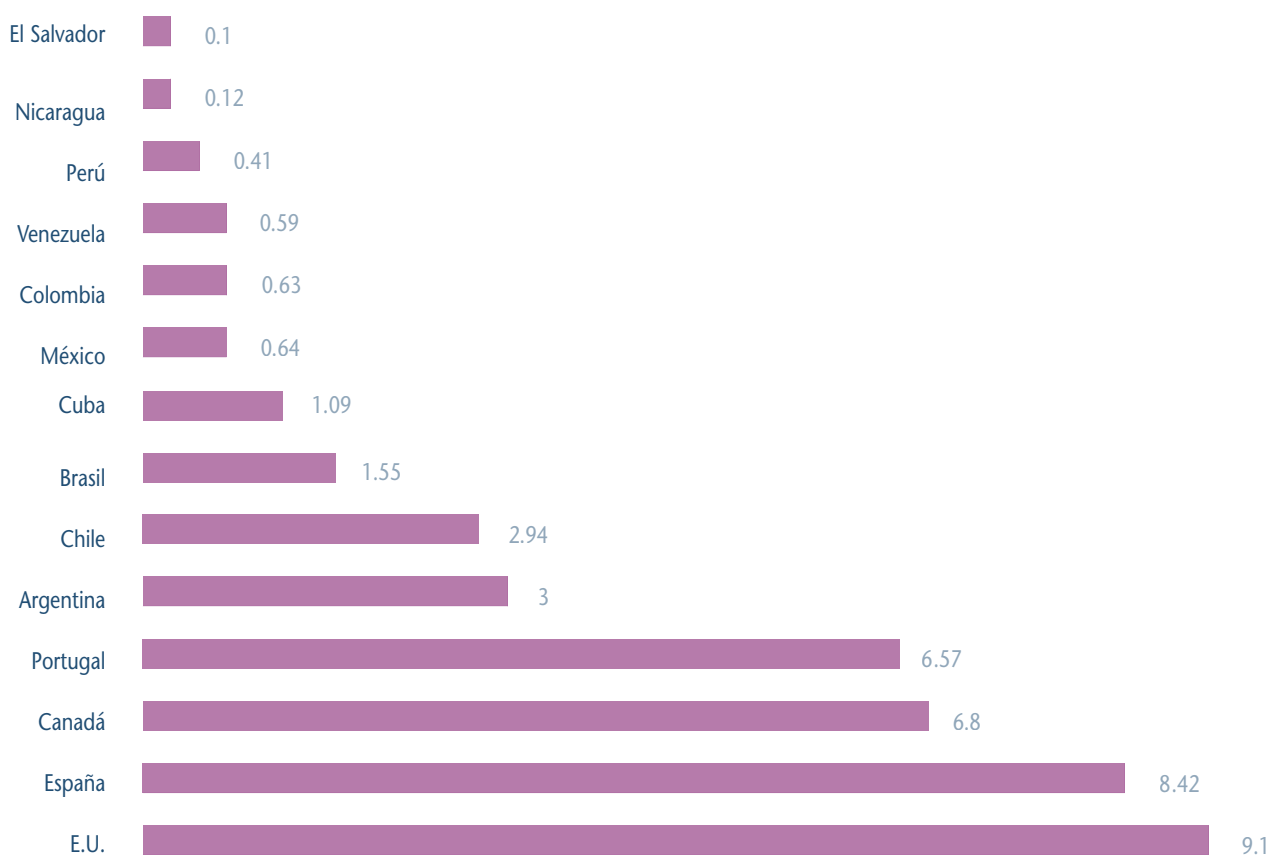
que es bastante menor en países iberoamericanos respecto a otras regiones del mundo. Por ejemplo, el número de páginas de Internet por cada 10 mil habitantes es mayor en Argentina que en España y Brasil, y es mayor en Brasil que en México o Chile, y aun así, las 242.4 páginas de Internet reportadas para Argentina representan alrededor de la sexta parte del total de las páginas reportadas para países como Canadá, Corea, Japón o Suecia.

En la Gráfica 2 se puede comparar la reducida población de investigadores por cada mil integrantes de la población económicamente activa (PEA) de algunos países iberoamericanos con respecto a otros como Canadá y Estados Unidos.

Las proporciones de investigadores en Argentina, Chile, Brasil o Cuba no representan ni la mitad de las proporciones de investigadores reportadas para Estados Unidos o Canadá. Por fortuna, España destaca al respecto, junto con estos países.

GRÁFICA 2.

INVESTIGADORES POR CADA MIL INTEGRANTES DE LA POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA (PEA)



*Fuente:* Red Iberoamericana de Indicadores de Ciencia y Tecnología, RICYT, Indicadores, 2004. [Bolivia (datos 2002), España (datos 2003); Canadá y Estados Unidos, datos correspondientes al año 2002, publicados en el informe del Gobierno Mexicano 2006; México, datos correspondientes a 2005, publicados en los *Indicadores de ciencia y tecnología 2006*, México].



La comunidad de investigadores es la principal protagonista en el proceso de producción nacional científica, tecnológica y humanística. Sin embargo, como muestra el Cuadro 3, es significativamente menor en los países de Iberoamérica al compararlo con otras naciones.

En tanto que en el año 2002 en Estados Unidos ya había 1 334 628 investigadores y en Corea 141 917, en 2003 en México el número de personas dedicadas a investigación y desarrollo ascendía apenas a 33 484, en Argentina alcanzaba los 27 367, y en España incrementaba notablemente, hacia los 92 523.

Las posibilidades de consolidación de amplias comunidades de investigadores necesarias para las sociedades del conocimiento, se reducen cuando el número de egresados de posgrado es escaso, pues ellos constituyen el personal altamente calificado para contribuir al mejoramiento del país y responder a las necesidades presentes y futuras de su entorno cambiante.

Por consiguiente, resulta indispensable considerar que la baja cobertura en este nivel impacta en la tasa de egreso de doctores en algunos países; por ejemplo, mientras Corea y España doctoran al año a un promedio de 0.38% de su PEA, Brasil doctora a 0.10% y México sólo logra la graduación de 0.04% de su PEA. Esto equivale a 1 789 doctores al año, según datos de 2005 reportados en el Cuadro 4.

CUADRO 3.  
PERSONAS DEDICADAS A LA INVESTIGACIÓN POR PAÍS

<b>TOTAL DE INVESTIGADORES, POR PAÍS</b>									
Número de investigadores en equivalente de tiempo completo									
País	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Alemania	230 189	235 793	237 712	254 691	257 874	264 385	265 812	268 943	
Argentina	–	24 804	25 419	26 004	26 420	25 656	26 083	27 367	29 471
Brasil	–	–	–	–	59 838	–	–		
Canadá	90 490	93 210	95 250	98 813	108 492	114 957	112 624	–	–
Corea	99 433	102 660	92 541	100 210	108 370	136 337	141 917	151 254	–
Chile	5 163	5 278	5 439	5 549	5 629	5 712	6 942	7 085	–
E.U.A.	–	1 159 908	–	1 260 920	1 289 262	1 320 096	1 334 628	–	–
España	51 633	53 883	60 269	61 568	76 670	80 081	83 318	92 523	–
Francia	154 827	154 827	155 727	160 424	172 070	177 372	192 790	–	–
Italia	76 441	65 694	65 354	65 098	66 110	66 702	71 242	–	–
Japón	617 365	625 442	652 845	658 910	647 572	675 898	646 547	675 330	–
<b>México<sup>v</sup></b>	<b>19 895</b>	<b>21 418</b>	<b>22 190</b>	<b>21 879</b>	<b>22 228</b>	<b>23 390</b>	<b>31 132</b>	<b>33 484</b>	<b>33 907</b>
Reino Unido	144 735	145 641	157 662	–	–	–	–	–	–
Suecia	–	36 878	–	39 921	–	45 995	–	47 836	–

– Dato no disponible

<sup>v</sup> La cifra para 2004 es estimación

Fuentes: CONACYT, *Informe general del estado de la ciencia y la tecnología*, México, 2006.

OECD, *Main Science and Technology Indicators*, 2005-2.

RICYT, *Principales Indicadores de Ciencia y Tecnología*, 2004

CUADRO 4.

NÚMERO DE GRADUADOS EN ALGUNOS PAÍSES

**COMPARACIONES INTERNACIONALES SOBRE LA GENERACIÓN DE GRADUADOS DE DOCTORADO, 2005**

País	Número de doctores/año (miles de graduados)	Graduados/PEA
E.U.A.	43 204	0.30
Brasil	9 972	0.10
Corea	8 670	0.38
Canadá	4 408	0.27
España	7 270	0.38
México	1 789	0.04

Notas: Los datos de graduados con excepción de México son estimaciones propias.

Fuentes: CONACYT, *Informe general del estado de la ciencia y la tecnología*, México, 2006.

Conacyt. Encuestas de Graduados de Doctorado, 2005.

INEGI. Encuestas Nacional de Ocupación y Empleo, 2005.

Coordinación General de Indicadores, Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil, 2004.

Brief Statistics on Korean Education, 2004, Ministry of Education and Human Resources Development, Korea.

NSF, Science and Engineering Doctorate Awards, 2004.

NSF, Science and Engineering Indicators, 2004.

OECD, MainScience Technology Indicators, 2006/1.

La contracción del presupuesto dedicado a la contratación de nuevos investigadores en los diferentes países, así como una baja cifra de alumnado en educación superior, sobre todo en el nivel posgrado, representan menores oportunidades de generación de auténtico desarrollo endógeno y sostenible, pues es en este nivel en donde los alumnos se especializan en la generación y difusión de nuevos saberes por medio de la investigación y la docencia.

Las asimetrías se reflejan también en las distintas dimensiones de la productividad científica, como es el caso, por ejemplo, del número de publicaciones de estos temas. La cantidad de artículos científicos publicados en 2005 ascendió en México a 6 787; en Brasil, a 15 777; en España, a 29 038; en Canadá, a 41 957; en Francia, a 52 236; en Alemania, a 73 734; en Japón, a 75 328 y en Estados Unidos, a 288 714 (véase el Cuadro 5).

Mientras que en el periodo comprendido entre 1996 y 2005 países como España, Canadá, Francia, Alemania, Japón y Estados Unidos no alcanzaron a duplicar su alta producción de artículos científicos, otras naciones, como Portugal, Brasil, Chile, México y Colombia, aunque reportan cifras reducidas de publicaciones, lograron duplicar su producción de artículos para este mismo periodo. No obstante, sus cifras son aún reducidas en comparación con las de otros países.

En Iberoamérica podría potenciarse el número de artículos publicables si se aprovechara, por un lado, la riqueza acumulada en su diversidad cultural y si se fomentara, por el otro, la defensa también del español en contra de la hegemonía que ha mantenido el idioma inglés. Esto no representaría dejar de publicar en inglés sino que, además de hacerlo, podría generarse una gran variedad de medios y formas de hacerlo en español con excelente calidad.

CUADRO 5.  
PRODUCCIÓN DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS ANUALMENTE POR PAÍS											
Número											
País	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Total
Alemania	55 470	58 443	63 755	64 242	64 099	65 827	64 333	68 305	63 564	73 734	641 772
Argentina	3 056	3 461	3 579	3 979	4 237	4 352	4 597	4 662	4 361	5 182	41 466
Brasil	6 053	6 747	7 983	9 021	9 608	10 622	11 622	12 679	13 313	15 777	103 425
Canadá	33 300	31 976	32 063	33 124	32 574	32 610	32 888	36 433	35 170	41 957	342 095
Colombia	363	440	467	514	599	631	698	693	698	892	5 995
Corea	6 445	7 841	9 819	11 245	12 455	14 843	15 810	18 730	19 220	22 957	139 365
Chile	1 469	1 548	1 560	1 746	1 827	2 033	2 117	2 521	2 299	2 959	20 079
E.U.A.	246 174	244 183	249 424	250 308	247 880	254 548	250 204	267 614	254 740	288 714	2 553 789
España	16 778	18 148	19 658	20 915	21 066	22 427	23 144	24 796	24 761	29 038	220 731
Francia	42 103	43 464	46 246	47 009	46 074	47 247	45 637	49 397	45 025	52 236	464 438
Grecia	3 602	3 784	4 278	4 364	4 607	5 327	5 397	6 194	6 207	7 290	51 050
Italia	26 428	27 061	29 060	29 636	29 823	31 759	32 037	35 579	34 392	39 112	314 887
Japón	61 491	62 166	67 804	69 535	68 923	71 421	69 982	75 581	68 593	75 328	690 824
<b>México</b>	<b>3 282</b>	<b>3 587</b>	<b>4 057</b>	<b>4 531</b>	<b>4 633</b>	<b>4 999</b>	<b>5 213</b>	<b>5 859</b>	<b>5 885</b>	<b>6 787</b>	<b>48 833</b>
Polonia	7 563	7 439	8 128	8 784	9 129	10 021	10 418	11 651	11 710	13 065	97 908
Portugal	1 795	2 047	2 310	2 862	2 970	3 405	3 595	4 161	4 306	5 069	32 520
Reino Unido	63 850	62 464	65 634	67 262	68 507	68 732	66 256	70 508	66 584	75 547	675 344
Turquia	3 218	3 545	4 178	4 867	5 096	6 163	7 919	9 896	11 269	13 863	70 012
Venezuela	641	770	797	885	853	931	903	991	901	1 010	8 682
<b>Total Mundial</b>	<b>682 064</b>	<b>686 893</b>	<b>712 920</b>	<b>727 057</b>	<b>725 029</b>	<b>743 770</b>	<b>739 938</b>	<b>800 624</b>	<b>766 981</b>	<b>882 860</b>	<b>7 468 136</b>

Fuentes: CONACYT, *Informe general del estado de la ciencia y la tecnología*, México, 2006.  
Institute for Scientific Information, 2006.

En las sociedades del conocimiento, también adquiere relevancia el número de patentes por país, en tanto que es un indicador que refleja la capacidad creativa, de innovación, de invención y sobre todo de explotación comercial del conocimiento generado dentro de un país. Como lo muestra el Cuadro 6, en 2003, el número de patentes solicitadas por México fue de 12 207, número bajo si se compara con las 418 377 patentes solicitadas por Estados Unidos, las 287 462 solicitadas por España o incluso las 24 732 patentes solicitadas por Brasil.

En el Cuadro 6 se muestra también cómo tres países latinoamericanos, Argentina, Brasil y México, en conjunto apenas reunieron 10.7 % del número de solicitudes de patentes de Estados Unidos.

Argentina y Brasil, por su parte, no lograron duplicar el número de patentes solicitadas en el periodo que va de 1996 a 2003. Mientras tanto, en el mismo intervalo de tiempo, países como Suecia o España casi triplicaron sus cifras.

CUADRO 6.  
 SOLICITUDES DE PATENTES POR PAÍS

<b>SOLICITUDES DE PATENTES, POR PAÍS</b>								
Número								
País	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002 <sup>p/</sup>	2003 <sup>e/</sup>
Alemania	155 095	175 595	202 771	220 761	262 550	292 398	310 727	340 025
Argentina	5 109	5 859	6 320	6 457	6 636	7 172 <sup>e/</sup>	7 537 <sup>e/</sup>	7 902
Brasil	17 851	20 306	21 459	23 635	19 325	23 620	23 995	24 731
Canadá	49 254	54 446	65 682	69 777	85 926	98 489	108 352	116 793
Corea	113 994	129 982	121 750	133 127	172 184	190 022	203 696	214 911
Chile	2 463	2 942	3 104	3 268	3 683	3 922 <sup>e/</sup>	4 198 <sup>e/</sup>	4 475
E.U.A.	223 419	236 692	262 787	294 706	331 773	375 657	381 737	418 377
España	83 983	113 767	147 889	163 090	202 439	234 543	255 590	287 461
Francia	98 508	112 631	130 015	138 455	160 178	175 122	182 015	200 370
Italia	80 852	91 410	123 606	128 260	151 188	156 858	163 951	186 271
Japón	401 251	417 974	437 375	442 245	486 204	496 621	486 906	518 809
<b>México<sup>l/</sup></b>	<b>6 751</b>	<b>10 531</b>	<b>10 893</b>	<b>12 110</b>	<b>13 061</b>	<b>13 566</b>	<b>13 062</b>	<b>12 207</b>
Reino Unido	129 353	148 209	176 187	192 875	233 223	264 706	284 910	312 309
Suecia	83 441	115 000	149 493	165 051	204 173	231 483	256 329	287 326

P/ Cifras preliminares

e/ Cifras estimadas

l/ IMPI en cifras 2005. Datos reales

*Fuente:* CONACYT, *Informe general del estado de la ciencia y la tecnología*, México, 2006.  
 OMPI, *Industrial Property Statistics*, Publication, 2002.  
 RICYT, *Principales Indicadores de Ciencia y Tecnología*, 2004.

Por último, la inversión que los gobiernos destinan a la investigación y al desarrollo experimental es otro de los elementos por considerar para la construcción de un panorama comparativo de la ciencia y la tecnología iberoamericanas.

Los índices de inversión en ciencia y tecnología (véase el Cuadro 7) reflejan el interés que cada país pone en la investigación como función primordial de sus sistemas de educación superior, e indican las dimensiones de la estructura orientada al desarrollo de innovaciones sustentadas en el pensamiento crítico, creativo y especializado de las personas altamente educadas en la solución de los problemas sociales.

Países como Argentina, México, Chile y Cuba destinan, en promedio, menos de la mitad de 1% del PIB a la investigación y desarrollo experimental, mientras países desarrollados como Japón, Finlandia o Suecia destinan más de 3% del PIB.

Esto refleja el poco interés de algunos países de Iberoamérica en la investigación científica y tecnológica y hace urgente la necesidad de incrementar las inversiones para hacer crecer los espacios que propician la investigación tanto básica como aplicada, en todas las áreas del conocimiento.

CUADRO 7.

MONTO DEL PIB DESTINADO A INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EXPERIMENTAL DE ALGUNOS PAÍSES EN 2004

**PARTICIPACIÓN DEL GIDE EN PIB POR PAÍS, 2004**

Porcentaje

País	GIDE/PIB %
Argentina	0.41
México	0.41
Chile	0.60
Cuba	0.65
India	0.84
Brasil	0.95
China	1.23
España	1.07
Canadá	1.99
Alemania	2.49
E.U.A.	2.68
Corea	2.85
Japón	3.13
Finlandia	3.51
Suecia	3.95
Promedio OCDE	2.26
Promedio Unión Europea	1.81
Promedio Latinoamérica	0.57

Nota: Se refiere a 2004 o al dato mas reciente.

*Fuente:* CONACYT, Informe general del estado de la ciencia y la tecnología, México, 2006.

Conacyt-INEGI, Encuesta sobre Investigación y Desarrollo Experimental, 2004

OECD, Main Science and Technology Indicators, 2006-1.

RICYT, Indicadores Iberoamericanos de Ciencia y Tecnología, sitio web ([www.ricyt.edu.ar](http://www.ricyt.edu.ar)).

Los datos comparativos de algunos países que analizamos nos permiten vislumbrar la existencia de una brecha multidimensional que da cuenta de un panorama de rezago entre los países iberoamericanos. Por ello resulta de fundamental importancia colocar a la investigación junto con la educación superior, como ejes centrales del desarrollo de las naciones iberoamericanas. De otro modo, las asimetrías en la ciencia, la tecnología, las humanidades y la educación superior se pronunciarán cada vez más, haciéndose evidentes en aspectos relativos a los indicadores internacionales del desarrollo social y económico de los países.

Tal es el caso del Índice de Desarrollo Humano publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Éste agrega los valores de esperanza de vida al nacer, la tasa de alfabetización de adultos, la tasa bruta de matriculación en enseñanza primaria, secundaria y terciaria, el PIB per cápita, el Índice de Esperanza de Vida, el Índice de Educación y del PIB.

Mientras que Noruega (lugar 1), Canadá (lugar 5), Estados Unidos (lugar 10), o incluso España (lugar 21) encabezan la lista en cuanto a desarrollo humano, muchos de los países iberoamericanos, como México o Argentina, aparecen en su mayoría por debajo de las primeras 30 posiciones (véase el Cuadro 8).

Los escasos esfuerzos que estos países han realizado en materia de educación, y de ciencia y tecnología, sin duda repercuten en el desarrollo social alcanzado.

CUADRO 8.  
 ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO 2005

Clasificación según el IDH <sup>a</sup>	Valor del Índice de desarrollo humano (IDH) 2003	Esperanza de vida al nacer (años) 2003	Tasa de Alfabetización de adultos (% de personas de 15 años y mayores) 2003 <sup>b</sup>	Tasa bruta combinada de matriculación en primaria, secundaria y terciaria % 2002/03 <sup>c</sup>	PIB per cápita (PPA en US\$ 2003)	Índice de esperanza de vida	Índice de educación	índice del PIB	Clasificación según PIB per cápita (PPA en US\$) menos clasificación según IDH <sup>d</sup>
1 Noruega	0.693	79.4	.. <sup>e</sup>	101 <sup>f</sup>	37.670	0.91	0.99	0.99	2
2 Islandia	0.956	80.7	.. <sup>e</sup>	96	31.243	0.93	0.98	0.96	4
3 Australia	0.955	80.3	.. <sup>e</sup>	116 <sup>f</sup>	29.632	0.92	0.99	0.95	7
4 Luxemburgo	0.949	78.5	.. <sup>e</sup>	88 <sup>g</sup>	62.298 <sup>h</sup>	0.89	0.95	1.00	-3
5 Canadá	0.949	80.0	.. <sup>e</sup>	94 <sup>ij</sup>	30.677	0.92	0.97	0.96	2
6 Suecia	0.949	80.2	.. <sup>e</sup>	114 <sup>f</sup>	26.750	0.92	0.99	0.93	14
7 Suiza	0.947	80.5	.. <sup>e</sup>	90	30.552	0.93	0.96	0.96	1
8 Irlanda	0.946	77.7	.. <sup>e</sup>	93	37.738	0.88	0.97	0.99	-6
9 Bélgica	0.945	78.9	.. <sup>e</sup>	114 <sup>f</sup>	28.335	0.90	0.99	0.94	3
10 Estados Unidos	0.944	77.4	.. <sup>e</sup>	93	37.562	0.87	0.97	0.99	-6
11 Japón	0.943	82.0	.. <sup>e</sup>	84	27.967	0.95	0.94	0.94	2
12 Países Bajos	0.943	78.4	.. <sup>e</sup>	99	29.371	0.89	0.99	0.95	-1
13 Finlandia	0.941	78.5	.. <sup>e</sup>	108 <sup>f</sup>	27.619	0.89	0.99	0.94	3
14 Dinamarca	0.941	77.2	.. <sup>e</sup>	102 <sup>f</sup>	31.465	0.87	0.99	0.96	-9
15 Reino Unido	0.939	78.4	.. <sup>e</sup>	123 <sup>ij</sup>	27.147	0.89	0.99	0.94	3
16 Francia	0.938	79.5	.. <sup>e</sup>	92	27.677	0.91	0.97	0.94	-1
17 Australia	0.936	79.0	.. <sup>e</sup>	89	30.094	0.90	0.96	0.95	-8
18 Italia	0.934	80.1	98.5 <sup>e,k,l</sup>	87	27.119	0.92	0.95	0.94	1
19 Nueva Zelandia	0.933	79.1	.. <sup>e</sup>	106 <sup>f</sup>	22.582	0.90	0.99	0.90	3
20 Alemania	0.930	78.7	.. <sup>e</sup>	89	27.756	0.90	0.96	0.94	-6
21 España	0.928	79.5	97.7 <sup>e,k,l</sup>	94	22.391	0.91	0.97	0.90	3
31 República Checa	0.874	75.6	.. <sup>e</sup>	80	16.357	0.84	0.93	0.85	7
34 Argentina	0.963	74.5	97.2	95	12.106	0.82	0.96	0.80	12
52 Cuba	0.817	77.3	96.9 <sup>k</sup>	80	.. <sup>s</sup>	0.87	0.91	0.67	40
53 México	0.814	75.1	90.3	75	9.168	0.83	0.85	0.75	7
63 Brasil	0.792	70.5	88.4	91	7.790	0.76	0.89	0.73	1
85 China	0.855	71.6	90.9	96	5.003 <sup>x</sup>	0.78	0.84	0.65	11

Fuente: PNUD, Informe de Desarrollo Humano 2005.

Una situación similar sucede en términos de competitividad internacional en el nivel empresarial (véase el Cuadro 9). Mientras que Estados Unidos ocupó la primera posición, Canadá, la séptima, Chile la 24 y España la 36, Brasil se ubicó en el peldaño 52, y México, en el 53.

En Iberoamérica se deben orientar los esfuerzos al mejoramiento y la renovación de los sistemas educativos y de investigación para ponerlos al servicio de su desarrollo social y con ello reducir las distancias que día con día se reflejan de manera creciente en los estudios diagnósticos. Lograr insertarse en el concierto de economías líderes es un asunto que depende no sólo de alcanzar mayor productividad y acelerar el crecimiento económico nacional, sino también de incrementar el bienestar genérico de sus poblaciones.

La educación, la ciencia y la tecnología son los catalizadores del cambio social hacia sociedades sustentables, más justas, democráticas y equitativas, preparadas para generar y utilizar nuevos saberes en la construcción de su propio futuro.

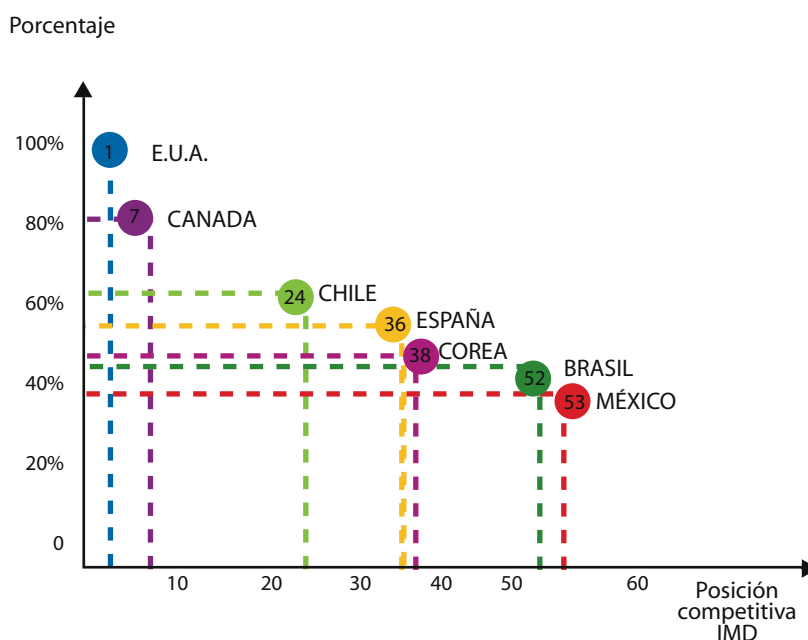
### III. LA REFORMULACIÓN DE LAS POLÍTICAS EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y EDUCACIÓN SUPERIOR COMO ESTRATEGIA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SOCIEDADES DEL CONOCIMIENTO

En la renovación de la educación superior y en el fortalecimiento de los sistemas de investigación, radica una gran posibilidad de construir sociedades altamente alfabetizadas, creativas, responsables y críticas; sociedades preparadas para construir conocimientos y aprovecharlos en su beneficio, favoreciendo el bienestar genérico, la justicia social y el desarrollo sustentable de su nación al proponer soluciones innovadoras a los problemas más relevantes de nuestro tiempo.

Para lograr vincularse con la investigación científica, tecnológica y humanística, la educación superior debe realizar un esfuerzo adicional en su transformación y constituirse en pieza clave para la producción de innovaciones que permitan el desarrollo de nuevos sistemas sociales y culturales. Las políticas de educación superior deben hacer converger las tareas de investigación con los problemas sociales que enfrenta la humanidad en su búsqueda por una mejor calidad de vida.

CUADRO 9.

NIVEL DE COMPETITIVIDAD INTERNACIONAL, 2006



Fuente: CONACYT, *Informe general del estado de la ciencia y la tecnología*, México, 2006.

Por ello se deben construirse políticas eficaces que promuevan la participación relacional de nuevos actores y la creación de nuevas sinergias e interacciones dinámicas y simétricas entre los múltiples ambientes naturales y culturales que conforman la complejidad de las naciones. La reformulación de políticas públicas de investigación, innovación y educación superior requiere considerar la realidad única configurada por cada sociedad, y recordar que hay diversos enfoques acerca de las ventajas y desventajas que conllevan la producción y el uso social del conocimiento.

Sin embargo, cabe aclarar que no basta que haya desarrollo social y económico como el resultado deseable de los cambios de las políticas de ciencia y tecnología; se debe tener presente que en las sociedades del conocimiento, la equidad se erige como uno de los principios éticos fundamentales para garantizar que todos los individuos de una sociedad (sin importar su género, lengua, etnia, creencias, preferencias sexuales o cualquier otra diferencia) puedan gozar de condiciones iguales en el ejercicio pleno de sus derechos humanos, en su posibilidad de contribuir al desarrollo nacional político, económico, social y cultural, así como de beneficiarse de sus resultados.

Lograr la equidad requiere cambios en las prácticas institucionales y en las relaciones sociales que en la actualidad refuerzan y legitiman las disparidades sociales. Por ejemplo, una de las principales preocupaciones de la UNESCO (2001) ha sido lograr integrar una perspectiva de género en la política, la planificación, la programación, la implantación y las actividades de evaluación de todas las áreas de competencia de la UNESCO, con el fin de promover el fortalecimiento y cumplimiento de un esquema más equitativo.

Cabe entonces reconocer que, para consolidar una sociedad donde prevalezcan la justicia y la equidad se deben tomar en cuenta las especificidades, las condiciones de vida, las relaciones de poder y las problemáticas entre los grupos minoritarios y hegemónicos.

Una forma para reducir las asimetrías prevaletientes en las relaciones sociales entre grupos es el acceso universal a la educación, dado que unas de las grandes desigualdades se ha propiciado por contar con menor acceso a las fuentes de conocimiento y, por ende, a la toma de decisiones. Esto también les ha restringido un mayor acceso a empleos dignos y, por supuesto a contar con condiciones laborales justas.

Todo esto nos lleva a recalcar la imperiosa necesidad de desarrollar políticas educativas fundamentadas en el principio ético de la equidad. De esta forma se podrán impulsar acciones estratégicas en nuestros países, tales como:

- Fomentar el empoderamiento, entendido como el reconocimiento de las capacidades, el desarrollo de habilidades, así como la puesta en práctica de estrategias por parte de todos los grupos sociales, que les posibiliten el acceso equitativo a recursos, oportunidades y toma de decisiones.
- Impulsar la participación y el reconocimiento de todos los grupos sociales en los distintos campos del saber.
- Promover el desarrollo de la investigación desde las necesidades e intereses propios de cada grupo, abriendo nuevas orientaciones interdisciplinarias y transdisciplinarias.
- Establecer canales formales de diálogo entre grupos, organizaciones sociales e instancias gubernamentales para promover la participación de todos en el desarrollo científico, humanístico, artístico y tecnológico del país.
- Desarrollar programas que incrementen el acercamiento y la participación de todos los sectores sociales, culturales, políticos y científicos para promover las capacidades de innovación desde la infancia, y de manera primordial en la educación superior.
- Empezar una campaña de concientización y divulgación que promueva la equidad en todos los aspectos del desarrollo del país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brint, S. 2001. "Professionals and the 'Knowledge Economy'", en "Rethinking the theory of postindustrial society", en *Current Sociology*, 49 (4), pp. 101-132.

Etzkowitz, H. y L. Leydesdorff. 1997. *Universities in the Global Economy: A Triple Helix of University-Industry-Government Relations*, Cassell Academic, Londres.

Tilak, J. 2002. "Knowledge Society, Education and Aid", en *Compare*, 32 (3), pp. 297-310.

Tünnermann, C. y De Souza, M. 2003. "Challenges of the university in the knowledge society. Five years after the World Conference on Higher Education", en *UNESCO-IESALC Forum Occasional Paper Series*, documento núm. 4, París.

UNESCO. 2001. *Medium Term Strategy for 2002-2007*, Nueva York.

\_\_\_\_\_. 2005. *Hacia las sociedades del conocimiento*, París.







# ENTREVISTA AL DOCTOR GARCÍA-BELLIDO, PREMIO MÉXICO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA 2006

JULIA TAGÜEÑA

Directora General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM

**A**NTONIO GARCÍA-BELLIDO Y GARCÍA DE DIEGO (MADRID, 1936) ESTUDIÓ CIENCIAS biológicas y el doctorado en la Universidad Complutense de Madrid. Es Doctor Vinculado “*Ad Honorem*” del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Dirige el Laboratorio de Genética del Desarrollo del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa del CSIC y de la Universidad Autónoma de Madrid. García-Bellido y su equipo de investigación, a lo largo de más de 40 años, han hecho descubrimientos que revelan los procesos y mecanismos básicos del desarrollo de los seres vivos, con el modelo de la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. Llega a proponer una teoría estimulante y aceptada del control de la actividad génica durante el desarrollo. Es significativa su aportación en la determinación celular sobre el control de la proliferación celular y su trabajo sobre la caracterización genética de genes. Sus hipótesis sobre las jerarquías de genes controladores del desarrollo y sus ideas sobre la generación posicional por las células y por las interacciones entre las mismas han merecido reconocimiento de colegas en todo el mundo. García-Bellido ha publicado más de 190 trabajos en revistas de gran importancia como *Nature*, *Science*, *Cell*, entre muchas más. Se le considera el padre de la escuela española de genetistas del desarrollo. Ha formado a más de 25 doctores, contribuyendo a la tradición de excelencia internacional del campo. Ha recibido numerosas distinciones: el premio Príncipe de Asturias, el de l’Académie des Sciences, el “Santiago Ramón y Cajal”, la Medalla Rey Jaime I, y la Encomienda de Alfonso X el Sabio, entre otras.

**L**A DOCTORA JULIA TAGÜEÑA PARGA ES CIENTÍFICA INVESTIGADORA Titular C en el Centro de Investigación en Energía y Directora General de la Dirección General de Divulgación de la Ciencia, ambas entidades de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Por lo que se refiere a la investigación, cultiva la física del estado sólido, reportando sus resultados en numerosos artículos en revistas internacionales. En lo que se refiere a divulgación de la ciencia, además de artículos y libros que versan sobre este aspecto, diseñó y supervisó la construcción de la sala de Energía de *Universum*, Museo de las Ciencias de la UNAM. Ha sido reconocida por esta amplia labor académica a través de su pertenencia al Sistema Nacional de Investigadores, donde tiene el nivel III. La Fundación Tlacaélel del Estado de Morelos la distinguió con la Presea Tlacaélel en la categoría de Desarrollo Científico en 2001 y en marzo de 2003 recibió el premio “Juana Ramírez de Asbaje” otorgado por la UNAM a las universitarias sobresalientes en sus áreas de conocimiento y en sus ámbitos de desempeño profesional.

# ENTREVISTA AL DR. GARCÍA-BELLIDO, PREMIO MÉXICO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA 2006

JULIA TAGÜEÑA

Directora General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM

**JT:** El Premio México de Ciencia y Tecnología es el mayor reconocimiento que ofrece México a los científicos iberoamericanos más destacados. Esta distinción fue establecida en 1990 por la Presidencia de la República como reconocimiento a las labores científicas y tecnológicas realizadas en Iberoamérica y el Caribe, para estimular el enlace de sus comunidades científicas con México. Se concede cada año a una persona, ciudadano no mexicano de esta región, de reconocido prestigio profesional que haya contribuido de manera significativa al conocimiento científico universal, al avance tecnológico o al desarrollo de las ciencias sociales. Me consta, porque en una ocasión fui parte del jurado, que es un premio muy competido. La región iberoamericana está llena de talentos. El último premio otorgado, el de 2006, recayó en una gran personalidad de las ciencias biológicas, el doctor Antonio García-Bellido, considerado el padre de la biología del desarrollo moderna en España. El doctor García-Bellido ha recibido muchos otros premios, tanto nacionales como internacionales, y ha ocupado cargos muy importantes. En la actualidad es director del Laboratorio de Genética del Desarrollo del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa y doctor vinculado *Ad Honorem* del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. *Doctor García-Bellido, ¿es éste su primer encuentro con México, o ya ha tenido otros nexos con mi país?*

**AGB:** No es mi primer encuentro con México. Estuve allí en un simposio en 2001. He tenido un constante interés en la historia de México, su extraordinaria cultura, la llegada y estancia de los españoles. La Nueva España era la provincia más querida y atendida de todas las americanas. Después he seguido con atención su producción artística, pictórica y literaria.

**JT:** Parte de la motivación de otorgar el premio México de Ciencia y Tecnología reside en resaltar ejemplos de éxito. Al difundir las contribuciones sobresalientes en la ciencia y la tecnología, se espera que las nuevas generaciones reciban el impulso necesario para incorporarse al quehacer científico y tecnológico. Los ejemplos son muy importantes en el proceso de formación personal, empezando por la propia familia. Al leer su biografía, no me queda la menor duda de la influencia académica de su padre, a quien nada menos se le considera el creador de la arqueología española moderna. Sin embargo, su madre era también académica, maestra de griego, y hay estudios estadísticos que señalan la importancia de la preparación de la madre en el desarrollo profesional de sus hijos. *¿Es esto cierto en su caso? ¿De qué manera influyó su madre en su trabajo académico?*

**AGB:** Mi madre influyó al mantener una educación de familia, con los valores de sobriedad, trabajo y autenticidad. Sin embargo, en el ambiente académico pudo contribuir poco.

**JT:** Otro detonador de vocaciones es la lectura. Usted ha comentado la importancia que tuvo el libro *¿Qué es la vida?*, de Erwin Schrödinger (uno de los constructores de la mecánica cuántica), en su vocación científica. Como yo soy física, permítame, antes de atreverme a plantearle preguntas de biología, formularle una cercana a mi campo. La mecánica cuántica no se ha incorporado al conocimiento popular y es muy poco estudiada en los niveles de bachillerato. Incluso ha sido muy mal empleada en argumentos de pseudociencia. Sin embargo, es la base de prácticamente todos los avances tecnológicos que nos rodean y de ciencias afines que estudian el mundo atómico y molecular. *¿Podría comentarnos acerca de la importancia de la física, en particular la cuántica, en el desarrollo de su área de trabajo?*

**AGB:** La física cuántica fue una revolución en la física de lo pequeño y resultó ser la base de la química moderna y, con ello, de la biología molecular. Pero su mayor poder de resolución la aleja de la complejidad biológica, por ejemplo, en genética y en biología del desarrollo.

**JT:** Siguiendo con el tema de la lectura, los libros de divulgación de la ciencia son muy importantes para que el público no especializado se acerque a temas de ciencia y tecnología. Cada vez más se reconoce la importancia de desarrollar una cultura científica y tecnológica en la sociedad, y el papel de los divulgadores y periodistas científicos se está revalorando. Sin embargo, leí una crítica suya, bastante dura, sobre este tipo de literatura, en la que comenta que muchos libros de divulgación científica le parecen superficiales y con demasiadas analogías. *¿Cuál sería su consejo a un divulgador de la ciencia? ¿Cómo evitar el uso de analogías? ¿Cómo transmitir conceptos abstractos?*

**AGB:** El problema de la divulgación científica depende del nivel de su enfoque. Es excelente para abrir vocaciones para los jóvenes y para las personas curiosas que quieran acercarse a los descubrimientos científicos. Sin embargo, resulta peligrosa en temas más concretos; no es posible operar con ella en el trabajo de investigación. Por tanto, el recurso de la analogía o la metáfora es perturbador porque puede dar la impresión de que se ha entendido algo y se puede pasar u operar con ello en el progreso del conocimiento. El problema tiene mala solución.

**JT:** Me gustó mucho una frase suya “No confundamos lo complejo con lo meramente complicado”. *¿Podría elaborar sobre la complejidad de la vida?*

**AGB:** La noción de complejidad es muy difícil de definir. Hay que confrontarla con otra más sencilla, de la diversidad. Los aspectos generativos de los seres vivos, su desarrollo y evolución revelan pocos pasos hacia más complejidad; la mayoría son en el sentido de la diversidad. La base molecular de los seres vivos es un derivado de la química. La combinación de elementos y su reiteración genera aminoácidos, ácidos nucleicos, azúcares que dan lugar a estructuras complejas que difieren en su diversidad pero son invariantes en sus propiedades. En niveles fenomenológicos más altos, polímeros y sus interacciones crean el primer nivel de complejidad biológica. Su asociación en unidades operativas: genes, proteínas, metabolismo, sería un segundo nivel. Las reglas de transformación de unos a otros niveles son muy invariantes y están conservadas en evolución. La aparición de células (bacterias) de organismos multicelulares (embriones) también resulta de la iteración y combinación de elementos de nivel inferior, con reglas operativas propias. La aparición del sistema nervioso y su organización en cerebro y eventualmente conciencia, también parecen resultar de las mismas transformaciones entre niveles fenomenológicos. El tema en estos niveles es diversidad.

**JT:** Entonces puede decirse que cada día más, los biólogos empiezan a comprender la complejidad de la vida: el intrincado mecanismo del ojo, la asombrosa ingeniería del brazo, la arquitectura de la pluma de un ave o de una flor. Cerca de 150 años después de que Darwin publicara su elegante explicación sobre la evolución, es aún difícil aceptar la evolución de estructuras complejas. Esto se debe a que solemos





mirar a la selección natural, como si actuara sobre una única característica: hacer más peludo a un animal, alargar un cuello, promover manchas miméticas. Lo difícil es imaginar a la evolución produciendo un órgano complejo nuevo, que incluya todos sus componentes en una interacción armoniosa. Los creacionistas señalan que la vida es demasiado compleja como para haber evolucionado y señalan que las estructuras complejas sólo pueden ser el resultado de un diseño inteligente. Pero los biólogos no comparten esta idea, y menos ahora en que cada día hay más evidencias de la existencia de paquetes de genes, operaciones genéticas que actúan de manera combinada, que regulan la formación conjunta de estructuras complejas que sugieren que a lo largo de la evolución los apéndices se han hecho diferentes, pero la maquinaria para la elaboración es la misma. *¿Desde cuándo se sabe de la existencia de estos paquetes de genes, cómo actúan y cuál ha sido su aportación a su estudio? ¿Dónde entra el gen realizador?*

AGB: El descubrimiento de que los genes están conservados ha cambiado nuestra noción de desarrollo y de la evolución; pero no sólo los genes que codifican para estructuras celulares sino sus genes coadyuvantes y, en particular, sus reguladores y sus dependientes. Los genes están relacionados, interactúan, por reconocimiento molecular, proteína-proteína, proteína-DNA, etc. También estas interacciones están conservadas: definen o especifican operaciones de desarrollo (división celular, comunicación celular, apoptosis y un largo etcétera). En morfogénesis, genes reguladores determinan actividades específicas de genes jerárquicamente debajo, que definen y especifican estas operaciones y, por último, diferenciación y comportamiento celular y –por extensión– forma y tamaño. Estos genes son los genes “realizadores” bajo control de genes “selectores” en sistemas que yo he llamado “sintagmas”.

JT: En los países donde hablamos español siempre hay diferencias de lenguaje y la mosca *Drosophila melanogaster* en México se llama la mosca de la fruta, mientras que en España es la mosca del vinagre. Yo defendería el nombre mexicano porque siempre me las encuentro alrededor de la fruta demasiado madura, nunca junto al vinagre. Sus trabajos en esta mosca son muy importantes, por ejemplo sobre la formación del ala. *¿Por qué este organismo ha sido tan importante en el estudio de la genética del desarrollo de todas las especies animales, incluyendo la humana?*

AGB: *Drosophila* es el organismo multicelular en el que se ha iniciado la genética del desarrollo: el entender qué hacen los genes especificando morfogénesis. Pero como vimos antes, el hecho de que genes y sus sintagmas estén conservados significa que, al identificar los genes homólogos en otros organismos, estamos preparados para entender por comparación procesos complejos en ellos.

JT: Entonces esta famosa mosca *¿sigue aportando descubrimientos sorprendentes para los estudios genéticos clásicos?*

AGB: La *Drosophila*, por ser el mejor modelo de organismos conocido genéticamente, nos depara en forma continua nuevas vistas sobre procesos evolutivos, división celular, regeneración, forma y tamaño de órganos y apéndices, patrones de diferenciación, etcétera.

**JT:** *Si este tipo de genes no son únicos de las moscas sino que se presentan en otros organismos, se refuerza cada día más la idea del origen común de la vida? ¿Considera usted que estos descubrimientos cambian nuestra manera de ver la vida?*

**AGB:** La idea del origen químico de la vida está establecida por completo. La variación de origen, digamos en el mundo del RNA, resulta de selección de los componentes por sus operaciones energéticamente más eficientes. Desde ahí han aparecido genes complejos: polímeros, células, sistemas multicelulares, embriogénesis, sistema nervioso y comportamiento, con gran creatividad pero también gran inercia. Esta complejidad limitada por reconocimiento molecular resulta en combinaciones, reiteraciones, control temporal y espacial de actividad génica, por lo que el inventario de diversidad es muy grande pero no más complejo. El número de módulos de proteínas, genes y sintagmas es más bien reducido, resultando de las limitaciones del reconocimiento molecular. Cada vez más lejos de nuestro enfoque la insistencia en la diversidad de las llamadas ciencias naturales clásicas. Estos descubrimientos han supuesto un cambio de paradigma filosófico. La biología es ahora una ciencia dura donde el desarrollo de los procesos puede ser predicho porque analizamos las reglas de las interacciones y éstas resultan estar conservadas. Desarrollo y evolución y, yo añadiría, comportamiento, son ciencias cada vez más objetivables.

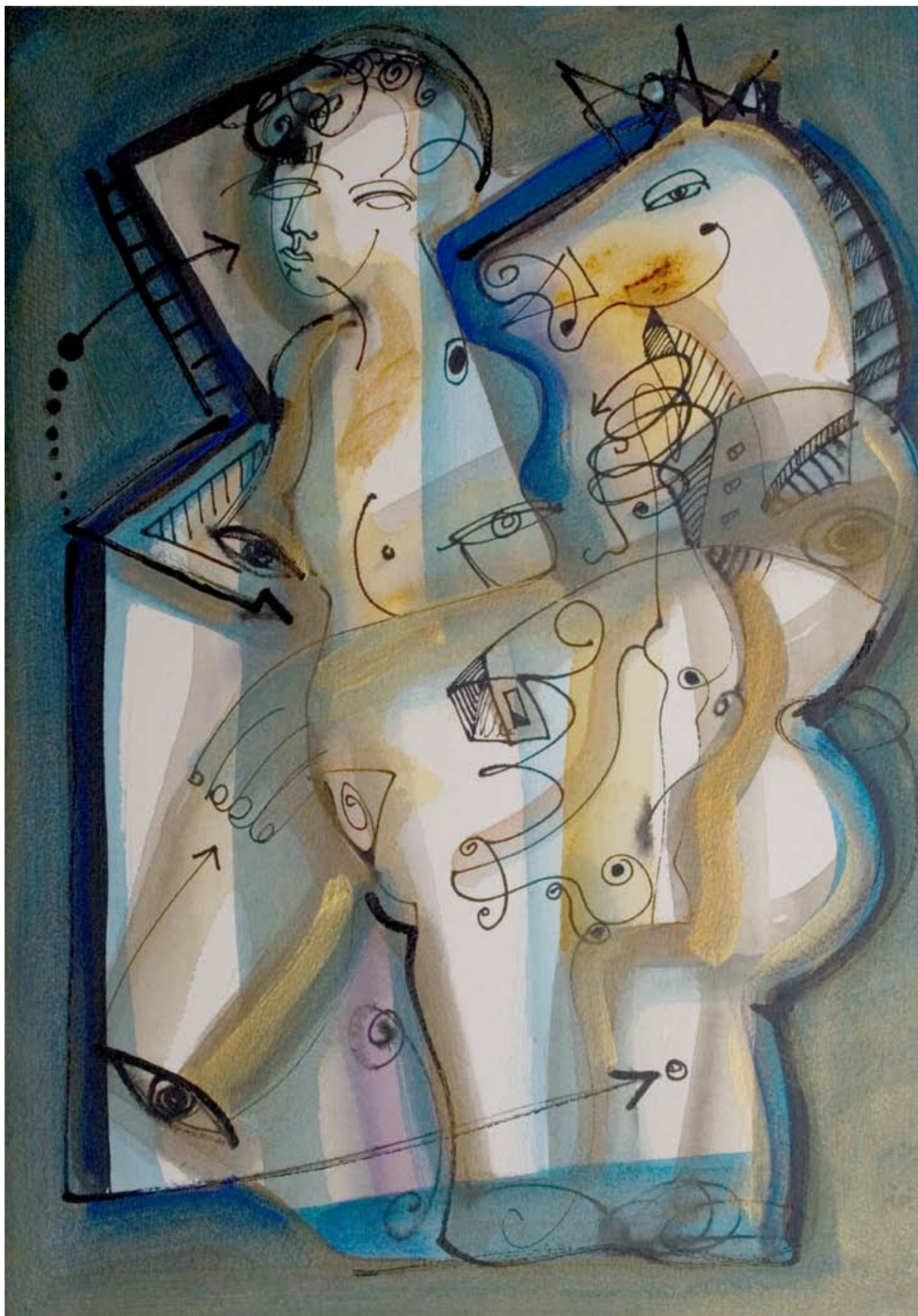
**JT:** *A usted se le considera el padre de la biología del desarrollo en España. Se puede decir que la biología del desarrollo estudia los procesos mediante los cuales los organismos crecen y se desarrollan. La biología del desarrollo actual, gracias al trabajo precursor de científicos como usted, estudia los controles genéticos del crecimiento celular, la diferenciación celular y la morfogénesis (el proceso que origina los tejidos, órganos y la anatomía). ¿Hacia dónde va la biología del desarrollo? ¿Cuál es el futuro de las asombrosas investigaciones que nos ha contado y qué repercusiones tendrán? ¿Podríamos pensar en aplicaciones médicas o biotecnológicas?*

**AGB:** La biología del desarrollo se atreverá más y más con procesos complejos forma-tamaño de órganos, la construcción del sistema nervioso, y otras preguntas básicas. La extensión de estos conocimientos nos ayuda a entender evolución y comportamiento y la corrección de los daños funcionales debidos a infección, cáncer, malformaciones hereditarias, senescencia y enfermedades mentales. Estos conocimientos sirven y servirán para mejoras en biotecnología o producción animal y agronomía.

**JT:** *Por último, ¿cómo ve la situación iberoamericana en investigación en este tema? ¿Hay espacios de colaboración adecuados en nuestra región?*

**AGB:** La investigación iberoamericana en biología tiene una gran tradición en Argentina, Chile, México y Brasil. Nuevas generaciones de científicos bien formados salen al extranjero y participan en los avances de la ciencia mundial. Los que vuelvan a sus países contribuirán más y más a mejorar el nivel de las investigaciones nacionales. La ciencia es una empresa internacional y con el tiempo las colaboraciones, tanto operativas como conceptuales, potenciarán la de la ciencia americana.





# EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS, UN PROYECTO TRANSATLÁNTICO DE COOPERACIÓN

FRANCISCO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

Director del Instituto de Astrofísica de Canarias

**E**L GRAN TELESCOPIO CANARIAS (GTC) ES EL MAYOR TELESCOPIO ÓPTICOINFRARROJO hasta ahora construido. Con él, la comunidad astronómica española, junto con sus socios en este proyecto, las comunidades de México y de Florida, contarán con el telescopio más avanzado del momento. Este instrumento les ha de permitir mantener e incrementar sus altos índices de productividad científica y dar un paso decisivo en el terreno del desarrollo de instrumentación científica avanzada. Este proyecto, además, ha permitido a España iniciarse en el liderazgo de proyectos de la llamada “gran ciencia”. El costo del proyecto estimado en la actualidad es de 131 419 815 euros (de 2006); se mantiene próximo a las previsiones iniciales; en estos momentos se desvía 0.5% sobre la cifra estimada en 1997, una vez corregida de inflación, y considerando la inflación de la zona euro. Si se toma en cuenta la inflación española, el costo se situaría bien por debajo de lo estimado en un principio.

**F**RANCISCO SÁNCHEZ MARTÍNEZ, PIONERO Y PROMOTOR DE LA ASTROFÍSICA EN ESPAÑA, crea el primer grupo de investigación astrofísica del país y lleva adelante acciones múltiples para capacitar investigadores y tecnólogos. Funda y dirige el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Interviene de forma directa en cerca de un centenar de publicaciones y comunicaciones científicas. Hace posible la construcción por España del mayor y más avanzado telescopio óptico-infrarrojo del momento: el Gran Telescopio Canarias de espejo segmentado y más de 10 metros de diámetro, que entrará en servicio en 2007. Impulsa la difusión cultural de la astronomía y la astrofísica en el país y su popularización. Coopera con México en la estimulación de las sinergias entre las comunidades científicas mexicana y española, para el fortalecimiento de la astronomía y sus tecnologías conexas en las universidades y centros de investigación de México. Pruebas de ello son la exitosa participación de la UNAM en el Gran Telescopio Canarias y los Encuentros Blas Cabrera. Encomienda con placa de la Orden Civil de Alfonso X el Sabio. Comendador de Número de la Orden del Mérito Civil. Commander of the Royal Order of the Polar Star (Suecia). Doctor Honoris

Causa de la Universidad de Copenhague. Associate of the Royal Astronomical Society. Commandeur dans l'Ordre des Palmes Académiques (Francia). Académico de la Academia Canaria de Ciencias. Caballero de la Orden Real de Orange-Nassau (Países Bajos). Doctor Honoris Causa del Instituto Nacional de Astronomía, Óptica y Electrónica (México). Comendador de número de la Orden de Isabel la Católica. Premio CEOE a las Ciencias. Gran Cruz de la Orden Islas Canarias. Académico de la Real Academia de Bellas Artes y Ciencias de Toledo. Commendatore de la Stella della Solidarieta Italiana. Académico de la Academia Mexicana de Ciencias.



# EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS, UN PROYECTO TRASATLÁNTICO DE COOPERACIÓN

FRANCISCO SÁNCHEZ MARTÍNEZ  
Director del Instituto de Astrofísica de Canarias

## LA OBSERVACIÓN CLAVE DEL AVANCE ASTRONÓMICO

DESDE QUE LA ASTRONOMÍA, LA CIENCIA ORGANIZADA más antigua, empezó a usar el método científico, necesita observar y medir para avanzar en el conocimiento del Universo al que pertenecemos. Es necesario medir y remedir el mayor número posible de parámetros físicos de los incontables objetos celestes para tener alguna seguridad de que nos acercamos a entender la realidad inmensa de lo que llamamos el Cosmos. La observación repetida, y cada vez más afinada, de los astros en todas las longitudes de onda disponibles, constituye la fuente del saber astronómico moderno. Y es bueno recordar que más del noventa y muchos por ciento de lo que sabemos ahora se adquirió en el último siglo, gracias al avance espectacular de la ciencia y de la tecnología. También conviene recordar que la teoría más elegante y convincente necesita de la observación astronómica para ser validada. *La observación ha sido, es y será la “piedra de toque” de todo modelo astronómico.*

Es ahora cuando podemos penetrar en el Universo lejano. Y como *los telescopios son auténticas “máquinas del tiempo”*, es ahora cuando empezamos a poder conocer la historia del Universo. Los más grandes telescopios que se puedan construir nos permitirán “ver” cómo era el Universo en sus etapas tempranas, y planetas capaces de albergar vida.

Pero seamos conscientes de que la especie humana tiene un cúmulo de problemas para poder observar lo que hay en el cielo. Por desgracia, estamos mal dotados y mal situados para ver el

Universo. Para empezar, caigamos en la cuenta de que somos unos bichos cegatos para mirar lejos. Nuestros ojos son unos órganos visuales pobrísimos. Su óptica es simple y pequeña, y sus receptores, poco sensibles, los cuales, además, sólo captan una pequeñísima parte del espectro electromagnético.

Como vivimos en la Tierra, un planeta con atmósfera absorbente y perturbadora, partes muy importantes del espectro no llegan hasta nuestros instrumentos de observación y, además, las imágenes de los objetos extraterrestres se reciben deterioradas. La atmósfera ha sido y es aún la pesadilla del astrónomo.

Por si fuese poco, estamos inmersos en zonas absorbentes de polvo y gas. La primera es el medio interplanetario con su “nube zodiacal” de micrometeoroides (los mismos que impactan en los vehículos espaciales y los dañan). Después, está el medio interestelar que constituye una auténtica pantalla visual, en especial en el disco galáctico, cuajado de polvo y gas.

Pese a estas dificultades evidentes, la curiosidad humana y el impulso por conocer son tan poderosos en nuestra especie, que hemos ido venciendo todas estas barreras y penetramos, paso a paso, cada vez más lejos en el Universo. Emocionante epopeya de la que valdría la pena ser plenamente conscientes todos.

Esta necesidad de observar (aun lo que “no se ve”) cada vez mejor y con mayor profundidad pone en reto permanente a la tecnología. Por esto la astronomía demanda y produce tecnología avanzada. Por ello *esta ciencia básica es fuente permanente de avances tecnológicos*. Pero también, tal necesidad de observar exige emplazar los telescopios en sitios donde la atmósfera perturbe las observaciones lo menos posible.

Por lo anterior, en todos los estudios prospectivos sobre el futuro de la astronomía se concluye en la necesidad de:

- Observar en todo el espectro electromagnético.
- Instalar *telescopios gigantes*:
  - En los mejores sitios de la Tierra (Canarias es uno de ellos, lo mismo que San Pedro Mártir, en Baja California).

- A bordo de satélites y sondas.
- En la Luna y otros cuerpos del Sistema Solar.
- Medir la radiación corpuscular primaria (rayos cósmicos, neutrinos, etcétera).
- Detectar ondas gravitatorias.
- Conseguir muestras del espacio exterior.

En estos estudios prospectivos (realizados en los países más avanzados) se resalta la necesidad de *construir telescopios lo más grandes posible y situarlos en los mejores sitios del planeta*. Dado que en Canarias, las cumbres de las islas de Tenerife y de La Palma ofrecen condiciones excepcionales para la observación astronómica, el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) tiene en ellas los observatorios del Teide y del Roque de los Muchachos, donde está instalada la batería más completa de telescopios europeos del Hemisferio Norte, y donde se está terminando de poner en operación el Gran Telescopio Canarias (GTC).

### OBSERVATORIO DEL TEIDE (OT)

- Superficie: 50 hectáreas
- Longitud: 16°30'35" Oeste
- Altitud: 2 390 m
- Latitud: 28°18'00" Norte
- Situación: Isla de Tenerife (Islas Canarias, España)

Diámetro (cm)	Instrumento	Propietario	Operativo (año)
10	Telescopio STARE	HAO Boulder (EUA)	2001
30	Telescopio robótico Bradford	Universidad de Bradford (RU)	2005
40 × 2	<b>RED DE TELESCOPIOS ÓPTICOS</b>	Sociedad del Telescopio (EUA)	2004
50	<b>TELESCOPIO MONS</b>	Universidad Mons (B)	1972
60	Telescopio solar de Torre al Vacío (VTT)	Instituto Kiepenheuer (A)	1989
80	Telescopio IAC-80	IAC (E)	1993
90	Telescopio solar THEMIS	CNRS-INAF (FR-IT)	1996
100	<b>TELESCOPIO OGS</b>	IAC-ESA (E-internacional)	1996
120 × 2	Telescopio robótico STELLA	Instituto Postdam (A) Observatorio Hamburgo (A)	2005 y 2006
150	Telescopio solar GREGOR	Instituto Kiepenheuer (A) Universidad Gottingen (A) Instituto Postdam (A)	2007
155	Telescopio infrarrojo Carlos Sánchez (TCS)	IAC (E)	1972
	Interferómetro de microondas (VSA)	Universidad de Cambridge (RU) <b>UNIVERSIDAD DE MANCHESTER (RU)</b> IAC (E)	2002
	Radiotelescopios COSMO10 y COSMO15	IAC (E)	1996
	Instrumentos en el Laboratorio Solar: - Espectrofotómetro integral MARK-I - <b>Espectrofotómetro ECHO</b> - Tacómetro de Fourier GONG - Fotómetro de alta resolución TON +	Universidad de Birmingham (RU) + IAC (E) HAO Boulder (EUA) NSO (EUA) Universidad Tsing-Hua (Taiwán)	1978 2000 1996 1993

A = Alemania

B = Bélgica

E = España

EUA = Estados Unidos de América

FR = Francia

IT = Italia

RU = Reino Unido

**OBSERVATORIO DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS (ORM)**

- Superficie: 189 hectáreas
- Longitud: 17°52'34" Oeste
- Altitud: 2 396 m
- Latitud: 28°45'34" Norte
- Situación: Isla de La Palma (Islas Canarias/España)

Diámetro (cm)	Instrumento	Propietario	Operativo (año)
	Cámara robótica SuperWASP	Universidad Queens Belfast (RU)	2003
18	Telescopio Meridiano	IAC-ROA (E)	1984
20	Monitor de seeing (DIMM)	IAC-Universidad Niza (E-FR)	1984
45	Telescopio Solar Abierto Holandés (DOT)	Universidad Utrecht (PB)	1997
97	Refractor solar (SST)	R. Academia de Ciencias (S)	2002
120	Telescopio MERCATOR	Instituto Sterrenkunde (B) Universidad Leuven (B)	2002
200	Telescopio robótico Liverpool (LT)	Universidad John Moore Liverpool (RU)	2003
250	Telescopio Isaac Newton (INT)	PPARC (RU-PB-E)	1984
256	Telescopio Nórdico (NOT)	Asociación Científica NOT (D-FI-N-S--IS)	1989
350	Telescopio Nacional Galileo (TNG)	INAF (IT)	1988
420	Telescopio William Herschel (WHT)	PPARC (RU-PB-E)	1987
1.135	Gran Telescopio Canarias (GTC)	GRANTECAN (E-EUA-M)	2008
1.700 × 2	<b>TELESCOPIO CHERENKOV MAGIC</b>	Consortio MAGIC*	2005 + 2007

A = Alemania

AR = Armenia

B = Bélgica

D = Dinamarca

E = España

EUA = Estados Unidos de América

FI = Finlandia

FR = Francia

IT = Italia

M = México

N= Noruega

PB = Países Bajos

P = Polonia

RU = Reino Unido

R = Rusia

S = Suecia

U = Ucrania

IS = Islandia

\***Consortio MAGIC:** Instituto Física d'Altes Energies (E); Universidad Autónoma Barcelona (E); Observatorio de Crimea (U); Universidad de California (EUA); Universidad Gottingen (A); Universidad Lodz (P); Universidad Complutense de Madrid (E); Instituto Nuclear Research (R); Instituto Max-Planck Munich (A); Universidad Padua (IT); Universidad Potchefstroom (PB); Universidad GH-Siegen (A); Universidad Siena (IT); Observatorio Tuorla (FI); Universidad Wurzburg (A); Instituto Física Yerevan (AR).

Desde 1988 una ley protege la calidad del cielo sobre los observatorios del IAC, lo que los convierte en una verdadera “reserva astronómica”, en la que se encuentran instalados telescopios e instrumentación científica de 62 instituciones de 19 países. Su conjunto constituye el European Northern Observatory.

La astrofísica en España, gracias sobre todo a la explotación del “cielo de Canarias”, ha sufrido en los últimos cuarenta años un despertar impresionante; ha avanzado en tiempo récord desde casi cero hasta el grupo de países que encabezan esta rama de la ciencia. A pesar de ubicarse entre los países que menos invierten en Europa en investigación científica, se ha colocado en el séptimo lugar en resultados astronómicos.

## EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS

El Gran Telescopio Canarias (GTC) es **el mayor y el más avanzado telescopio óptico-infrarrojo** construido hasta ahora. El proyecto nació a iniciativa del Instituto de Astrofísica de Canarias, con el objetivo múltiple de:

- Dotar a la comunidad astronómica española de un instrumento propio avanzado y competitivo.
- Mantener a los Observatorios de Canarias entre los primeros del mundo.
- Estimular a la industria española.

El Gran Telescopio Canarias (GTC) se está terminando de instalar en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), en la isla de La Palma, cuya geografía y clima se unen para proporcionar condiciones excepcionales para la observación astronómica. El observatorio se halla por encima del “mar de nubes”, a 2400 metros sobre el nivel del mar, donde, gracias a los vientos alisios, la atmósfera es extraordinariamente estable y transparente. Con la presencia del GTC, el Observatorio del Roque de los Muchachos se mantiene entre los pocos lugares de la Tierra —tan sólo tres así reconocidos—, cuyas condiciones los hacen candidatos adecuados para *albergar, también, los telescopios súper gigantes del futuro inmediato*.

El GTC cuenta con un espejo primario segmentado, compuesto por un mosaico de 36 segmentos vitrocerámicos hexagonales de 1.9 m de diagonal cada uno, que forman una superficie colectora equivalente a la de un espejo circular de 10.4 m de diámetro. Con esta superficie colectora el GTC es el instrumento ideal para el estudio de los más distantes y los más débiles de nuestro universo, desde galaxias lejanas recién nacidas, hasta los sistemas planetarios en estrellas de nuestros alrededores.

Los requisitos principales que han dirigido el desarrollo y construcción del GTC son disponer de una gran calidad óptica y una alta eficiencia observacional.

Para alcanzar el primero de estos requisitos, el GTC cuenta con los elementos ópticos de la mayor calidad posible con las actuales tecnologías, una estructura mecánica de gran rigidez y un sistema avanzado de control de la calidad óptica final.

Esto se logra al vigilar ópticamente la forma y posición de todos y cada uno de los segmentos del espejo primario, mantener el alineamiento del sistema óptico y compensar las vibraciones residuales del conjunto del telescopio con movimientos rápidos del espejo secundario, extraordinariamente ligero y rígido debido a que está fabricado en berilio aligerado.

La eficiencia observacional se logra al disponer de múltiples focos, siete en total, dotado cada uno de ellos de instrumentos científicos específicos que pueden seleccionarse con un simple movimiento del espejo terciario. Una gestión por colas de los programas de observación permitirá optimizar el trabajo por realizar con el GTC seleccionando en cada momento el programa de observación más adecuado, en función de las condiciones meteorológicas del momento y del estado operativo de cada instrumento.

Aunque durante la década de 1990 se comenzó a pensar el proyecto, a conseguir los apoyos económicos e institucionales necesarios y a desarrollar los conceptos del telescopio, fue a mediados de 2000 cuando se realizó la ceremonia de colocación de la primera piedra en el ORM, presidida por SAR el Príncipe de Asturias (heredero del Reino de España y Astrofísico de Honor del IAC).

Otro año muy importante es el 2001, en el que se incorporan de manera formal al proyecto las principales instituciones astronómicas de México y la Universidad de Florida. La participación de estas instituciones es de 5% cada país, lo que supone que cubren 10% del costo de la construcción y de su operación posterior, a cambio de 10% del tiempo de observación.

El 13 de julio de 2007 el Gran Telescopio Canarias tuvo, con todo éxito, su “*primera luz*” (acto de apuntar al cielo y ser capaz de captar los primeros fotones extraterrestres) en presencia de SAR el Príncipe de Asturias, la titular del Ministerio español de Educación y Ciencia, el presidente del gobierno de Canarias, autoridades, socios americanos del Instituto de Astronomía de la UNAM, del INAOE, de la Universidad de Florida y una significativa representación de la comunidad astronómica internacional.

También es importante señalar que en el ingreso de España en la organización ESO (European Southern Observatory), es el GTC el principal pago “en especies” para aminorar la cuota de entrada que ha de pagar el país. ESO utilizará hasta 173 noches de observación del GTC a cambio de una reducción de algo más de 15 millones de euros de la cuota de entrada que debe pagar España.

El costo del proyecto, estimado en la actualidad, es de 131 419 815 Euros (de 2006), el cual se mantiene próximo a las estimas iniciales; en estos momentos se desvía 0.5% en relación con la inflación de la zona euro, sobre la cifra estimada en 1997. Ahora bien, si se considera la

inflación española, el costo se situaría bien por debajo de lo estimado en un inicio.

### CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON EL GTC

Los principales objetivos científicos perseguidos por el GTC son determinados por su gran espejo primario, que le permite *llegar a los confines más remotos del universo y ver con sumo detalle los objetos celestes más cercanos*. Desde el principio se pretende dedicar tiempo a la búsqueda y el estudio de planetas en estrellas cercanas, así como al estudio de las galaxias más lejanas, para entender su evolución y la de las poblaciones estelares a lo largo de la vida del Universo. Se buscan con el GTC respuestas a preguntas como:

- ¿Cuál es la naturaleza de las galaxias muy lejanas, cuando el universo tenía una edad de tan sólo 20% de la actual?
- ¿Cuáles son sus equivalentes actuales?
- ¿Cómo han evolucionado aquellas galaxias?
- ¿Son ellas, tan activas en formación estelar, los progenitores de las actuales y “tranquilas” galaxias?
- ¿Cuándo y en qué condiciones se iniciaron los primeros episodios de formación estelar?
- ¿Cómo se forman y evolucionan los sistemas planetarios?

Los objetivos tecnológicos finales tienen que ver con la *transferencia de las tecnologías desarrolladas al tejido empresarial* y con que nuestras industrias se abran al mercado de la instrumentación científica y se posicionen en forma estratégica para abordar los desarrollos asociados con los telescopios gigantes del próximo futuro, tanto en tierra como en el espacio.

En concreto, los programas científicos que se abordarán con el GTC son los que han configurado conceptualmente cada uno de los instrumentos que serán instalados en los focos de este telescopio, el cual dispondrá de una poderosa y avanzada instrumentación focal:

1. **OSIRIS** (*Optical System for Imaging and Low Resolution Integrated Spectroscopy*) podrá obtener imágenes directas del cielo en el rango visible y realizar espectroscopía de varios objetos a la vez.

2. **CANARICAM** podrá “detectar” el calor de las estrellas. Será capaz de obtener imágenes, hacer espectroscopía, polarimetría y coronografía en el rango espectral del infrarrojo medio.
3. **ELMER** es el instrumento de repuesto, pensado para hacer imagen y espectroscopía de baja resolución en el rango visible. Será capaz de obtener imágenes convencionales con filtros de banda ancha y estrecha que permitirán hacer comprobaciones de calibración del propio telescopio.
4. **EMIR** es un espectrógrafo multiobjeto de gran campo que trabajará en el infrarrojo cercano. Instrumento de segunda generación (que entrará en servicio algunos años después), será clave para el estudio de la historia de la formación de estrellas en el Universo. Permitirá obtener espectros para muchas fuentes de modo simultáneo al usar el método de máscaras multirrendija.

Otro instrumento para ser instalado en el futuro inmediato es FRIDA, diseñado para sacar el máximo rendimiento en imagen y espectroscopía de alta resolución espectral y espacial a las facilidades de óptica adaptiva del GTC. Además se debate ahora sobre otros instrumentos en el seno de los grupos científicos de las comunidades astronómicas de España, México y Florida.

Para hacerse una idea más directa de lo que se llevará a cabo con los instrumentos de “día uno” del Gran Telescopio Canarias, diremos que OSIRIS es el primer instrumento de observación astrofísica dotado con filtros espectrales estrechos sintonizables instalado en un telescopio de gran diámetro. Con tales características, el grupo científico que está detrás de OSIRIS va a realizar, entre otros muchos programas de observación, el primer catálogo homogéneo de indicadores de formación estelar en galaxias desde las galaxias próximas hasta el límite observable con el GTC.

Con las capacidades de polarimetría y coronografía en el rango de longitudes de onda del infrarrojo térmico que dispondrá CANARICAM, se realizarán observaciones únicas de sistemas planetarios y protoplanetarios en estrellas próximas y en etapas iniciales de formación; con ellas se profundizará en el conocimiento de las primeras etapas de formación de las estrellas.

EMIR, aun siendo un instrumento de repuesto, es el primer espectrógrafo multiobjeto criogénico en banda K del infrarrojo próximo del mundo. Está concebido para lograr, entre otros objetivos científicos, el conocer las características físicas de galaxias de alto desplazamiento al rojo ( $z > 2$ ).

Como el principal objetivo del GTC es contribuir con fuerza al avance del conocimiento de nuestro Universo, las comunidades astronómicas de los países implicados en el proyecto se han preparado para ello. Con regularidad se han reunido los grupos científicos para preparar la “Ciencia con el GTC”, y así precisamente se han llamado las reuniones internacionales sostenidas en Granada (2002), Ciudad de México (2004) y Miami (2006).

Pero el interés del GTC no es sólo científico, sino también tecnológico. La tecnología del GTC es la de los gigantescos telescopios que se planifican ya. Hasta antes del GTC, los telescopios segmentados han sido coto vedado de la industria de Estados Unidos de América. El GTC es el primer telescopio segmentado construido en Europa. Casi 100% del telescopio fue construido por la industria europea. Y algo más de **70%** lo fue por *la industria española*. Son los centros de investigación y las empresas colaboradoras que participaron en la construcción del GTC y sus instrumentos, quienes se encuentran ahora en *extraordinaria situación de ventaja frente a los futuros desarrollos de grandes telescopios*.

Sabemos ya que las empresas y centros que participaron en el GTC alcanzan ahora un éxito notable en sus licitaciones internacionales y se encuentran en una posición magnífica frente a los grandes proyectos ya en curso que se realizarán en nivel internacional mediante la Agencia Europea Espacial (ESA) o el Observatorio Europeo Austral (ESO), tales como ALMA (Atacama Large Millimeter Array), ELT (Extremely Large Telescope), SKA (Square Kilometre Array) o el telescopio espacial JWST (James Webb Space Telescope).

### LA COOPERACIÓN TRASATLÁNTICA POR MEDIO DEL GTC

La participación en este proyecto español de la Universidad de Florida, del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México y del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), va mucho más allá de su contribución económica de 10% (5% cada país). Estas instituciones, junto con el IAC y otras más de España, se han implicado en desarrollos tecnológicos importantes, que están dando sus frutos ya.

El *Instituto de Astronomía de la UNAM*, en colaboración con el *CIDESI*, ganó en competición internacional abierta el contrato para la fabricación del *Instrumento de Verificación del GTC*. Se trata de un instrumento destinado a servir como útil de verificación y calibración del telescopio y de su óptica, antes de instalar en la instrumentación focal. Su entrega y pruebas se completaron a principios de 2004.

Asimismo, el *Instituto de Astronomía de la UNAM* ha diseñado y construido la *difícil óptica de OSIRIS*, uno de los dos instrumentos de primera generación del GTC. Además, este Instituto lidera un consorcio internacional para construir el primer instrumento con óptica adaptiva del Gran Telescopio, llamado *FRIDA*.

Por su parte, el *INAOE* diseñó y fabricó las *lentes de ELMER*, otro de los instrumentos focales del telescopio.

La *Universidad de Florida* diseñó y fabricó *CANARICAM*. Además, está construyendo *CIRCE*, un instrumento adicional.

Otra faceta importante de la cooperación transatlántica es la relativa a la *formación de jóvenes investigadores y tecnólogos*. Se han establecido convenios entre el Instituto de Astrofísica de Canarias, el Instituto de Astronomía de la UNAM, el INAOE y la Universidad de Florida, mediante los cuales se han otorgado *becas para estudiantes de doctorado y jóvenes doctores*. Este intercambio es la mejor garantía para que las sinergias surjan y los proyectos comunes florezcan.

En los citados convenios también se toma en consideración el uso de tiempo observación del GTC complementario para proyectos astronómicos conjuntos.

Todo ello es una muestra del cuidado con el que se han preparado las cosas para que la cooperación transatlántica sea muy fructífera y estable. Pensamos que puede ser un ejemplo de cómo plantear las relaciones actualmente en materia de ciencia y tecnología entre América y Europa.

FOTOGRAFÍA 1.

GRAN TELESCOPIO CANARIAS. CON SUS 10.4 METROS DE ESPEJO PRIMARIO ES EL MAYOR Y MÁS AVANZADO TELESCOPIO ÓPTICO-INFRARROJO DEL MUNDO



FOTOGRAFÍA 2.

UBICACIÓN DEL GRAN TELESCOPIO CANARIAS EN EL OBSERVATORIO DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS (ISLA DE LA PALMA) DEL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS





# LA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRÓN ALBA

RAMÓN PASCUAL

Presidente de la Fundación Parc Taulí

SE DESCRIBEN LAS BASES DE LAS FUENTES DE LUZ DE SINCROTRÓN Y SU EVOLUCIÓN, desde las llamadas de primera generación hasta las actuales, basadas sobre todo en dispositivos de inserción. Se expone su importancia en multitud de campos de la ciencia y la tecnología, tanto en la investigación básica como en la aplicada; asimismo, se indica la importancia de la construcción de este tipo de instalaciones para el desarrollo tecnológico de las empresas que colaboran en su construcción. A continuación se describe la fuente de luz de sincrotrón ALBA, ahora en construcción en los alrededores de Barcelona, la única que existirá en el suroeste de Europa. Se expone el efecto científico, tecnológico y económico que esta gran instalación tiene y el que tendrá cuando entre en funcionamiento, con sus siete líneas experimentales, a comienzos del año 2010.

RAMÓN PASCUAL (BARCELONA, 1942) SE LICENCIÓ EN LA UNIVERSITAT DE BARCELONA (1963) y se doctoró en la de Valencia (1966). Fue becario posdoctoral en el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste (actual Centro Abdus Salam) y ha sido investigador en otros centros extranjeros como el CERN, la Facultad de Orsay de la Universidad de París y el Rutherford Laboratory de Oxford. Ha sido profesor de las Universidades de Valencia, Complutense de Madrid, Zaragoza, Autónoma de Madrid y Autónoma de Barcelona, en la que ha sido Decano de la Facultad de Ciencias, Vicerrector y Rector (1986-1990). Fue Director General d'Ensenyament Universitari de la Generalitat (1980-1983) y Director del Grupo Interuniversitario de Física Teórica (GIFT, 1980-1984). Su especialidad cubre la mecánica cuántica y la física de las partículas elementales. Ha publicado artículos en las revistas internacionales más acreditadas y también es colaborador habitual de algunos medios de comunicación escritos, en especial en temas de ciencia y de políticas científicas y universitarias. Es vicepresidente de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona y está en posesión de la medalla Narcís Monturiol. En la actualidad es presidente de la Fundación Parc Taulí y presidente de la Comisión Ejecutiva del Consorcio de la fuente española de luz de sincrotrón ALBA, proyecto del cual ha sido impulsor.



# LA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRÓN ALBA

RAMÓN PASCUAL

Presidente de la Fundación Parc Taulí

## INTRODUCCIÓN

**E**N ESTE ARTÍCULO DESCRIBIREMOS LA FUENTE DE LUZ DE sincrotrón ALBA que está en construcción en Cerdanyola del Vallès, municipio cercano a Barcelona en el que también se encuentra el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Antes indicaremos qué es una fuente de luz de sincrotrón y para qué sirve.

Es bien sabido que para ver un objeto debemos iluminarlo, recoger en nuestra retina la luz reflejada y disponer de un cerebro que interprete la señal y reconozca la forma del objeto. A lo largo de la historia el hombre ha mejorado la visión con la utilización de instrumentos como los microscopios y los telescopios, que ayudan al ojo humano. Pero las observaciones de detalles con la luz visible, la que es capaz de ser captada por nuestra retina, tienen un límite: la óptica nos enseña que, en principio, con luz de una cierta longitud de onda no se puede obtener un poder de resolución mejor que la misma longitud de onda, que en el caso del visible está entre 300 y 700 millonésimas de milímetro.

Por tal razón la ciencia actual utiliza como elemento de análisis de estructuras pequeñas ondas electromagnéticas de longitudes de onda más pequeñas como, por ejemplo, los rayos ultravioletas y, sobre todo, los rayos X. Esto nos obliga a encontrar fuentes luminosas de estas radiaciones y, como no podremos captarlas reflejadas con la retina, a construir “retinas” artificiales (denominadas detectores) y reconstruir las imágenes mediante cálculos con computadoras. Los primeros que usaron estas técnicas para estudiar las estructuras de los sólidos mediante la dispersión de rayos X fueron William H. Bragg y William L. Bragg. Hoy, las mejores fuentes de ra-

yos X utilizan la radiación que emiten las partículas cargadas, en particular los electrones, cuando recorren la trayectoria de los aceleradores circulares de partículas conocidos como sincrotrones.

## LAS FUENTES DE LUZ DE SINCROTRÓN Y SU UTILIDAD

Los sincrotrones son aceleradores de partículas en los que éstas, empaquetadas en un estrecho haz, recorren siempre una misma trayectoria, más o menos circular, gracias a conjuntos de imanes de diversos tipos que obligan al haz a curvarse y focalizarse. A medida que aumenta la energía de las partículas se regulan las intensidades de los campos magnéticos, de forma que el radio de curvatura de la trayectoria no varíe. Los primeros sincrotrones dedicados a la física de partículas elementales han aumentado de energía y tamaño, hasta llegar al complejo de aceleradores del CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, en Ginebra, con el Large Electron Positron, LEP, y el Large Hadron Collider, LHC, mismos que se espera inaugurar antes de un año.

En los sincrotrones las partículas tienen una aceleración centrípeta y, según las leyes de Maxwell del electromagnetismo, emiten ondas electromagnéticas. Cuando las partículas se mueven a velocidades próximas a la de la luz, como sucede en los sincrotrones, estas ondas, o luz de sincrotrón, tienen propiedades únicas que las hacen deseables para una amplia comunidad de científicos. La luz de sincrotrón fue observada por primera vez en 1947. Tras la primera demostración experimental de su utilidad, en el acelerador del National Bureau of Standards de Estados Unidos de América en 1963, se empezaron a realizar los primeros experimentos denominados de primera generación, usando la luz de sincrotrón emitida por los imanes de curvatura de los aceleradores de física de partículas de manera parasitaria. Más adelante, se comenzó a construir sincrotrones dedicados en exclusiva a la producción de luz de sincrotrón, las fuentes que se denominan de segunda generación. La primera se construyó en Estados Unidos de América, en 1977, el Tantalus de la Universidad de Wisconsin. La primera de estas fuentes europeas se puso en marcha en 1978 en Daresbury, en el Reino Unido. En la actualidad, el número de fuentes de luz de sincrotrón de varios tipos en todo el mundo es casi de un centenar.

La luz de sincrotrón posee propiedades únicas para un espectro muy amplio de investigadores: la luz se emite hacia adelante, en la dirección tangencial, formando un haz en extremo colimado, en un cono que tiene un ángulo de apertura del orden de los microradianes. Es muchísimo más intensa que la de las fuentes convencionales y, contrario a éstas, tiene un espectro continuo, desde los rayos infrarrojos hasta los rayos X. Está polarizada en el plano de la órbita y, además, se emite en pulsos muy cortos (del orden de la millonésima de millonésima de segundo) y con una estructura periódica (del orden del microsegundo).

Como indicamos, la luz de sincrotrón es de utilidad en un ancho abanico de campos científicos y, al igual que muchas grandes instalaciones de este tipo, sus fuentes generan un significativo impacto socio-económico. Una evidencia del interés de la luz de sincrotrón es el rápido crecimiento del número de nuevas fuentes que, en nivel mundial, están en funcionamiento, en construcción o en proyecto. Muchos países han respondido a esta necesidad construyendo fuentes de luz de sincrotrón. Así ha sucedido en Europa, Alemania, Francia, Italia, el Reino Unido, Suiza, Suecia, en diversos sitios de Estados Unidos de América y de Japón, y en países como Australia, Canadá, Corea del Sur, India, Jordania, Rusia, Singapur, Tailandia, Taiwán, Ucrania o China. Hasta ahora la única fuente en Latinoamérica es la de Campinas, en Brasil, cuya energía es relativamente baja. Además de estas fuentes pertenecientes a distintos estados, suele haber fuentes de características especiales en las grandes regiones del mundo, como la European Synchrotron Radiation Facility, ESRF, en Grenoble; SPRING-8, en Nishi-Harima, Japón, y la Advanced Photon Source, en Argonne, Estados Unidos de América.

En nuestros días la luz de sincrotrón es una herramienta que se usa cada vez más en muchos campos de la investigación tanto básica como aplicada y tecnológica. Entre los usuarios industriales de la luz de sincrotrón destacan las industrias farmacéuticas, las industrias alimentarias y de cosméticos, los sectores textiles y de plásticos, las empresas interesadas en catalizadores y en problemas de contaminación, las empresas metalúrgicas y las de materiales constructivos, entre otras. Además, cabe mencionar su uso en las técnicas litográficas empleadas en microelectrónica y, en fecha más reciente, en micromecánica, con la construcción de implantes médicos o de dispositivos usados en microcirugía. La lista sería inacabable y el número de aplicaciones, creciente.

En la investigación fundamental y aplicada la luz de sincrotrón se usa en campos tan diversos como la física, la química, la ciencia de materiales y de superficies, la biología estructural, la geofísica, las ciencias ambientales, la arqueología y la paleontología, etc. También empieza a emplearse en varias ramas de la medicina, como en imagen médica y en radioterapia.

Desde un punto de vista empresarial, la luz de sincrotrón no sólo es útil por sus aplicaciones sino que, tal como sucede con las grandes instalaciones científicas, la construcción de una fuente estimula el desarrollo tecnológico de las empresas que forman parte en su construcción y en las que participan en su mantenimiento y en la mejora de su instrumental. En general, a estas empresas se les piden nuevos productos que desarrollan en conjunto con los equipos técnicos del proyecto, con lo cual obtienen un *know how* que después podrán utilizar en sus actividades comerciales. Estas industrias van desde las de ingeniería civil, que deben someterse a rigurosos requerimientos técnicos, hasta empresas especializadas en imanes, ingeniería de precisión, fuentes de alimentación, ultraaltovacío, radiofrecuencia, criogenia, informática, electrónica y control.

En las fuentes actuales de luz de sincrotrón, los electrones que salen de un pequeño acelerador lineal a energías del orden de unos 200 megaelectronvolt (MeV) se inyectan en un sincrotrón impulsor (*booster*) que los acelera hasta una energía de unos pocos giga-electronvolt (GeV). A la salida del *booster*, un imán desviador los inyecta en un anillo de almacenamiento en el que se mantienen circulando por, al menos, decenas de horas, emitiendo luz de sincrotrón y recuperando la energía perdida mediante cavidades de radiofrecuencia. Los anillos de almacenamiento tienen forma poligonal, con los imanes dipolares en los vértices del polígono, y con tramos rectos en los que los electrones viajan con libertad. Cuando los electrones pasan por los imanes de curvatura emiten la luz de sincrotrón normal. En las fuentes modernas, las denominadas de tercera generación, se aumenta la longitud de los tramos rectos que hay entre los imanes de curvatura hasta unos cuantos metros para situar los denominados dispositivos de inserción, tales como *wigglers* y onduladores, instrumentos que suelen producir luz de más calidad que la de los imanes de curvatura.

La luz de sincrotrón sale de manera tangencial del imán de curvatura o del dispositivo de inserción en lo que se denomina una "línea de luz" y pasa hacia un sistema óptico que selecciona la longitud de onda que se desee para un determinado experimento y la focaliza hacia la muestra por examinar. Una vez que la luz deseada ha incidido sobre la muestra, un detector capta la señal producida en el proceso y envía los datos hacia un sistema de adquisición que los procesa y almacena.

### LA FUENTE DE LUZ DE SINCROTRÓN ALBA

En Europa todas las fuentes de luz de sincrotrón (a excepción del ESRF) están por encima de la línea que va de París a Trieste. Esto significaba que hacía falta una fuente que cubriera el suroeste europeo, misma que en el futuro pudiera ser interesante para los países del Magreb y también quizá para los de Latinoamérica que precisaran de mayores prestaciones que las de la fuente brasileña. Por tanto, era bastante lógico que España se planteara la necesidad de contar con una fuente de luz de sincrotrón de tercera generación. Por tal razón el gobierno de la Generalitat de Catalunya, en su primer Plan de Investigación (1993-1996), oficializó su intención de



construir una fuente de luz de sincrotrón. La decisión se basó en un estudio de viabilidad encargado en julio de 1992 a un grupo de trabajo, y también en los resultados de rondas de consultas a grupos de expertos.

El paso siguiente fue la creación de una Comisión Promotora, que se constituyó el 31 de marzo de 1993 y de una Comisión Asesora internacional formada por directores de grandes laboratorios extranjeros. También se convocaron 10 becas dirigida a jóvenes licenciados y doctores recientes para empezar a formar personal en el campo de los aceleradores en general, y de las fuentes de luz de sincrotrón en particular. Con la incorporación de un director experimentado se inició el diseño de una fuente de luz de sincrotrón y se construyeron algunos prototipos de sus elementos más importantes, se localizó una posible ubicación en el campus de la UAB y se empezó el estudio geotécnico del terreno. Dos años más tarde se firmó un convenio con el gobierno español para financiar en conjunto los trabajos.

Una vez acabado el estudio detallado del proyecto se hizo evaluar por expertos extranjeros y se creó una comisión de estudio que evaluara las necesidades de los usuarios españoles. A continuación, en 2001, la Comisión Asesora de Grandes Instalaciones Científicas formuló una recomendación prioritaria y unánime de hacer una fuente como la propuesta y no dilatar más la decisión de construirla. Por último, el 14 de marzo de 2002, en el marco de la reunión del Consejo Europeo de Barcelona y bajo la presidencia del Presidente del Gobierno español, el Presidente de la Generalitat y la Ministra de Ciencia y Tecnología firmaron un protocolo de intenciones en el que se establecía el compromiso para la construcción, el equipamiento y la explotación de una fuente de luz de sincrotrón en Cerdanyola del Vallès. De igual forma, se estipulaba que las dos administraciones debían firmar un convenio específico que regulara los detalles del proyecto, que debería ser financiado por mitades entre las dos administraciones promotoras.

Tras la constitución del Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz de Sincrotrón, CELLS, el 14 de marzo de 2003, y la primera reunión de su Consejo Rector unos meses más tarde, se procedió a la designación del director y se empezó a reclutar el personal. Se incorporó a algunas de las personas que se habían formado en un inicio y se contrató a los responsables de las cinco divisiones del consorcio: aceleradores, científica, ingeniería, datos y control y administración. En la actualidad el consorcio cuenta con unas 120 personas y una perspectiva de llegar a 138 a finales de 2007. Cerca de un tercio del personal es extranjero y dos tercios son españoles, la mitad de los cuales trabajaban con anterioridad en el extranjero. Su ubicación provisional es en la Facultad de Ciencias de la UAB y en unos módulos prefabricados próximos a la misma facultad. Las necesidades de laboratorio son, también en forma temporal, cubiertas por una buena parte del edificio del taller de dicha universidad.

La ubicación del sincrotrón, que ya se había bautizado con el nombre ALBA, en Cerdanyola y cerca de la UAB tiene muchas ventajas estratégicas. Por un lado, la proximidad del núcleo investigador que representa la UAB y el núcleo de las demás universidades y centros de investigación del entorno de Barcelona. Por otro lado, la cercanía de la ciudad de Barcelona, situada a unos 20 kilómetros, la proximidad del aeropuerto, y el hecho de estar junto a la autopista A-6 (de Madrid a Francia por la Junquera) y cerca del cruce de esta autopista con la C-58 (de Barcelona a Francia por Puigcerdà). Si bien en un principio se pensó en ubicar la instalación dentro del propio campus universitario, en parte a causa de las características del subsuelo, se decidió construir ALBA en unos terrenos más estables y amplios situados al otro lado de la autopista, en una parcela de 6.5 hectáreas situada en una

zona de 340 hectáreas, buena parte de las cuales están calificadas como terrenos científico-técnicos. El proyecto ejecutivo del edificio fue encargado a una compañía de ingeniería, la construcción se inició en mayo de 2006 y se prevé que acabe en agosto de 2008.

El edificio que debe albergar ALBA tiene tres requisitos que lo hacen notablemente complejo. Por un lado el terreno ha de ser capaz de ubicar un edificio muy estable frente a las vibraciones y los movimientos del terreno; por tanto, se le ubicó lo suficientemente lejos de fuentes de vibraciones locales y se construyó con una importante cimentación de la zona crítica. Por otro lado, su sistema de ventilación debe ofrecer una gran estabilidad térmica con un margen general de variaciones de temperatura no superior a un grado, lo que ha exigido un estudio detallado de los sistemas de ventilación y calefacción. Por último, se debe contar con una estabilidad en el suministro eléctrico que no es habitual. Se espera conseguir dicha estabilidad eléctrica con un sistema de doble suministro y unos sistemas de continuidad estáticos y dinámicos. El doble suministro se hará desde una subestación transformadora alimentada por una línea de 220 KV que se construye cerca de la instalación, con un transformador exclusivo para ALBA, y desde una central de poligeneración que dará a la vez suministro eléctrico y solucionará las demandas de frío y calor.

También se procedió a rediseñar las características de la fuente de luz de sincrotrón, incorporando los adelantos producidos en los últimos años como, por ejemplo, el sistema de inyección continuada, la ubicación del *booster* y el anillo en un mismo túnel, etc. Todas estas decisiones fueron avalladas por una Comisión Asesora del Acelerador, nombrada por el Consejo Rector. ALBA será un acelerador de electrones con imanes convencionales que formarán un anillo de 268.8 metros de circunferencia. Los electrones se llevarán hasta una energía de 200 MeV mediante un acelerador lineal, para pasar después a un *booster* que, por medio de un sistema de radiofrecuencia, los acelerará hasta una energía final de 3 GeV, es decir, una velocidad prácticamente igual a la velocidad de la luz. Una vez que los paquetes de electrones tengan esta energía se inyectarán en el anillo principal en el que los electrones circularán emitiendo la luz de sincrotrón.

El anillo de ALBA tendrá características parecidas a las de las mejores fuentes de luz de sincrotrón. Contará con cuatro secciones rectas de ocho metros de longitud, de las cuales tres podrán acoger dispositivos de inserción; 12 de 4.4 metros con capacidad para 10, y ocho de 2.6 metros para cinco dispositivos. Por el anillo podrá circular una corriente de hasta 400 mA. Uno de los datos que caracteriza las prestaciones de una fuente de luz de sincrotrón es lo que se llama la emitancia horizontal, que en el caso de ALBA será menor que 4.3 nm•rad. El anillo podrá albergar más de 30 líneas de luz independientes. Aunque en el inicio el proyecto contemplaba construir cinco, las propuestas de la comunidad española de usuarios convencieron al Consejo Rector de ampliar este número inicial hasta siete, que son las que se están construyendo en la primera fase.

Estas líneas son las siguientes:

- Una dedicada a espectroscopía y microscopía de electrones fotoemitidos, de amplia utilización en ciencia de materiales.
- Una dedicada a difracción circular magnético y dispersión resonante con rayos X blandos, también para atender, sobre todo, a necesidades de ciencia de materiales.
- Una de difracción de rayos X duros en material en polvo con opción de microfoco, también para ciencia de materiales.
- Una de espectroscopía de absorción de rayos X, para usuarios de química, materiales y biología.
- Una de difracción/dispersión de rayos X en material no cristalino, para biología y ciencia de materiales.
- Una para cristalografía de macromoléculas, de uso en biología.
- Una de microscopía de rayos X, de interés en biología.

Además de la justificación científica de ALBA, se consideró conveniente hacer un análisis coste-beneficio del proyecto y estudiar su impacto socioeconómico. El resultado fue que, en un escenario básico con una tasa de descuento de 4% y una inflación de 2.5%, el Valor Actualizado Neto (VAN) resultó ser de 140.9 M y la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR), de 9.4%. Con respecto al efecto del proyecto, durante la fase de construcción (que en un principio era de 2003 a 2008), el impacto sobre la producción se estimó en 266 M€ (de 2003), el aumento del valor añadido, en 140 M€, y la media anual de puestos de trabajo, en 463. Durante la fase de funcionamiento (desde 2009 hasta 2033, en lo que se estima la vida de la instalación en caso de que no se hagan reinversiones), el impacto sobre la producción se estimó en 735 M€, el aumento del valor añadido, en 417 M€, y la media anual de puestos de trabajo, en 463. En opinión de los economistas, estas cifras son muy satisfactorias.

Se espera que entre finales del año 2009 y comienzos del 2010 la fuente de luz de sincrotrón haya superado su periodo de comprobaciones y que las siete líneas empiecen a funcionar de manera progresiva y acojan a más de un millar de usuarios al año. Si bien con seguridad la mayoría de éstos serán catalanes y españoles, se espera que la buena calidad de las líneas de luz las hagan atractivas para usuarios de otros países de Europa (en especial los del sur de Francia y Portugal) y también, como ya indicamos, para los de los países del Magreb y los de América del Sur (para éstos de manera complementaria al Laboratório Nacional de Luz Síncrotron de Campinas.



# EUROPEAN ESPALATION SOURCE (ESS)

JUAN URRUTIA

Presidente de la Comisión Ejecutiva del Consorcio ESS-BILBAO

MI ESTRATEGIA EXPOSITIVA ES LA SIGUIENTE. EN PRIMER LUGAR ANALIZARÉ, EN EL contexto de lo que yo llamaría la Nueva Economía, la importancia del conocimiento, de la cadena que denominamos I+D+i y, por consiguiente, de la ciencia, ya sea básica o aplicada, introduciendo las distinciones pertinentes entre ciencia (pequeña) y *Big Science* (ciencia grande). A continuación abordaré la somera historia del esfuerzo europeo en ciencia, enmarcando así el contexto en el que aparece la guía europea de grandes instalaciones entre las que ocupa un lugar preeminente la ESS. En tercer lugar, describiré la tecnología correspondiente y sus aplicaciones. En seguida expondré con crudeza las dificultades de Europa para encarar la decisión. En quinto lugar, pasaré a una descripción de nuestra candidatura y los elementos que la caracterizan. Por último, concluiré con algunos comentarios finales.

JUAN URRUTIA ELEJALDE (BILBAO, 1944) ES CATEDRÁTICO DE FUNDAMENTOS DEL Análisis Económico y Presidente de la Comisión Ejecutiva del Consorcio European Spalation Source-Bilbao. Licenciado en Economía y Derecho (Deusto), PhD en Economía (Universidad de Colorado) y Doctor en Derecho (UAB). Enseñó de 1973 a 1989 en la Universidad del País Vasco, donde fue decano entre 1980 y 1982. A principios de 1990 fue a Madrid para contribuir a la creación de la Universidad Carlos III, de la que llegó a ser Presidente del Consejo Social. En 1984 fue durante nueve meses consejero de Educación, Universidades e Investigación del País Vasco, dentro del gobierno de Garaicoetxea. En la década de 1990 fue consejero del BBVA. Ha sido presidente del Consejo Editorial del periódico económico *Expansión* y de la revista *Actualidad Económica*. Es, asimismo, presidente de la Fundación Urrutia Elejalde, cuya misión es profundizar en las raíces filosóficas de la economía y promover el análisis económico multidisciplinar. Entre sus publicaciones destacan los libros *Economía neoclásica (seducción y verdad)*, Editorial Pirámide, Madrid; *Economía posmoderna. Intelligibilidad y sentido*, Editorial UPV/EHU, Bilbao, 1990; *Innovar, ¿para qué?*, Editorial Fundación Babcock para la Innovación Tecnológica, Bilbao, 1994; *Economía en porciones*, Pearson Educación, 2003, y *La mirada del economista*, Editorial Biblioteca Nueva, 2004.

# EUROPEAN ESPALATION SOURCE (ESS)

JUAN URRUTIA

Presidente de la Comisión Ejecutiva del Consorcio ESS-BILBAO

INTENTARÉ EN ESTA BREVE NOTA DESCRIBIR LA INICIATIVA desarrollada por un consorcio formado por la administración general del Estado de España y el gobierno vasco: 50% cada uno, a fin de alojar en Bilbao o sus alrededores la fuente de neutrones por espalación o astilleo. Procuraré no enredarme demasiado en aspectos técnicos; me limitaré a describir sólo los necesarios para seguir el argumento y poner énfasis en la importancia económica de una gran instalación para el desarrollo de una zona determinada en general y en particular para el País Vasco, considerado como entorno natural de Bilbao.

1. Cualquier economía, esté ya desarrollada o sea considerada emergente, necesita saber cuáles son las claves del crecimiento de un sistema económico nacional en el concierto de las naciones. Desde hace no menos de 50 años sabemos que los factores imprescindibles son el trabajo o mano de obra y su cualificación y el capital físico y el progreso tecnológico que incorpora. Sin embargo, no hay una correlación perfecta entre la relación capital/trabajo y la tasa de crecimiento del sistema considerado. Lo que falta para perfilar la explicación es algo más o menos intangible, que los economistas denominan la productividad total de los factores y que desde los trabajos de Romer se asocia a los gastos en I+D, a la innovación que propician (i) y, de manera más profunda, al conocimiento estructurado que subyace a todo ello.

Este conocimiento estructurado conforma la ciencia, ese esfuerzo humano no sólo por entender, sino también por aplicar esa comprensión de fenómenos que un día fueron misteriosos. Los científicos son el ejemplo de la libertad de indagación, pero también forman parte de un esfuerzo organizado con seriedad por la coalición del sector público y del sector privado para sacar provecho material a esos conocimientos.

Desde que la reacción en cadena de una explosión nuclear fue descubierta y aplicada con urgencia por el Proyecto Manhattan para la construcción de las dos bombas lanzadas sobre Hiroshima y Nagasaki, la denominada a partir de entonces *Big Science* no ha desaparecido del horizonte. Existe en una tensión permanente entre la libertad de investigación y la orientación necesaria para poder canalizar los esfuerzos de miles de científicos jerárquicamente organizados y coordinados de manera centralizada. No es extraño que, dado este origen, se identifique popularmente a la *Big Science* por las tres M: *Money* (dinero), *Manpower* (mano de obra) y *Military* (militar).

Aun si nos olvidamos ahora de las aplicaciones militares de mucha de la *Big Science*, no cabe la menor duda de que la mano de obra científica y el dinero son partes imprescindibles para el funcionamiento de cualquier gran instalación, ya esté dedicada a la exploración especulativa del origen del universo, a la búsqueda de esa especie de levadura de toda materia existente que es la partícula de Higgs o a las aplicaciones más prácticas orientadas a la exploración de la estructura interna de los materiales. A esta última clase pertenece la ESS que aspiramos a alojar en Bilbao.

2. Europa nunca ha estado fuera del juego en este esfuerzo de la inteligencia. No sólo la reacción en cadena que acabo de mencionar fue descubierta por un europeo (Leo Szilard), sino que el Proyecto Manhattan y sus derivaciones fueron posibles gracias al esfuerzo coordinado de muchos investigadores, entre los que se encontraban innumerables científicos centroeuropeos que huían del nacionalsocialismo. Por lo tanto, no es de extrañar que desde el comienzo de los esfuerzos por la superación de los efectos de la guerra mediante

la configuración del eje franco-alemán, la ciencia siempre estuvo presente. Así surgen, por ejemplo, el CERN y, más cercano a los intereses de este trabajo, el ILL de Grenoble y el Rutherford-Appleton Laboratory en Oxfordshire, los cuales alojan, respectivamente, dos grandes instalaciones para la dispersión de neutrones, la primera nuclear y la segunda por espalación de pulso corto. Estas dos instalaciones han dado a Europa el liderazgo en la materia hasta ahora.

Con el espíritu de convertir a Europa en la Sociedad del Conocimiento más avanzada del mundo para el año 2010, la Unión Europea, después de la reunión de Lisboa, está focalizando sus esfuerzos por situar la ciencia, la tecnología y la innovación como los vectores de referencia para incrementar su competitividad frente a Estados Unidos de América, Japón y nuevas economías emergentes que, además de competir en sectores intensivos en mano de obra, avanzan con rapidez en sectores intensivos en conocimiento, como pueden ser Corea del Sur, la India o China. A partir de este espíritu de Lisboa la ciencia europea elabora el mapa de las nuevas grandes instalaciones de las que Europa debe dotarse para no perder el liderazgo o al menos mantenerse en el pelotón de cabeza de la investigación orientada hacia resultados concretos y aplicables al desarrollo industrial. La ESS es una de esas instalaciones del mapa europeo; de hecho, es la mayor de todas ellas y la única a la que optan varias candidaturas nacionales.

En este marco de referencia, Europa se encuentra, en consecuencia, ante la posibilidad de no perder una de sus ventajas competitivas que poseía hasta este momento en el ámbito de la ciencia: las infraestructuras científicas de producción de neutrones dedicadas a la investigación de la estructura y la dinámica de la materia. En efecto, hasta ahora Europa ha sido líder en la producción de neutrones en el mundo. Cuenta con las instalaciones citadas, que eran las más potentes hasta fechas muy recientes, el reactor nuclear del Institute Laue Langevin, ILL en Grenoble, Francia, y la fuente de neutrones por espalación ISIS en Oxford, Reino Unido. Dichas instalaciones están siendo superadas en producción de neutrones y tecnología por las nuevas fuentes de siguiente generación construidas en Estados Unidos de América, SNS en Oak Ridge, Tennessee, ya operativa, y J-Parc, una fuente en construcción en Japón.

3. Para acercarnos a la comprensión del reto europeo en materia de grandes instalaciones en general y de dispersión de neutrones en particular, es conveniente una somera descripción de la tecnología involucrada. En lugar de exponerla en general, me limitaré a describir la ESS. La fuente europea de espalación (ESS) es una fuente de neutrones de 5 MW con, en un principio, un conjunto de 20 instrumentos que puede ser ampliada con más instrumentos, más potencia y más blancos. Un acelerador lineal producirá protones de 1.3 GeV que colisionarán con un blanco de un metal pesado para producir pulsos largos de neutrones del orden de ms. El diseño técnico y el caso científico (1993-2003) fueron elaborados por cientos de científicos de 15 laboratorios o instituciones de 11 países. La Iniciativa-ESS (ESS-I), con base en el ILL, continúa su avance con el proyecto de la ESS.

Este proyecto europeo de dispersión de neutrones es el de más alta prioridad desde principios de la década de 1990. La ESS será

la fuente de neutrones más avanzada del mundo que proporcionará la mayor intensidad de neutrones (en ciertos casos varios órdenes de magnitud más que las fuentes más intensas en la actualidad), lo que, junto con una nueva instrumentación, hará de ella una herramienta única para investigar la estructura, funcionalidad y la dinámica de la materia. Esta gran instalación de pulso largo (LP) es muy conveniente para la gran mayoría de técnicas y significativamente más barata que una fuente de pulso corto (SP)

En cuanto a las aplicaciones, merece la pena detenerse un poco en ellas para tener una idea del amplio abanico de usos y de su potencial. El caso científico de la ESS engloba al de las fuentes de neutrones características de la generación anterior (información y telecomunicaciones, transporte, energía, medio ambiente, materiales, biomedicina, nanociencia, patrimonio cultural, etc.) y además aporta nuevas posibilidades.

En efecto, la ESS responde a un amplio rango de necesidades futuras de investigación con mayor énfasis en materia condensada y biología. Permitirá la dispersión de neutrones para estudiar la estructura y la dinámica de fenómenos a escala real, en tiempo real y en seres vivos (células), con lo cual se podrá estudiar eventos en las escalas nanoscópicas. Las propiedades principales del neutrón (momento magnético, selectividad isotópica, gran penetración, etc.), en conjunto con el gran salto en intensidad que se espera obtener en la ESS, crearán nuevas oportunidades en estudios dinámicos y estructurales en biología y grandes moléculas (proteínas, etc.), investigación en ciencia de polímeros y materia blanda, tomografía a escala real de materiales ingenieriles, química y física de estado sólido y estudios de física de partículas.

La ESS es, asimismo, imprescindible para investigaciones más avanzadas y más efectivas en estructuras confinadas, de gran uso en tecnologías de la información y telecomunicaciones, sitios activos en enzimas, almacenamiento de hidrógeno para economía sostenible, fluidos multicomponentes complejos en medios porosos para extracción de petróleo,



FIGURA 1.

## PRINCIPALES CAMPOS DE APLICACIÓN



clatratos metano-agua para la producción de gas natural, nanoestructuras para catálisis, implantes médicos, industria farmacéutica y materiales fotónicos.

Además de todas estas aplicaciones, la futura ESS aporta nuevas aplicaciones y posibilidades, mismas que presento a continuación:

- Entender el papel de la estructura en el diseño de fármacos y revelar el papel catalítico del H en moléculas biológicas.
- Entender el papel catalítico del H en moléculas biológicas.
- Entender cómo se autoorganizan moléculas sintéticas y biológicas.
- Explorar los mecanismos de biomineralización, lo cual facilitará la creación de nuevos materiales.
- Estudiar *in situ* los procesos catalíticos.
- Estudiar la materia en condiciones extremas.
- Responder a cuestiones básicas en física de partículas y cosmología:
  - ◊ Origen de la asimetría entre materia y antimateria.
  - ◊ Validez de las teorías de gran unificación.
- Estudiar y experimentar con nanosistemas.

La imagen presentada en la figura 1, elaborada en el laboratorio de Jülich, sintetiza los principales campos de aplicación sin tecnicismos

4. Europa no es un estado unitario, ni una federación, ni siquiera una confederación. Por tanto, los procedimientos de decisión son desconocidos o inexistentes en muchas materias.

Intentemos captar lo que esto representa. Por un lado, este nuevo proyecto europeo de dispersión de neutrones es el de más alta prioridad desde principios de los años 1990. La ESS será, en efecto, la fuente de neutrones más avanzada del mundo que proporcionará la mayor intensidad de neutrones (en ciertos casos varios órdenes de magnitud más que las fuentes más intensas en la actualidad), lo que, junto con una nueva instrumentación, hará de ella una herramienta única para investigar la estructura, la funcionalidad y la dinámica de la materia. Esta gran instalación de pulso largo (LP) es muy conveniente para la gran mayoría de técnicas y significativamente más barata que una fuente de pulso corto (SP).

Por otro lado, el proyecto de creación en Europa de una gran fuente espalación responde, tal como hemos visto, al enorme potencial que presentan las técnicas neutrónicas para el desarrollo científico y tecnológico en múltiples ámbitos del saber, así como a la experiencia de Europa en la experimentación con neutrones. Este énfasis se traduce en la generación de productos y de servicios de alto valor añadido con capacidad de venderse, tanto en un verdadero mercado único europeo, como en los mercados mundiales.

Y, sin embargo, Europa no sabe, no puede o no quiere llegar a la elaboración de un marco regulador adecuado para el soporte de un mercado único que incentive y favorezca la innovación. Esto se traduce, en el ámbito de la ciencia, la tecnología y la innovación, en la necesidad de disponer de un Espacio Europeo de Innovación (EEI) marcado por una regulación que facilite su unificación en

términos de movilidad de investigadores, normativa en materia de protección intelectual y otros factores.

En ausencia de este marco regulador, la forma de decisión sobre construcción y decisión constituye una incertidumbre enervante ante la cual lo único que ha hecho Europa es convocar un proyecto para la elaboración de estudios no técnicos sino sobre todo legales, financieros y de control. Ello con el fin de ilustrar a los Estados miembro, de la Unión la viabilidad y las ventajas e inconvenientes de cada una de las candidaturas. Este camino conforma un *slow track* que duraría dos años a contar desde el primero de enero de 2008. Sin embargo, nadie cree en este *slow track* porque posponer dos años la decisión puede llevarnos a no decidir nunca. Además, nadie duda de que antes de esa fecha alguna de las candidaturas hará un movimiento que aunarà las voluntades de suficientes estados miembros como para que la decisión de la candidatura ganadora se imponga por su propio peso y acarree con ella la decisión de construir. Este *fast track* se da como el realista a pesar de que se desconozcan sus detalles. Nos encontramos en una situación curiosa en la que el procedimiento de decisión podría ser un elemento crucial para decidir la localización y la previa decisión de construir.

5. La construcción de una gran instalación científico-técnica como la Fuente Europea de Espalación (un esquema de la cual puede apreciarse en la figura 2) exige un presupuesto para su construcción, estimado en más de 1 200 millones de euros del año 2000, más 100 millones de euros de mantenimiento anual, con un personal que ascenderá a 600 personas y contará con una media de 4 000 usuarios cada año.

En la actualidad existen tres candidaturas para albergar esta gran instalación provenientes de gobiernos o consorcios regionales: Lund (Suecia), Budapest (Hungría) y Bilbao (España). Ya no es previsible que aparezcan otras candidaturas en el Reino Unido o en otros países de la Unión Europea.

Pasando ya a describir nuestra candidatura comienzo por decir que se presentó de forma oficial a la comunidad internacional el 17 de octubre de 2006, en el marco de un encuentro de la Iniciativa ESS. El gobierno español, junto con el gobierno del País Vasco, de-

claran que ambas administraciones, así como sus respectivos sistemas de ciencia y tecnología, confían plenamente en el éxito que la ubicación de esta gran infraestructura en el entorno del Bilbao Metropolitano reportará a la Europa del conocimiento.

ESS-Bilbao es un proyecto ambicioso para la creación de un polo internacional de conocimiento. Es también un proyecto singular puesto que puede ser considerado algo más que ciencia, ya que incluye un número de iniciativas adicionales que combinan ciencia y tecnología; tejido empresarial y la ciudad y cultura. En este sentido diré que tres son los objetivos estratégicos que articulan la Iniciativa ESS-Bilbao:

1. Promover el desarrollo científico tecnológico de Europa.
2. Generar nueva industria con base científico-tecnológica.
3. Reforzar la imagen internacional de España y el País Vasco.

Para la consecución de estos objetivos, desde la ESS-Bilbao se ha constituido un conjunto coherente de acciones y compromisos financieros orientados a la construcción de una comunidad de conocimiento científico y un desarrollo empresarial a escala global alrededor de la Fuente Europea de Neutrones por Espalación. Este conjunto de acciones se engloba en torno a cuatro iniciativas a las que alude la figura 3 y que a continuación describo en forma telegráfica.

FIGURA 2.

ESQUEMA DE LA FUENTE EUROPEA DE ESPALACIÓN



FIGURA 3.

INICIATIVAS ESS-BILBAO.



1. Fuente Europea de Neutrones por Espalación. La construcción de esta gran infraestructura, considerada una instalación única en su género (por sus características diferenciadas tanto en su diseño y construcción como en su uso o aplicaciones), es el elemento central de la Candidatura ESS-Bilbao. La ESS-Bilbao prestará servicios a la comunidad internacional de científicos y tecnólogos, y es una herramienta esencial para el desarrollo de una investigación científica tecnológica competitiva y de calidad.
2. Comunidad de Conocimiento. La instalación se constituye en el motor de consolidación de un entramado científico-tecnológico de referencia mundial con centros y capacidades propias vinculadas unas con otras. La candidatura ESS-Bilbao busca, en efecto, configurar un núcleo de investigación de excelencia al arropo de la instalación y configurar una comunidad de conocimiento global. Se prevé que esta Comunidad de Conocimiento de Ciencias neutrónicas cuente con 2000 investigadores (además de los 4000 usuarios anuales en itinerancia) que trabajen en nuevos centros de investigación de excelencia y otras infraestructuras complementarias, explotando todas las capacidades científicas existentes.
3. Distrito Empresarial. La explotación comercial de los resultados de las investigaciones y experimentaciones realizadas en la instalación se apoyará en un Distrito Empresarial que, por medio de un Parque Empresarial Avanzado y una Incubadora de Empresas, conformará un polo con 200 nuevas empresas y 6000 nuevos empleos.
4. Ciudad de Conocimiento. La candidatura ESS-Bilbao apuesta por crear un entorno que aúne ciencia, tecnología, arte y creatividad. Este foro vivo no sólo albergará la Fuente Europea de Neutrones por Espalación, sino que también reforzará los pilares de la nueva sociedad europea: el conocimiento, la innovación y el diálogo ciencia-sociedad.
6. Recapitulemos un poco antes de ofrecer algunos comentarios finales. La importancia creciente que han adquirido la ciencia, la tecnología y la innovación se ha producido en un escenario cambiante en donde los tres elementos han evolucionado, y en esta evolución es imprescindible su interrelación. Las redes y comunidades de conocimiento, cada vez más interdisciplinarias, comparten, desarrollan y acumulan el conocimiento que facilita la transformación de ideas en nuevos productos y nuevos servicios destinados al conjunto de la sociedad.  

El proyecto de creación en Europa de una gran fuente espalación responde al enorme potencial que presentan las técnicas neutrónicas para el desarrollo científico y tecnológico en múltiples ámbitos del saber y a la experiencia de Europa en la experimentación con neutrones. La iniciativa ESS (European Spallation Source) supone la construcción de la mayor fuente de neutrones del mundo y es el resultado de años de trabajo de científicos, ingenieros y profesionales de numerosos centros de investigación y organizaciones públicas y privadas.

El Consorcio ESS-Bilbao es una forma institucional de ganar para España y el País Vasco la posibilidad de alojar esa gran instalación cuyo impacto económico en España podría moverse en términos

de rendimiento real anual durante 30 años alrededor de 5% anual, cifra nada despreciable que en el caso del País Vasco podría volverse significativamente mayor.

Sin embargo, quizá lo más interesante de este esfuerzo colectivo europeo sea la oportunidad de imaginar y ofrecer soluciones a problemas derivados de la inercia propia de estas grandes instalaciones y de la falta de estructura política de Europa. Quizá sea el momento para plantearse en serio y *ex novo* asuntos como la propiedad y el acceso al uso según el reparto de la propiedad, el gobierno de una estructura de las características de la ESS, incluyendo las formas de asignar los tiempos de uso, así como formas alternativas de financiación.

Pero, sin duda, el problema intelectual más apasionante que puede abordarse es el diseño de la forma de la toma de decisiones en esta Europa tan complicada. Aquí caben múltiples propuestas de tipo teórico-económico que persigan solucionar en la práctica un problema de agregación de preferencias o de decisión colectiva que tome en cuenta la indivisibilidad de la fuente y las diferentes posibilidades de repartir costos.

Estos últimos retos intelectuales son propios de economistas teóricos de los que España no está mal dotada. Esto me permite concluir diciendo que nuestra candidatura no tiene nada que envidiar a las otras existentes, en especial si también comparamos fortalezas científicas y tecnológicas.

El presente trabajo no podría haber sido elaborado sin la ayuda de Cristina Oyón, quien fue capaz de sintetizar mucho trabajo elaborado por Javier Campo y por la consultora Naider. Ni qué decir que todos los errores o inexactitudes se deben sólo a mí.





# BIOCERÁMICAS: REGENERADORAS DE HUESO Y PORTADORAS DE SUSTANCIAS BIOLÓGICAMENTE ACTIVAS

MARÍA VALLET REGÍ

Catedrática de Química Inorgánica, Universidad Complutense de Madrid

LAS CERÁMICAS CON APLICACIONES MÉDICAS SON UN INTERESANTE CAMPO DE investigación y desarrollo para la obtención de biomateriales útiles en la fabricación o fijación de implantes. Es posible diseñar nuevas cerámicas, sintetizarlas y caracterizarlas, para que, dentro de un campo multidisciplinario como es el de los biomateriales, puedan ser punto de partida para ensayos mecánicos, estudios en cultivos celulares, ensayos *in vitro* e *in vivo*, en los que participen científicos de diversos campos del conocimiento y que conduzcan a la fabricación de implantes. Hoy, dichos implantes son cada vez más demandados, como consecuencia de la mayor expectativa de vida. Sus aplicaciones se centran en la fabricación de implantes que no deban soportar cargas, como es el caso de la cirugía maxilofacial y del oído medio, el relleno de defectos óseos tanto en cirugía bucal como en cirugía ortopédica y el recubrimiento cerámico de implantes metálicos. La fabricación de sustratos portadores de células y factores bioquímicos para ingeniería tisular y la obtención de materiales nanoestructurados a semejanza de las estructuras jerárquicas complejas de los tejidos duros, huesos y dientes, es un campo de investigación muy atractivo. La posibilidad de funcionalizar las superficies cerámicas con distintas moléculas, de diferente naturaleza y tamaño, por medio de su adhesión al sustrato, así como la posibilidad de nanoestructurar de manera fisicoquímica y topográfica la superficie es un hito importante en la actualidad.

MARÍA VALLET REGÍ (LAS PALMAS DE GRAN CANARIA, 1946) ES DOCTORA EN Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid, 1974. Catedrática, directora del Departamento de Química Inorgánica y Bioinorgánica de la Facultad de Farmacia de la UCM desde 1990. Académica de número de la Real Academia de Ingeniería. Medalla número LII 'Prix Franco-Espagnol 2000', Société Française de Chimie. Miembro del Instituto de Magnetismo Aplicado «Salvador Velayos», U.C.M.-RENFE-CSIC, desde su fundación en 1988. Vicepresidenta de la Real Sociedad Española de Química desde 1999. Miembro del Comité Rector del Programa 'Science for Peace' de la OTAN desde julio de 1999. Miembro del Comité Nacional de la CNEAI. Miembro del International Advisory Board del *Journal of Mate-*

*rials Chemistry* (Royal Society of Chemistry) desde 1995. Miembro del Editorial Board del *Open Inorganic Chemistry Journal* (OIC) desde 2007. Miembro del Editorial Board del *Open Biomedical Engineering Journal* (OBE) desde 2007. Miembro del Comité de Selección de la revista *Cerámica Información*, editada por Faenza Editrice Ibérica, S.A., desde 1996. Miembro Honorario de la Materials Research Society de la India. Miembro del International Advisory Editorial Board del *Bulletin of Materials Science* desde 2004. Principales líneas de investigación: biocerámicas para la sustitución y reparación de tejidos óseos, síntesis de nanopartículas, fabricación de láminas delgadas por métodos químicos, no estequiometría en óxidos con estructura tipo perovskita y derivados, materiales magnéticos con estructura de tipo espinela y hexaferrita, superconductores de alta temperatura, óxidos semiconductores-sensores de gases, perovskitas con magnetorresistencia gigante. Coautora de 465 publicaciones en revistas internacionales de prestigio, 310 ponencias en congresos internacionales y 131 en congresos nacionales. Coautora de 11 libros.

# BIOCERÁMICAS: REGENERADORAS DE HUESO Y PORTADORAS DE SUSTANCIAS BIOLÓGICAMENTE ACTIVAS

MARÍA VALLET REGÍ

Catedrática de Química Inorgánica, Universidad Complutense de Madrid

## INTRODUCCIÓN

LOS BIOMATERIALES SON MATERIALES IMPLANTABLES EN un organismo vivo. En la actualidad es posible sustituir casi todas las partes de un cuerpo humano. La discapacidad física y la edad están ligadas en forma estrecha. Si durante los 10 primeros años de vida la necesidad de sustituir partes dañadas del cuerpo humano es casi nula, cuando se alcanzan los 90 años el porcentaje puede alcanzar cotas muy elevadas. Pero mientras existan piezas de recambio hay esperanza no

sólo de vivir más años, sino de vivirlos con calidad de vida. Los biomateriales se fabrican con componentes naturales o artificiales, que por necesidad deben ser compatibles biológicamente con el cuerpo humano. Se utilizan para reparar o reemplazar un tejido natural dañado, por ejemplo, huesos, dientes, piel... y en un futuro próximo, tejidos de órganos como hígado, riñones. El objetivo que se persigue al utilizar biomateriales es salvar vidas, mejorar la calidad de vida, reducir el sufrimiento y contribuir a llegar en mejores condiciones al final de nuestra vida. Esta disciplina se enmarca dentro del campo de la ingeniería biomédica (véase la figura 1).

FIGURA 1

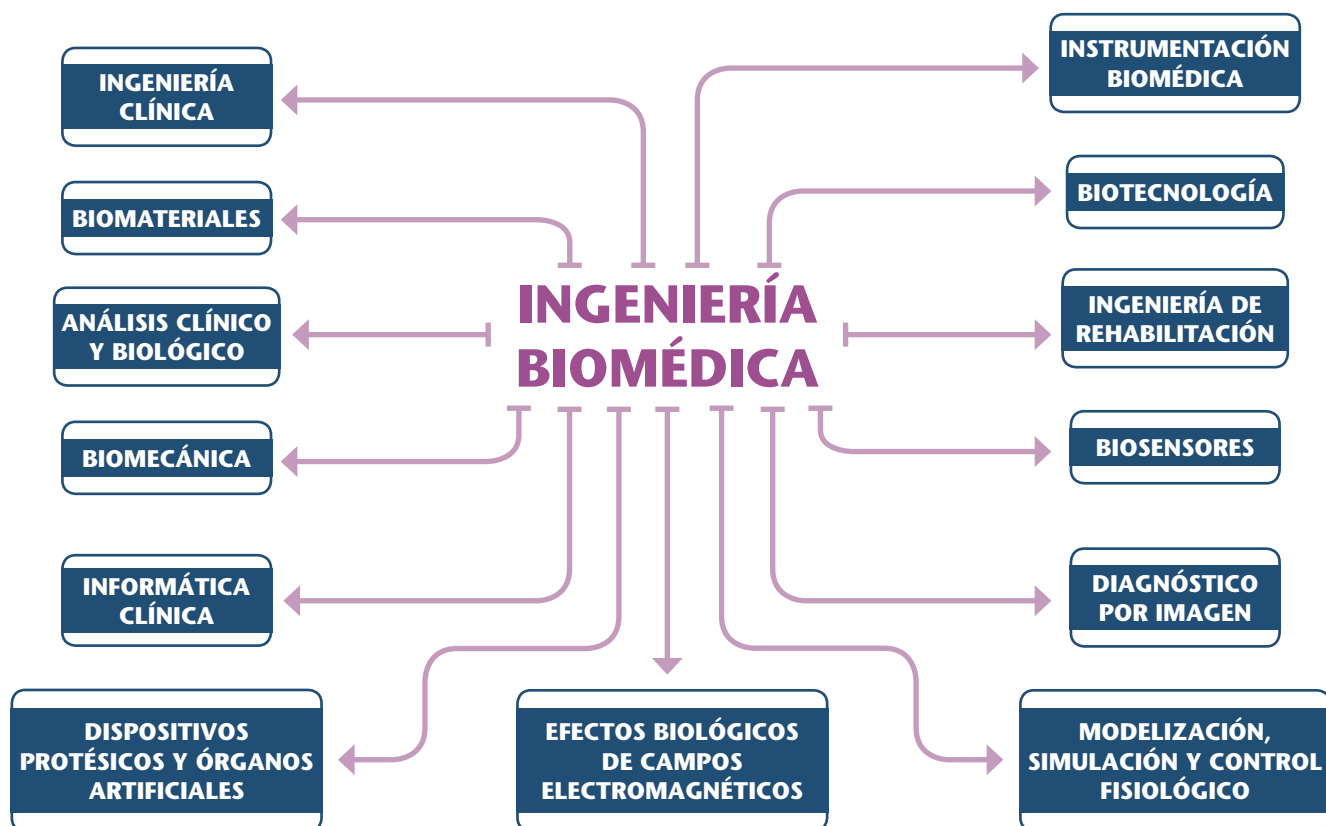


FIGURA 2

	ESPERANZA DE VIDA			
	Hombres		Mujeres	
	1980	1999	1980	1999
España	72.5	75.3	78.6	82.5
Media UE	70.6	74.6	77.2	80.9

Roma imperial:  
22 años

Inicio s. XX  
40 años

Año 2050:  
21% habitantes del planeta  
tendrá, más de 60 años:  
viviremos más, pero ¿viviremos  
mejor?

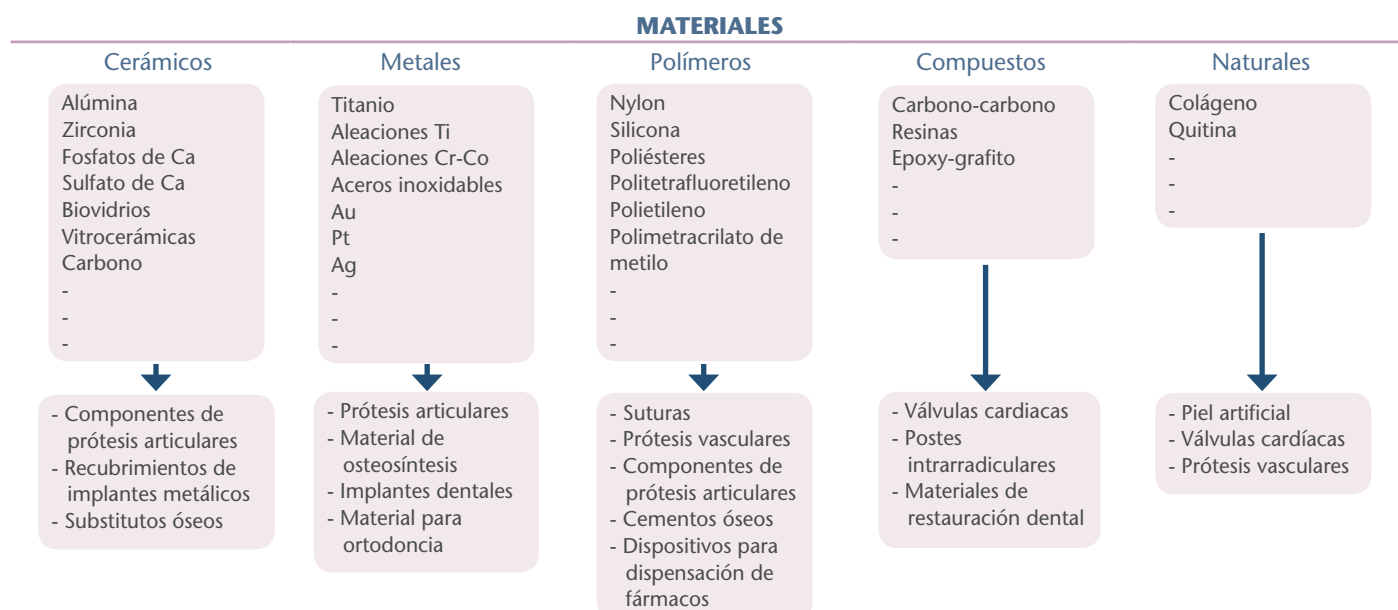
La esperanza de vida apunta hacia una subida espectacular en los próximos años. Por lo tanto, las noticias son buenas y malas a la vez. Buenas porque la mayoría de la gente prefiere morir cuanto más tarde mejor. Malas porque todavía hay mucho camino por recorrer en el mundo de los biomateriales y porque el incremento del costo de la asistencia médica será muy elevado. En cualquier caso, alargada la vida, el objetivo es vivir en buenas condiciones, tanto en el terreno social como económico o sanitario. En la figura 2 se ilustran estos datos.

Los mayores avances en el campo de los biomateriales se han producido en los países desarrollados, como consecuencia de la necesidad de proporcionar tratamiento clínico a un gran número de pacientes. El aumento de la expectativa de vida y la obligación de asegurar a los ciudadanos una cierta calidad de vida han sido factores clave. El aumento de la expectativa de vida ha incrementado a su vez, de forma considerable, el número de pacientes con problemas de osteoporosis. Si a esto unimos el aumento del parque automovilístico y la parte negativa de este avance social, los accidentes de tránsito, el número de problemas óseos ha crecido de forma alarmante en los últimos años. La búsqueda de posibles soluciones a los problemas de tejidos óseos hace que se produzca una gran demanda de

materiales para sustituir o reparar los huesos de manera artificial. Por otra parte, la mejora de las técnicas quirúrgicas ha hecho crecer a ritmo acelerado la demanda de prótesis, implantes y sistemas y aparatos médicos que deben trabajar en contacto con los tejidos corporales. Pero no sólo tejidos duros, también la sustitución de tejidos blandos ha dado lugar al desarrollo de un número importante de biomateriales. A más de 50 millones de personas en el planeta se les ha implantado algún tipo de prótesis. En la actualidad el mundo de los biomateriales se formula tres cuestiones: ¿qué calidad de vida proporcionarán? ¿Cuál es su precio? ¿Cuánto durará una prótesis implantada?

Los biomateriales, materiales implantables por vía intracorporal, pueden ser provisionales o definitivos, pero en cualquier caso deben llevar a cabo una función adecuada y no ocasionar daño alguno al organismo. Entre sus características no pueden faltar la de ser *biocompatibles* o biológicamente aceptables. Por lo tanto, factores decisivos a la hora de evaluar los biomateriales son su *biocompatibilidad* y su *duración*. Ya que tienen que permanecer en contacto con los tejidos vivos, es imprescindible que posean una buena compatibilidad, de modo que no se produzcan reacciones no deseadas en la interfaz tejido-material y mantengan sus prestaciones durante el tiempo que deban estar en servicio. Como es natural, ese tiempo será muy diferente según la función a la que esté destinado un determinado biomaterial. En la figura 3 se esquematizan los biomateriales utilizados en la actualidad y sus respectivas aplicaciones.

FIGURA 3





Un aspecto importante por destacar es que en los años 1970 los biomateriales eran materiales industriales a los que se les pedía que cumplieran con ciertos requisitos de aceptabilidad biológica. Sin embargo, en la actualidad se diseñan, fabrican y procesan muchos biomateriales con el único fin de que tengan una aplicación en el campo médico.

Es fácil comprender que el paciente, como usuario final, o el cirujano como utilizador, no necesitan biomateriales, sino componentes, piezas o aparatos y sistemas médicos fabricados con ellos. De hecho, los biomateriales se sintetizan y elaboran en específico para cada sistema o aparato médico. Ésta es una aproximación radicalmente diferente a la adoptada por tradición en el campo de los materiales, donde todavía hoy es posible encontrar aquellos desarrollados en el laboratorio en busca de aplicación industrial. Tal situación tiene profundas implicaciones puesto que el proceso de fabricación industrial está muy

ligado al desarrollo científico del material. Asimismo, la optimización de cada pieza o componente en función del biomaterial utilizado requiere un adecuado diseño *biomecánico* y *geométrico* que por necesidad debe ir unido a un *procesado* que permita, no sólo las mejores prestaciones de la pieza, sino su *reproductividad* y *fiabilidad* en toda la cadena de producción. Estos hechos, que no son nuevos en ingeniería, le dan una enorme versatilidad e interés al campo de los biomateriales, el cual, en constante evolución, ofrece excelentes oportunidades para el desarrollo de nuevos sistemas y la expansión de las aplicaciones actuales. No obstante, lo anterior requiere estudios de investigación avanzados para definir los verdaderos límites o las propiedades necesarias para la sustitución de tejidos con fiabilidad a largo plazo.

El trabajo en el campo de los biomateriales entraña un trabajo coordinado entre distintos expertos de diferentes áreas del conocimiento. Sin esta coordinación, absolutamente imprescindible, el trabajo en biomateriales no sería tal, dado que consistiría en el estudio aislado de distintos aspectos que, si bien pueden constituir estudios básicos interesantes, se escapan del objetivo final del biomaterial, que requiere la realización de muchas etapas, desde la identificación de una necesidad, hasta la aplicación clínica de la prótesis fabricada (véase la figura 4).

FIGURA 4

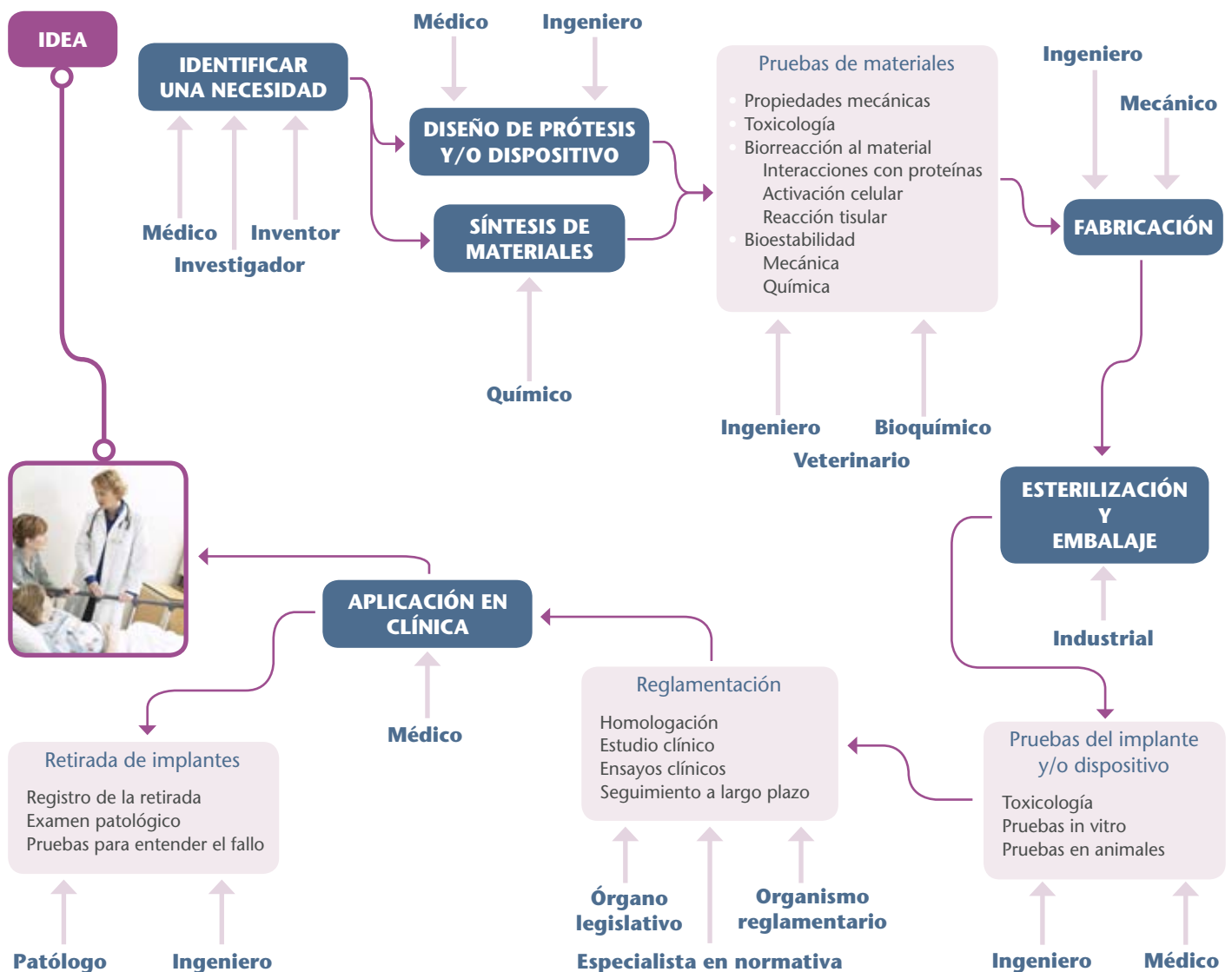
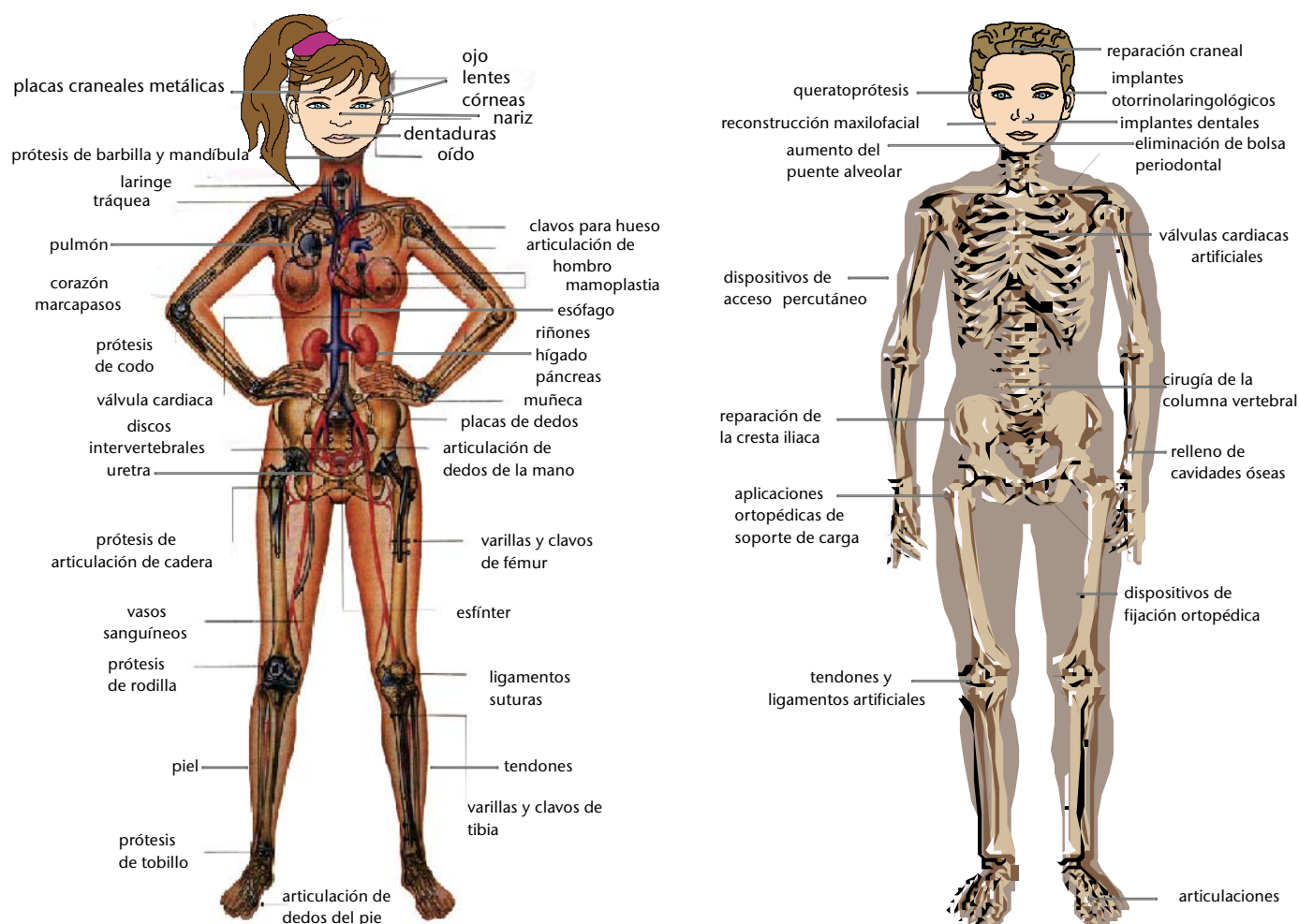


FIGURA 5



Piezas que pueden implantarse en el organismo

Biocerámicas para sustituir o regenerar tejido óseo

La enorme variedad del campo de los biomateriales se hace patente cuando intentamos enumerar algunas de sus áreas de actualidad y con proyección de futuro, tales como *materiales bioactivos* y *biodegradables*, *materiales "casi" bioinertes*, *dosificación controlada de fármacos*, *retirada de implantes*, *materiales inteligentes*, *dispositivos de invasión mínima*, *modulación de la regeneración tisular*, *materiales naturales e híbridos*, *nuevos métodos de evaluación*, *superficies e intercaras*, *materiales biomagnéticos*, *dispositivos electrónicos*,...

En cualquier caso, todo biomaterial debe ser biocompatible tanto en el aspecto *químico* como en *mecánica* y el *médico*. Los materiales utilizados como *biomateriales* tienen que poseer un carácter bien *inerte* o *tolerado*, bien *bioactivo*, y sus productos de degradación no deben originar toxicidad.

Cualquier problema por resolver en el campo de los biomateriales *nunca es sencillo*, ya que todos los problemas que se presenten serán siempre *multifactoriales* dada su naturaleza *multidisciplinar*.

El que los *biomateriales* sean tales implica una *composición adecuada* no sólo del *material implantado*, sino también de las *partículas liberadas* de cualquier implante, como consecuencia de su desgaste y de los *productos de degradación* a que pueda dar lugar. Pero la *tolerancia* y la *toxicidad* de cualquier sustancia dependen de la concentración en la que ésta se encuentra presente en el organismo humano.

## BIOCERÁMICAS

Las cerámicas con aplicaciones médicas son un interesante campo de investigación y desarrollo para la obtención de biomateriales útiles en la fabricación y/o fijación de implantes. Con biomateriales en general, y biocerámicas en particular, se pueden recambiar muchas *piezas* de nuestro cuerpo. En la figura 5 se recoge un resumen de estas posibilidades.

En la actualidad, para realizar una sustitución ósea predomina la utilización de tejido donante, tanto de aloinjertos como de autoinjertos, si bien va en aumento el porcentaje relativo de materiales artificiales. Los tejidos donantes, frente a su buena biocompatibilidad, poseen una serie de claras desventajas, ya que son costosos, escasos, presentan riesgo de transmisión de enfermedades, entre otras, con respecto a los materiales sintéticos que, a la larga, acabarán por conquistar una parte importante de este mercado.



Los materiales cerámicos que se utilizan en cirugía reconstructiva pueden clasificarse en dos grandes grupos: *bioinertes* y *bioactivos*. Los *bioinertes* ejercen una influencia nula o muy pequeña en los tejidos vivos que los rodean, y su principal representante es la *alúmina*. Los *bioactivos* pueden enlazarse a los tejidos óseos vivos. Ciertas composiciones de vidrios y vitrocerámicas poseen esta propiedad, como también la hidroxiapatita y el fosfato tricálcico, ensayados tanto en forma densa como porosa. El fenómeno de la bioactividad es un ejemplo más de la reactividad química del material cerámico con el entorno en el que se encuentra. Las primeras cerámicas que se utilizaron en aplicaciones médicas, la *alúmina* y la *zirconia*, son dos prototipos de cerámicas conocidas como *inertes*, razón fundamental por lo que fueron elegidas para su utilización en implantes. A estas cerámicas las caracteriza una cinética de reacción muy lenta, tanto que puede considerárselas como cerámicas “casi inertes”. Pero, como es natural, otras cerámicas tienen cinéticas de reacción más rápidas, e incluso muy rápidas. Al igual que en cualquier reacción química, el producto de reacción de una sustancia con su entorno puede conducir a un resultado no favorable, como es la corrosión de un metal, pero puede también conducir a un producto de reacción favorable que transforme químicamente el producto de partida en el producto final deseado. Éste es el caso de las *cerámicas bioactivas* que, en contacto con los fluidos fisiológicos, reaccionan químicamente en la dirección de producir hueso neoformado. Cuando se piensa en reparar una parte del esqueleto, *a priori* podrían existir dos posibilidades muy distintas: *reemplazar* la parte dañada, o *sustituirla* regenerando el hueso. Tal es el papel que juegan las biocerámicas bioactivas.

Desde el punto de vista estructural los materiales cerámicos pueden dividirse en sólidos cristalinos (*cerámicas*), en sólidos amorfos (*vidrios*) y en sólidos amorfos con núcleos de cristalización (*vitrocerámicas*), que a su vez pueden poseer carácter *inerte*, *bioactivo* o *reabsorbible*. Utilizaré estas clasificaciones para ilustrar algunos ejemplos de biocerámicas, pero antes, veamos cómo son los tejidos duros naturales que queremos sustituir, esto es, *huesos* y *dientes*.

#### TEJIDOS DUROS NATURALES: HUESOS Y DIENTES

Los huesos y los dientes de todos los vertebrados son materiales compuestos, *composites naturales*, en los que uno de los componentes es un sólido inorgánico, *hidroxiapatita carbonatada*. Aporta 65% de la masa total del hueso; el resto consiste en materia orgánica y agua.

La mayor parte de la materia orgánica está constituida por colágeno. Sus moléculas se asocian formando fibrillas y éstas, a su vez, se organizan en fibras que dan origen a diversas estructuras macroscópicas. Entre las moléculas quedan, de forma regular, pequeños compartimentos o espacios vacíos donde se depositan los nanocristales de la apatita, en un proceso de biomineralización controlado en el que intervienen más de doscientas proteínas ácidas diferentes. Dichas proteínas actúan como inhibidores, nucleadores o plantillas para el crecimiento epitaxial de los nanocristales, anclándolos al colágeno.

Los huesos tienen una composición, estructura cristalina, morfología, tamaño y orientación de las partículas específicos. La hidroxiapatita carbonatada de los huesos, contiene entre 4% y 8 % de carbonato, que se incrementa con la edad a costa del ión hidrógenofosfato. Los cristales son de tamaño nanométrico, con una longitud media de 50 nm, una anchura

de 25 nm y un espesor de sólo 2-5 nm, dispersos en la matriz orgánica. Su tamaño pequeño es un factor muy importante para explicar la solubilidad de las apatitas biológicas comparadas con las apatitas minerales. Tamaño pequeño y cristalinidad baja son dos características típicas de las apatitas biológicas que, junto con su composición no estequiométrica, desorden cristalino interno y presencia de iones carbonato en su red cristalina, permiten explicar su comportamiento.

Los huesos de los vertebrados, a diferencia de las conchas de los moluscos, pueden considerarse como un “*biomineral vivo*” porque en su interior existen células que están en constante actividad. El proceso de formación del hueso inicia con la acción de los osteoblastos, células especiales que sintetizan y segregan la matriz de colágeno en forma de una sustancia gelatinosa, el *osteóide*, que después se mineraliza por precipitación controlada de fosfato de calcio. Los osteoblastos quedan atrapados en el interior de la fase mineral y evoluciona a *osteocitos* que mantienen de forma constante la acción formadora de hueso. Por otra parte, otras células, los *osteoclastos*, catabolizan el hueso y lo destruyen. Este proceso dinámico de formación y destrucción del hueso permite su crecimiento durante la época de desarrollo del organismo, manteniendo su forma y consistencia, así como su regeneración cuando se produce una fractura. Al mismo tiempo, constituye el mecanismo de movilización y depósito de dos elementos esenciales, el fósforo y el calcio, de los que los huesos constituyen el almacén o reserva principal.

Los dientes tienen la misma naturaleza que los huesos, excepto en su capa superficial externa, el *esmalte*. El esmalte dental posee un contenido inorgánico mucho mayor que el del hueso, hasta 90%, así como de cristales prismáticos, mucho más grandes y muy orientados. Todo ello justifica su distinto comportamiento mecánico. De hecho, el esmalte se considera el material más duro y resistente del mundo biológico. Sin embargo, a diferencia del hueso, el esmalte dental de un organismo adulto no contiene células, por lo que no es capaz de regenerarse y cualquier deterioro que sufre resulta irreversible.

### APATITAS Y OTROS FOSFATOS

El fosfato de calcio más utilizado en la fabricación de implantes es la hidroxiapatita, por ser el compuesto más parecido al componente mineral de los huesos. Presenta buenas propiedades como biomaterial, *biocompatibilidad*, *bioactividad*, *osteconductividad*, *unión directa al hueso*, entre otras. Dentro del abanico de los fosfatos de calcio existentes, o de posible formulación, es importante conocer la estrecha dependencia entre relación Ca/P, acidez y solubilidad. En efecto, cuanto menor es la relación Ca/P, mayor es la acidez y solubilidad de la mezcla. Para relaciones  $Ca/P < 1$ , tanto acidez como solubilidad son muy elevadas y estos parámetros disminuyen mucho para relaciones Ca/P próximos al valor 1.67, que es el valor de la hidroxiapatita estequiométrica,  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ .

### VIDRIOS BIOACTIVOS

Entre los materiales cerámicos, en el extremo opuesto desde el punto de vista microestructural a las cerámicas propiamente dichas, *sólidos cristalinos*, se encuentran los vidrios, *sólidos amorfos*, que pueden considerarse bien como sólidos con muy elevado desorden estructural, bien como líquidos

con muy elevada viscosidad. En cualquier caso, lo que distingue a una cerámica cristalina de un vidrio es el orden-desorden de su red.

En 1971 Hench y colaboradores descubrieron que ciertas composiciones de vidrios se enlazan al hueso. A dichos vidrios se les denominan *vidrios bioactivos* y han sido objeto de numerosos estudios, con vistas a su utilización clínica como implantes para la sustitución y reparación de tejidos óseos. La unión con el hueso se produce a través de una capa de hidroxycarbonatoapatita formada en la superficie de los vidrios bioactivos cuando entran en contacto con los fluidos biológicos. Dicha capa se forma como consecuencia de la alta reactividad de los vidrios en un medio acuoso, que propicia un rápido intercambio de los iones de la superficie del vidrio con los de los fluidos circundantes. Este proceso produce una variación de la concentración iónica del fluido y, a la vez, la formación de una capa de gel de sílice en la superficie del vidrio; ambos efectos favorecen la cristalización de hidroxycarbonatoapatita.

Durante las décadas de 1970 y 1980, los vidrios bioactivos se obtenían en exclusiva por el método tradicional de fusión y enfriamiento rápido, con lo que se producían materiales con superficie específica y porosidad muy pequeñas. La investigación en vidrios de fusión se ha dirigido sobre todo en dos direcciones: una, reforzar las propiedades mecánicas sin perder la bioactividad, lo que por lo general se ha abordado mediante la preparación de vitrocerámicas, y la otra, estudiar la influencia de la composición en la bioactividad. En la actualidad, vidrios y vitrocerámicas bioactivos se utilizan clínicamente con marcas registradas. Por otra parte, desde principios de los años 1990 se han comenzado a preparar vidrios bioactivos utilizando el *método sol-gel*. La cinética de formación de hidroxycarbonatoapatita observada en los ensayos *in vitro* con vidrios sol-gel es superior a la de los vidrios de fusión y la velocidad de crecimiento de hueso en los ensayos *in vitro* también lo es.

El incremento de bioactividad de los vidrios sol-gel se puede explicar teniendo en cuenta que las propiedades texturales del material, *área superficial*, *volumen de poro* y *distribución de tamaño de poro* tienen gran influencia en su reactividad. El comportamiento de la superficie de las vitrocerámicas es un factor clave en la respuesta del implante. Por eso su caracterización es imprescindible. Cuanto mayor superficie específica y porosidad, mayor reactividad, y por lo tanto,

cinética más rápida en la respuesta. Por otro lado, las células tienen claras preferencias por la forma de la superficie y su terminación, *lisa* o *rugosa*. Se ha puesto de manifiesto que la superficie específica y porosidad elevadas de los vidrios sol-gel tienen una marcada influencia en la cinética de formación de hidroxycarbonatoapatita. La mayor reactividad de los vidrios sol-gel frente a los de fusión se pone de manifiesto al comprobar que se ha descrito bioactividad para vidrios sol-gel con un contenido en  $\text{SiO}_2$  tan alto como 90%. Con esa composición un vidrio de fusión sería muy estable y no bioactivo.

Los vidrios bioactivos reaccionan con los fluidos, y como producto de la reacción se forma carbonatoapatita. Este tipo de ensayos se pueden realizar en muy diversos fluidos, pero de cara a las aplicaciones que se buscan, una buena elección es utilizar un fluido fisiológico simulado, que tenga los mismos iones y en concentraciones similares a las del plasma<sup>(11)</sup>. El ensayo *in vitro* se puede llevar a cabo en sistema *estático*, o en sistema *dinámico* para reproducir mejor las condiciones en las que se encontrará el vidrio cuando se ensaye *in vivo*.

Una vez crecida la capa de carbonatoapatita sobre la superficie de vidrio, se puede caracterizar por técnicas de superficie.

## VITROCERÁMICAS

El desarrollo de las *vitrocerámicas* se inició en los años 60. Son cerámicas policristalinas obtenidas por cristalización controlada de vidrios, donde coexisten fases amorfa y cristalinas. Se obtienen sometiendo los vidrios a un tratamiento térmico adecuado, de tal forma que se logre cristalizar aproximadamente 90% de la masa vítrea, y que el tamaño de dichos cristales esté comprendido entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$ . Para facilitar su síntesis se suelen añadir precipitados metálicos, lo cual facilita la nucleación y cristalización de fases cristalinas con tamaños inferiores a la micra. Estas vitrocerámicas poseen excelentes propiedades térmicas y mecánicas en comparación con las cerámicas tradicionales, y en el campo de los biomateriales se sintetizan con la esperanza de mejorar las pobres propiedades mecánicas de los vidrios, sus precursores, pero sin que el tratamiento térmico, o la adición de precipitados metálicos, afecte, o lo haga poco, a la bioactividad de los mismos.

## VITROCERÁMICAS MAGNÉTICAS

Los vidrios y vitrocerámicas bioactivos apuntan otra utilidad en el campo de las cerámicas, la posible eliminación de células cancerígenas en huesos, mediante el método de hipertermia. Este método consiste en el calentamiento selectivo sobre una determinada zona. Por encima de 43 °C, las células cancerígenas, con menos vasos sanguíneos y terminaciones nerviosas, por tanto menos oxigenadas que el resto de las células, son las primeras en morir cuando se les aplica un tratamiento térmico. Si éste es selectivo, esto es, 43 °C con un control en el tiempo de aplicación, se podría conseguir atacar a las células cancerosas sin alterar a las células sanas. La inclusión de agregados de material ferro o ferrimagnético en los vidrios y vitrocerámicas del sistema  $\text{SiO}_2\text{-CaO-P}_2\text{O}_5$  podría ser una solución a este problema. Por un lado, se puede lograr la unión y crecimiento de hueso con la vitrocerámica bioactiva y, por otro, un aumento controlado de la temperatura mediante el ciclo de histéresis del material magnético y las corrientes de Foucault inducidas por un campo magnético externo variable con el tiempo.

## MEZCLAS BINARIAS

Por otra parte, existen bastantes intentos de, a partir de mezclas bifásicas de fosfatos de calcio, sintetizar el componente mineral del hueso. Así se han preparado sustitutivos óseos basados en mezclas entre hidroxiapatita y  $\beta$ -fosfato tricálcico, que evolucionan, bajo condiciones fisiológicas, a carbonatoapatita. Estas reacciones están basadas en equilibrios entre la fase más estable, hidroxiapatita, y la más reabsorbible,  $\beta$ -fosfato tricálcico, que dan lugar a una mezcla que sufre una progresiva disolución en el cuerpo humano sirviendo como semilla de formación de nuevo hueso y la aportación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  al medio local. Este material se puede utilizar tanto como material inyectable, como en forma de recubrimientos y en todas aquellas aplicaciones derivadas de su uso como sustitutivo óseo en forma masiva, bien conformado en piezas, bien como relleno de defectos óseos. La variedad de mezclas bifásicas es enorme, utilizando fosfatos de calcio, vidrios,  $\text{CaSO}_4$ , etc.

## CEMENTOS BIOACTIVOS DE FOSFATO DE CALCIO

Otra línea de investigación muy interesante es la de cementos bioactivos de fosfato de calcio. Éstos fraguan *in situ*, son muy compatibles con el hueso y supuestamente se reabsorben lentamente, proceso durante el cual el hueso natural va sustituyéndolos. Sin embargo, las propiedades de estos cementos, actualmente en uso, son aún insuficientes para una aplicación fiable. Existen problemas relativos a su rigidez mecánica, al tiempo de fraguado, a la técnica de aplicación sobre el defecto óseo y a sus propiedades biológicas finales. Pero recientemente se han descrito algunos avances en el desarrollo de nuevos cementos de fosfato de calcio que parecen resolver al menos alguna de estas dificultades. Por ejemplo, se reduce el tiempo de fraguado incluso en presencia de sangre y se mejora considerablemente su rigidez ante compresión.

En *cementos de fosfatos de calcio*, la técnica que se utiliza para su obtención es mezclar distintos componentes, entre los cuales uno de ellos tiene como misión fraguar dicha mezcla. En el caso concreto del cemento

de Constanz comercializado por Norian SRS, el producto formado es una carbonatoapatita (dalita) de baja cristalinidad con un contenido en carbonatos que alcanza 4.6%, y que sustituyen a los grupos fosfato (carbonatoapatita tipo B) de igual modo que se produce en los huesos. En la actualidad ya existen comercializados varios cementos de este tipo.

### HÍBRIDOS ORGÁNICO-INORGÁNICO

Los huesos son materiales compuestos naturales con un componente inorgánico, *nanoapatitas*, dentro de una matriz orgánica. Pueden considerarse por tanto como materiales híbridos naturales orgánico-inorgánico.

Ambas fases se integran una en la otra a escala nanométrica. En base a la regeneración de tejido óseo se puede pensar en sintetizar nuevos materiales a imagen y semejanza de los tejidos naturales. Esto se está intentando desarrollar en la actualidad.

### STAR GELS

En 1995 la compañía DuPont Corp. desarrolló un tipo de materiales híbridos que denominó *star-gels*, con propiedades mecánicas intermedias entre las de los vidrios tradicionales y las gomas elásticas.

Una variación en la composición de estos híbridos introduciendo una pequeña proporción de calcio ha permitido que además tengan un comportamiento bioactivo.

Esto hace pensar en un nuevo tipo de materiales como posibles sustitutos óseos a desarrollar en los próximos años.

### RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS

Para todas aquellas aplicaciones clínicas que requieran soportar carga se están utilizando implantes en su mayoría metálicos, lo que origina problemas importantes debido a: (a) la gran diferencia de propiedades mecánicas entre el implante artificial y el hueso natural, lo que da lugar a *rupturas*; (b) la presencia de iones que, procediendo del implante artificial, pueden ser tóxicos o perjudiciales y son causa de *dolor*, y (c) la imposibilidad de regenerar el hueso natural. Una alternativa, mientras no se logre un material similar al hueso, es recubrir el implante metálico con cerámicas. Esto se está realizando en la actualidad tanto en implantes dentales como en prótesis de cadera. El camino a recorrer es todavía muy largo, pero ya se comercializan algunos implantes metálicos recubiertos de cerámicas, y se sigue investigando para eliminar sus problemas.

El proceso de recubrimiento de un metal por una cerámica es complejo y existen muchos métodos para realizarlo. De él depende en gran parte el éxito clínico, ya que la calidad y la duración de la fijación en la interfaz dependen en gran medida de la pureza, tamaño de partícula, composición química del recubrimiento, espesor de la capa, y características superficiales del sustrato. Otra de las ventajas que se obtienen al recubrir un implante metálico por una cerámica es la reducción de la liberación de iones procedentes de la aleación metálica. La cerámica constituye una verdadera y eficaz barrera que ralentiza la cinética de difusión de iones metálicas al organismo vivo. Particularmente se está utilizando la hidroxiapatita, para





mejorar la fijación de las prótesis articulares de cadera, dado sus excelentes propiedades biológicas tales como atoxicidad y ausencia tanto de respuesta inflamatoria como de reacción fibrosa e inmunitaria.

#### MATERIALES MESOPOROSOS ORDENADOS DE ÓXIDO DE SILICIO

En 1992 un grupo de investigación de la compañía Mobil Oil sintetizó una nueva familia de materiales, denominada M41S, que poseía una distribución ordenada de poros, con tamaño muy homogéneo de valores comprendidos entre 2-10 nm. Estos materiales tienen un volumen de poro muy elevado, del orden de  $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ , y una superficie específica comprendida entre  $500 \text{ m}^2/\text{g}$  y  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ .

El esqueleto inorgánico de los materiales mesoporosos ordenados de sílice y de los vidrios bioactivos disponen de grupos silanoles que se pueden funcionalizar con una enorme variedad de moléculas orgánicas, tanto polares como apolares. Teniendo en cuenta la posibilidad de introducir distintas especies en las matrices mesoporosas para liberarlas posteriormente de forma controlada, se puede pensar en combinar esta propiedad con la bioactividad de las mismas, lo cual abre un nuevo campo de aplicación para estos materiales en ingeniería de tejidos, donde estos materiales pueden actuar como soportes celulares a los que incorporar proteínas, péptidos o factores de crecimiento, para posteriormente liberarlos al entorno promoviendo la proliferación y diferenciación celular.

#### VIDRIOS CON PLANTILLA

La posibilidad de sintetizar vidrios utilizando surfactantes directores de la estructura tal y como se procede en las síntesis de materiales mesoporosos de sílice conduce a los denominados “vidrios con plantilla”. De esta forma se consiguen materiales con bioactividad equivalente o superior a los de los vidrios con una porosidad ordenada que los hace óptimos para pensar en introducir fármacos, péptidos, proteínas o factores de crecimiento para su posterior liberación controlada.

#### LIBERACIÓN DE FÁRMACOS EN MATRICES CERÁMICAS

Un valor añadido en la fabricación de implantes cerámicos sería poder incluir fármacos tales como antibióticos, antiinflamatorios, anticancerígenos,...para ser posteriormente liberados de una forma gradual. En efecto, si se tienen en cuenta las estadísticas de infecciones en prótesis articulares de cadera el número oscila entre 2 y 4%, infecciones óseas que se elevan hasta un 45% en los clavos que se utilizan en fijadores externos. Uno de los principales problemas es como acceder a la zona de hueso infectado para suministrar el antibiótico adecuado. Si se logra agregarlo en el propio implante, sin duda alguna el valor añadido estaría conseguido.

Hay un hecho claro y es la necesidad de encontrar procedimientos de incorporación de fármacos a los biomateriales implantables, ya que en cualquier tipo de intervención quirúrgica el riesgo de infección es elevado. Si el antibiótico y/o antiinflamatorio puede ubicarse en el propio implante, no cabe duda que actuará mayoritariamente de forma local, aprovechando su acción allí donde haga falta sin perjudicar otras partes del organismo.

Conformar las cerámicas no es complicado. La tecnología cerámica ha desarrollado numerosos procedimientos, algunos tradicionales, otros novedosos, para resolver los problemas técnicos de cada problemática. La utilización de altas temperaturas es habitual para procesar cerámicas y darles la forma deseada. Y éste es el principal problema cuando se quieren incluir fármacos a estas cerámicas, ya que sus temperaturas de descomposición son muy bajas, frente a las altas temperaturas necesarias para conformar piezas cerámicas.

Las matrices cerámicas se pueden obtener con textura abierta y elevada superficie específica y porosidad. Esto se puede conseguir con cerámicas tradicionales tales como fosfatos, vidrios, cementos o cualquiera de sus combinaciones bifásicas, utilizando procedimientos adecuados, o sintetizando materiales mesoporosos ordenados con una distribución ordenada de canales y cavidades cuya matriz está formada exclusivamente por sílice.

Cualquiera de estas cerámicas que dispongan de numerosos poros con un tamaño adecuado donde quepan las moléculas del fármaco que se desee incluir son buenas candidatas para utilizarlas en liberación controlada.

En primer lugar el fármaco tendrá que ocupar los poros vacíos de la matriz cerámica para una vez llenos, proceder a su liberación controlada. Por tanto, el primer paso será diseñar los poros del material cerámico, controlando su número, su tamaño, su forma, su distribución, su conectividad y la posible funcionalización de su pared, en función del fármaco que se quiere utilizar.

Analicemos en primer lugar el tamaño que tienen algunas de las moléculas de los fármacos que serían útiles para las aplicaciones médicas en implantes, por ejemplo el ibuprofeno en su dimensión más larga mide 1 nm, la gentamicina 0,9 nm y el cisplatino 0.5 nm. En general el tamaño de las moléculas de fármacos se encuentra en el rango del nanómetro. Por lo tanto, cualquier material poroso puede albergar fácilmente estas moléculas si sus poros tienen tamaños superiores al nanómetro.

La porosidad de las matrices cerámicas puede ser ordenada o desordenada. Sin duda alguna, si la distribución de poros de la matriz cerámica es ordenada, la adsorción y liberación del fármaco correspondiente será más homogénea que en el caso de una distribución desordenada de poros de la matriz. Una matriz ordenada tiene el valor añadido de lograr resultados reproducibles, cosa complicada cuando la matriz es desordenada.

Pero para la adsorción y posterior liberación del fármaco no sólo hay que diseñar la porosidad de la matriz. Una vez seleccionado el fármaco que se quiere introducir hay que calcular la relación entre el tamaño del poro de la matriz y el tamaño de la molécula del fármaco a utilizar y estudiar tanto su solubilidad como la interacción de la pared del poro con la molécula del fármaco. Este último punto es esencial para ajustar los valores de liberación del fármaco a una cinética adecuada a la aplicación para la que está diseñada. En efecto, las paredes de las matrices cerámicas se pueden funcionalizar con una amplia variedad de especies químicas y de este modo lograr modificar sus propiedades de adsorción. Estas características las convierte en matrices susceptibles de alojar distintos fármacos y cederlos de manera sostenida durante periodos de tiempo prolongados a un medio apropiado.

### ANTIBIÓTICOS EN VIDRIOS BIOACTIVOS

Sin embargo, como ya se ha indicado, los procesos que permitan incluir antibióticos durante las etapas de fabricación de las piezas implantables, necesariamente se tienen que realizar a temperaturas inferiores a las de

descomposición de los fármacos. Esto es especialmente complicado cuando se trata de fabricar piezas cerámicas con antibióticos, dado que los métodos tradicionales para su conformado requieren la utilización de altas temperaturas. No obstante, hay posibles soluciones a este problema, por ejemplo utilizar presión combinando la modalidad uniaxial con la isostática. De esta forma, el fármaco permanece inalterado y homogéneamente distribuido en la pieza cerámica.

Para ilustrar esta forma de conformado podemos elegir como matriz cerámica los vidrios bioactivos, que han mostrado poseer excelentes propiedades respecto a su biocompatibilidad y bioactividad, y son capaces de unirse íntimamente al hueso sin interposición de tejido fibroso, promoviendo de este modo la regeneración del mismo. Estos vidrios suelen aplicarse en forma de granulados, lo que en ocasiones dificulta la labor del cirujano porque es muy frecuente que se produzca la diseminación del material durante la intervención quirúrgica, de ahí la necesidad de conformarlos en piezas, pero en este caso, la dificultad consiste en cómo incorporar el antibiótico sin aplicar temperatura.

La posibilidad de disponer piezas constituidas exclusivamente por un vidrio bioactivo y un antibiótico, sin la presencia de componentes poliméricos, requirió la búsqueda de un procedimiento de conformado adecuado a este propósito. La idea fue que estas piezas permitieran una liberación controlada de antibiótico a escala local durante periodos de tiempo prolongados y, simultáneamente, el vidrio estimulara la regeneración del tejido óseo, siendo todos los componentes reabsorbibles a medio plazo, por lo que ninguno necesitara su posterior retirada.

### FÁRMACOS EN MATRICES MESOPOROSAS DE SÍLICE

Aunque todavía hay mucho trabajo por hacer en este campo, ya se conocen algunos factores, tales como la influencia del tamaño del poro, de la estructura de la matriz mesoporosa y de la funcionalización de la pared del poro que influyen sobre la cinética de liberación controlada de muchos fármacos.

La carga del fármaco en la matriz mesoporosa se realiza por impregnación. Una vez cargado se procede a realizar el estudio *in vitro* de su liberación. Para ello pueden utilizarse distintas soluciones. En particular, al tratarse de la liberación





de un fármaco introducido en un implante, por tanto de un biomaterial que deberá realizar su función en el interior del cuerpo humano, una buena elección puede ser un fluido corporal simulado que sea muy parecido al plasma humano o utilizar suero fisiológico para no complicar todavía más el sistema de detección. En último lugar se procederá a la determinación de la concentración de fármaco liberado a la solución y el tiempo invertido en el proceso de liberación.

Durante el proceso de carga se produce una interacción entre los grupos silanol de la pared y determinados grupos del fármaco. El proceso de liberación se produce por difusión. En general una funcionalización adecuada de la pared del poro puede incrementar la cantidad de fármaco adsorbida y ralentizar el proceso de difusión del fármaco, al establecerse interacciones más fuertes que dificultan algo más el movimiento.

De hecho, la funcionalización de la pared parece ser el factor de más peso en el control de la liberación de fármacos. En efecto, el tiempo de liberación de la carga de ibuprofeno en una matriz MCM-41 se multiplica por un factor 4 cuando se funcionaliza su pared con grupos amino.

Tamaño de poro y estructura de matriz son factores a considerar y de hecho permiten modificar la liberación del fármaco, pero sus resultados, en general, son mucho menos significativos que los que pueden lograrse con una funcionalización adecuada.

Pero en cualquier caso hay que dar un salto significativo para lograr, con estas matrices, sistemas inteligentes de liberación de fármacos.

La doble posibilidad de aplicación de las matrices mesoporosas, como sistemas de liberación controlada de fármacos y como regeneradoras de hueso, da la oportunidad de combinarlas utilizando como carga péptidos, proteínas o factores de crecimiento que aceleren la regeneración de tejido óseo.

Por otra parte, cualquiera de las cerámicas que se han expuesto en este trabajo se pueden conformar en piezas con una porosidad diseñada, en la escala de las micras para utilización como sustratos en ingeniería tisular.

Sin duda estamos en una etapa de la investigación en biocerámicas que, cuanto menos, abre las puertas a nuevos materiales para regeneración y sustitución ósea.

#### 4INGENIERÍA DE TEJIDOS

Esta área está en pleno apogeo investigador. Consiste en disponer de un andamio fabricado con un material artificial, por ejemplo, con una biocerámica. Sobre ella se cultivan células para que la pieza llegue a colonizarse. Esto puede realizarse tanto *in vitro* como *in vivo*. Esta estrategia de reparación y sustitución de partes dañadas del organismo es claramente distinta a la de los implantes biomédicos tradicionales utilizados en la actualidad.

#### CONCLUSIONES

Las biocerámicas son biomateriales con buena biocompatibilidad y oseointegración y, a su vez, son los materiales más parecidos al componente mineral del hueso. Sin embargo, en la actualidad la utilización de cerámicas para aplicaciones que deban soportar cargas todavía está lejos, y la razón principal es que son rígidas y quebradizas. Por eso las aplicaciones de las biocerámicas están centradas en la fabricación de implantes que no deban soportar cargas, como es el caso de la cirugía del oído medio, en el relleno

de defectos óseos tanto en cirugía bucal como en cirugía ortopédica y en el recubrimientos de implantes dentales y articulaciones metálicas. Actualmente, se está investigando en la síntesis de híbridos orgánico-inorgánico, la fabricación de cementos basados en fosfatos de calcio, la preparación de mezclas bifásicas para obtener el componente mineral del tejido óseo, lo más similar posible al natural de las apatitas biológicas, y la fabricación de sustratos portadores de células y factores bioquímicos para ingeniería tisular. La obtención de materiales nanoestructurados a semejanza de las estructuras jerárquicas complejas de los tejidos duros, *huesos y dientes*, es otro campo de investigación muy atractivo. Por último, la posibilidad de funcionalizar las superficies con distintas moléculas, de diferente naturaleza y tamaño, por medio de su adhesión al sustrato, así como la posibilidad de nanoestructurar fisicoquímica y topográficamente la superficie, podrá permitir a medio plazo actuar de manera selectiva sobre las especies biológicas, tales como proteínas, péptidos...

### BIBLIOGRAFÍA

- M. Vallet-Regí 2001. *CERAMICS FOR MEDICAL APPLICATIONS*. J. Chem. Soc. Dalton Trans. 02, 97-108. Perspective Article.
- M. Vallet-Regí, C.V. Ragel, A.J. Salinas 2003. *GLASSES WITH MEDICAL APPLICATIONS*, Eur. J. Inor. Chem. (6) 1029-1042. Microreview
- M. Vallet-Regí and J. González-Calbet 2004. *CALCIUM PHOSPHATES IN THE SUBSTITUTION OF BONE TISSUE*. Progress in Solid State Chemistry. 32, 1-31. Review.
- M. Vallet-Regí 2006. *REVISITING CERAMICS FOR MEDICAL APPLICATIONS*. Dalton Trans. 5211-5220. Perspective Article.
- M. Vallet-Regí, A Ramila, R. P. del Real, J. Perez-Pariente 2001. *A NEW PROPERTY OF MCM-41: DRUG DELIVERY SYSTEM*. Chem. Mater. 13, 308-311.
- M. Vallet-Regí, A.J. Salinas, J. Ramírez-Castellanos and J.M. González-Calbet 2005. *NANOSTRUCTURE OF BIOACTIVE SOL-GEL GLASSES AND ORGANIC-INORGANIC HYBRIDS*. Chem. Mater. 17, 1874-1879.
- M. Vallet-Regí, L. Ruiz-González, I. Izquierdo and J. M. González-Calbet 2006. *REVISITING SILICA BASED ORDERED MESOPOROUS MATERIALS: MEDICAL APPLICATIONS*. J. Mater. Chem., 16, 26 – 31. Application Article.
- M. Vallet-Regí 2006. *ORDERED MESOPOROUS MATERIALS IN THE CONTEXT OF DRUG DELIVERY SYSTEMS AND TISSUE ENGINEERING*. Chem. Eur. J. 12, 5934-5943. Concept article.
- M. Vallet-Regí 2006. *BONE REPAIR AND REGENERATION POSSIBILITIES*. Mat.-wiss. u. Werkstofftech, 37, (6).





# APLICACIONES TERAPÉUTICAS DE LAS CÉLULAS MADRE, ¿MITO O REALIDAD?

JOSÉ LÓPEZ BARNEO

Hospital Universitario Virgen del Rocío,  
Universidad de Sevilla, España

LA INVESTIGACIÓN CON CÉLULAS MADRE REPRESENTA UNA DE LAS LÍNEAS DE vanguardia de la investigación biomédica actual, debido, entre otras razones, a su potencial aplicabilidad médica. Existen células madre embrionarias, que por lo general se obtienen de embriones sobrantes en las clínicas de fertilización *in vitro*, y células madre en los tejidos adultos. Si bien las células madre adultas se aplican ya en el tratamiento de patologías específicas, la investigación con células madre embrionarias está todavía en fase preclínica y su aplicación directa a la medicina clínica no parece ser inmediata. La investigación con células madre embrionarias ha generado un debate social importante en algunos países occidentales, aunque en la mayoría de los casos la información que se transmite a la población es imprecisa y de poca calidad. En este artículo se pretende hacer una labor divulgativa, objetiva y ajustada al conocimiento científico, sobre la naturaleza de las células madre, los avances científicos realizados y las perspectivas futuras de su aplicación en medicina regenerativa.

JOSÉ LÓPEZ BARNEO (TORREDONJIMENO, JAÉN, 1952) ES DOCTOR EN MEDICINA (Universidad de Sevilla). Completó su formación con estancias posdoctorales en París, Francia, y en las Universidades de Pensilvania y Nueva York, Estados Unidos. Catedrático de Fisiología. Es director del Laboratorio de Investigaciones Biomédicas y coordinador general de Investigación del Hospital Universitario Virgen del Rocío de Sevilla. De su labor científica destaca el haber introducido en nuestro país las técnicas de estudio biofísico y molecular de los canales iónicos, dianas de interés terapéutico cada vez mayor. Además de terapia celular, el grupo de López Barneo investiga en la actualidad sobre la etiopatogenia de la neurodegeneración en la enfermedad de Parkinson. Ha publicado sus trabajos en las revistas científicas de mayor prestigio mundial, tales como *Science*, *Neuron* y *Nature Neuroscience*, entre otras. Es miembro de la Academia Europea y vocal del Consejo Asesor del Ministerio de Sanidad y Consumo. Entre los premios y distinciones a su labor científica destacan el Premio Nacional de Investigación Científica

y Técnica Juan Carlos I (1993), la Medalla de Andalucía (1994), el Wellcome Visiting Professorship por la Universidad de Minnesota (1995), el Premio de Investigación Rey Jaime I (1998) y el Premio Maimónides de Investigación de Andalucía (2002).

# APLICACIONES TERAPÉUTICAS DE LAS CÉLULAS MADRE, ¿MITO O REALIDAD?

JOSÉ LÓPEZ BARNEO

Hospital Universitario Virgen del Rocío,  
Universidad de Sevilla, España

## PREÁMBULO

**L**A INVESTIGACIÓN CON CÉLULAS MADRE Y SU POTENCIAL aplicación a la curación de las enfermedades del hombre se encuentran entre los avances más revolucionarios de la biomedicina moderna. La era de las células madre se inició en la década de 1960, con el trasplante de células de la médula ósea a personas que habían sufrido destrucción de la misma por radiaciones o que presentaban leucemia. Aunque desde entonces esta tecnología se ha aplicado con éxito a pacientes de todo el mundo, el avance en el conocimiento científico de estas células fue lento hasta hace cerca de una década, cuando se generaron las primeras líneas de células madre embrionarias, se descubrieron células madre en otros tejidos del cuerpo y se desarrollaron métodos para la diferenciación controlada de las células madre a tejidos diversos. El desarrollo de las investigaciones con células madre y de algunas posibles aplicaciones médicas de las mismas requiere el uso de células procedentes de embriones humanos, lo que conlleva implicaciones éticas no desdeñables. Las cuestiones éticas asociadas al uso médico de embriones han impregnado la investigación con “células madre” y generado un debate con cobertura mediática muy exagerada y en general de baja calidad, en numerosos países. En España, por ejemplo, la “cuestión células madre” alcanzó en tiempos recientes un clímax especial pues del debate social saltó a la arena política. De ello se derivó una serie de comportamientos de personas y grupos con intereses e ideologías diversos que han distorsionado la validez científica de la información que se transmite a la población. El objetivo de este artículo es divulgar de la forma

más didáctica posible los conocimientos científicos bien establecidos sobre las células madre, discutir su posible aplicabilidad en medicina regenerativa y analizar las perspectivas futuras de este campo.

## ¿QUÉ SON LAS CÉLULAS MADRE?

Las **células madre o troncales** (de *stem cells* en inglés) son células progenitoras que se dividen para generar nuevas células y que por el proceso de diferenciación se convierten en los elementos básicos de los tejidos del organismo adulto. La célula madre inicial, de la que derivan los trillones de células del cuerpo humano, es el óvulo fecundado por el espermatozoide. Hay dos tipos distintos de células madre: las *células madre embrionarias* y las *células madre somáticas o específicas de tejidos*.

Las *células madre embrionarias* se obtienen del embrión en sus estadios iniciales y son pluripotentes, lo que indica que por diferenciación pueden producir células de todos los tejidos del organismo. Tras la fecundación, el óvulo se convierte en la primera célula con dotación genética completa (el cigoto) e inicia de forma casi inmediata sucesivas divisiones celulares que durante los primeros días del embarazo dan lugar a células hijas o blastómeros, dispuestas en una especie de racimo con forma de mora (mórula). Cuando la fecundación se realiza *in vitro* (mezclando espermatozoides con óvulos en una placa de cultivo) se seleccionan varios embriones en fase de mórula para transferirlos al útero de la madre. Los embriones restantes se pueden almacenar congelados para su posible uso posterior. En la mayoría de los países donde la fecundación *in vitro* es legal, no se permite la transferencia a la madre de embriones que lleven congelados varios años (cuatro o cinco por lo regular), por lo que este procedimiento genera embriones sobrantes que se destruyen o se usan para la investigación. Los blastómeros que derivan en forma directa del cigoto tienen en principio la capacidad de generar por sí mismos un nuevo ser. De hecho, los gemelos idénticos derivan cada uno de blastómeros que se independizaron y formaron mórulas diferentes. Las células madre embrionarias no son blastómeros, sino que se obtienen de una fase posterior del desarrollo. Cuando un embrión generado *in vitro* se mantiene en cultivo, en pocos días la mórula se organiza en

una estructura esférica llamada blastocisto. En él ya ha ocurrido una primera diferenciación celular debido a que unas pocas células forman la cubierta externa que recubre a la esfera (de donde derivaría la placenta en caso de encontrarse en el útero materno), mientras que otras se mantienen agrupadas y forman la masa celular interna (de donde proceden los tejidos fetales) (ver figura 1). Las células de la masa celular interna se denominan *células madre embrionarias* porque pueden extraerse con facilidad del blastocisto; puestas en placas de cultivo se autorrenuevan (o multiplican) de forma acelerada y en condiciones adecuadas pueden derivarse hacia la diferenciación a los distintos tipos de células que existen en los tejidos adultos. Dado que de cada blastocisto se extraen sólo unas pocas decenas o centenares de células madre embrionarias, el primer paso por dar con ellas es multiplicarlas en condiciones que faciliten al máximo su capacidad proliferativa y eviten su maduración hacia células más diferenciadas. De este modo se crean líneas de células madre embrionarias que pueden mantenerse congeladas de forma indefinida y usarse cuando convenga. Las células madre embrionarias obtenidas de la forma indicada no tienen capacidad de generar un nuevo ser, pero tratadas de forma adecuada sí pueden diferenciarse hacia los tejidos deseados (como por ejemplo, células del sistema nervioso o productoras de insulina, músculo cardíaco y hueso) (Chiu y Rao, 2003).

La obtención de líneas de células madre es un procedimiento que, si bien por el momento tiene una eficiencia no demasiado alta, es relativamente sencillo, por lo que se podrían generar muchas de ellas a partir de los embriones congelados existentes en las clínicas de fecundación *in vitro*. Es difícil hacer alguna predicción en este campo; sin embargo, es probable que muchos de los embriones se hayan congelado en condiciones inadecuadas y que sus células estén muertas o dañadas. Por lo tanto, parece aconsejable que los programas de investigación en células madre embrionarias cuenten con la donación permanente de nuevos embriones sobrantes de la fecundación *in vitro* o de los embriones descartados tras el diagnóstico prenatal, para obtener líneas celulares a partir de ellos. Las líneas de células madre embrionarias de animales comunes de laboratorio (ratones por lo general) se utilizan desde hace años de forma rutinaria en todos los centros de investigación y se intercambian entre ellos de forma fácil y segura. Las primeras líneas de células madre embrionarias humanas con capacidad para diferenciarse en tejidos adultos se describieron hace sólo nueve años (Thompson *et al.*, 1998). En la actualidad, tanto la producción de nuevas líneas de células madre embrionarias humanas como el intercambio de las mismas está regulado por leyes específicas en los diferentes países.

Las *células madre somáticas o específicas de tejido* se encuentran en los diferentes tejidos del organismo una vez desarrollados tras la embriogénesis. Las poblaciones de células madre de tejidos aparecen durante la vida fetal y disminuyen de modo progresivo a lo largo de la vida posnatal. Estas células se denominan a veces células madre adultas para resaltar su presencia en los tejidos del individuo adulto. El ejemplo paradigmático de las células madre adultas son las de la médula ósea referidas con anterioridad. Aquí se encuentran las “células madre hematopoyéticas”, de las que derivan todas las células de la sangre (los glóbulos rojos, las plaquetas y los diferentes subtipos de glóbulos blancos), junto a otros tipos celulares, como las “células madre mesenquimales”, de donde pueden derivar, además, otros tejidos (Jiang *et al.*, 2002). También existen células madre adultas en tejidos con alta capacidad de crecimiento o regeneración como el cordón umbilical, el epitelio intestinal y la piel. En contraste con las creencias previas, en fecha reciente se descubrió una pequeña dotación de células madre en el sistema

nervioso adulto que curiosamente cuando están en reposo tienen la apariencia de células gliales (células que sirven para mantener tróficamente a las neuronas). En el cerebro humano adulto existen al menos dos zonas germinales (el área subventricular cercana a los ventrículos laterales y el giro dentado del hipocampo) donde se generan nuevas neuronas de manera continua (Álvarez-Buylla *et al.*, 2001). Dentro del sistema nervioso periférico adulto se describió recientemente la existencia de un nicho germinal en el cuerpo carotídeo, estructura que permite adaptarnos a condiciones de falta de oxígeno (Pardal *et al.*, 2007). La idea más aceptada en la actualidad, aunque todavía con base científica débil, es que es posible que en todos los órganos de nuestro cuerpo existan células madre o progenitoras responsables de la capacidad de regeneración (mayor o menor) de los mismos. Las células madre aisladas de tejidos adultos son multipotentes (pueden formar más de un tipo celular por lo general del mismo tejido), pero por el momento se desconoce su verdadera pluripotencialidad, es decir, su capacidad para formar células de tejidos diferentes. Las células madre mesenquimales ya mencionadas son objeto de estudio de forma especialmente intensa porque en determinadas condiciones experimentales pueden convertirse en células de otros tejidos (como neuronas o músculo cardíaco). La verdadera potencialidad terapéutica de estas células está, por ahora, sometida a debate.

Fuera de los ambientes científicos se suscitan disputas sobre las “bondades” o “maldades” de las células madre embrionarias y las adultas que no tienen fundamento real. Las investigaciones con ambos tipos celulares son complementarias y necesarias por igual para obtener conocimiento científico básico transferible a aplicaciones terapéuticas y biotecnológicas. Las células madre embrionarias están bien identificadas y se conoce con claridad su función, aunque todavía se sabe muy poco sobre los mecanismos que regulan su diferenciación a otras células. En consecuencia, estas células son por el momento menos controlables y su potencial aplicación terapéutica directa está aún lejana. En cambio, las células madre adultas son escasas y difíciles de aislar, tienen una localización menos definida y, en la mayoría de los casos, se desconoce su verdadera función biológica. Sin embargo, estas células tienen un proceso de diferenciación más controlable y son las que se utilizan ahora en el tratamiento de enfermedades en el hombre.

## APLICABILIDAD MÉDICA DE LAS CÉLULAS MADRE. LA TERAPIA CELULAR

Hay numerosas enfermedades que cursan con la muerte de células específicas producida por causas genéticas, degenerativas o traumáticas. Por ejemplo, casi todos los síntomas de la enfermedad de Parkinson se deben a la muerte de neuronas localizadas en una zona del cerebro denominada sustancia negra y a la falta del producto (la dopamina) que ellas producen. De igual manera, algunos tipos de diabetes se deben a la ausencia de células pancreáticas productoras de insulina. En los infartos cerebrales o del miocardio, la muerte celular correspondiente se produce por falta de riego sanguíneo a regiones específicas del cerebro o el corazón y en las lesiones medulares la destrucción tisular es consecuencia de un traumatismo. Uno de los objetivos más ambiciosos de la medicina moderna es curar estas enfermedades por medio de la terapia celular, haciendo que nuevas células (administradas desde el exterior o producidas dentro del cuerpo) sustituyan a las destruidas, bien porque ejecuten sus funciones o porque liberen productos que ayuden a la regeneración parcial o total de las células lesionadas. Aunque la terapia celular se ha ensayado con éxito en patologías hematológicas, de la piel e incluso en enfermedades neurológicas, empleando diversos tipos celulares, su uso clínico está todavía restringido a unos pocos estudios piloto. Para la mayoría de los enfermos potencialmente beneficiarios de la terapia celular, ésta es sólo una opción que podría materializarse en el futuro, pero que en este momento ha de considerarse como en estadio de investigación preclínica.

## POTENCIAL CLÍNICO DE LAS CÉLULAS MADRE EMBRIONARIAS. LA REPROGRAMACIÓN NUCLEAR

Una de las limitaciones más importantes de la terapia celular es la disponibilidad de células que ejecuten las funciones deseadas y que puedan administrarse a los enfermos con niveles de seguridad aceptables. Por su potencialidad para producir cualquier tipo de tejidos, las células madre embrionarias proporcionan, en principio, una fuente inagotable de material para uso en trasplantes celulares terapéuticos. La existencia de células madre embrionarias se conoce desde los inicios de la embriología moderna, hace más

de 100 años; no obstante, el interés científico reciente por ellas se debe, sobre todo, a su posible aplicabilidad en terapia celular. Por ello la diferenciación de células madre embrionarias a células adultas es una de las líneas de vanguardia de la investigación actual. En algunos modelos animales de enfermedades neurológicas, cardíacas o metabólicas el implante de células madre embrionarias ha producido mejorías muy apreciables en la sintomatología.

Junto a los avances prometedores ocurridos en la investigación con células madre embrionarias, en los ambientes científicos más serios predomina una actitud cauta, e incluso escéptica, sobre la aplicabilidad directa de las mismas en terapia celular humana. Es indiscutible que los éxitos de la medicina actual derivan de la labor realizada previamente en laboratorios de investigación. Sin embargo, son los científicos quienes saben mejor que nadie que la traslación de los resultados científicos a la práctica médica es un camino pavimentado de fracasos y decepciones. El agudo ensayo de Chien (2004) titulado *Lost in translation* es uno de los múltiples avisos en respuesta a la euforia prematura sobre el efecto curativo de la terapia con células madre. No cabe duda de que la mejor receta para una traslación con posibilidades de éxito es la investigación de calidad. Se conoce todavía muy poco sobre los mecanismos moleculares que determinan la diferenciación temprana de las células madre embrionarias y su estabilidad a medio y largo plazos. No se puede descartar, por el momento, que las células madre embrionarias supuestamente diferenciadas *in vitro* puedan iniciar un proceso de proliferación una vez implantadas y produzcan procesos tumorales.

El uso clínico rutinario de las células madre embrionarias requerirá la modificación de algunos caracteres genéticos de las mismas para evitar el rechazo inmunológico, o bien, la obtención de células madre embrionarias que tengan las mismas características genéticas que las del paciente a quien se pretende tratar. Hasta hace poco, la única forma de obtener células madre embrionarias similares en el aspecto genético a las de un adulto era la reprogramación nuclear utilizando óvulos humanos *in vitro*. Este procedimiento, también llamado *clonación terapéutica*, consiste en la preparación de óvulos a los que, tras extraer su propio núcleo, se transfiere el núcleo de una célula somática (por ejemplo, un fibroblasto o una célula de la piel) que contenga los genes del donante. Por mecanismos no bien conocidos, el citoplasma de óvulo "reprograma" el material genético procedente de la célula adulta, lo que da lugar a un "cigoto" que en poco días se convierte en blastocisto de donde, como se indicó, pueden obtenerse células madre embrionarias. Este método de reprogramación nuclear, que fue el usado para obtener la oveja Dolly, también parece funcionar en el hombre, aunque con muy baja eficiencia (Hwang *et al.*, 2005). De manera independiente de los aspectos éticos asociados al uso de embriones humanos, la clonación terapéutica tiene numerosas limitaciones metodológicas que no están esclarecidas. Por ello, en diferentes laboratorios se están ensayando formas alternativas de reprogramación nuclear que no requieran el uso de óvulos humanos. Dentro de estas técnicas destaca la creación de *células madre pluripotentes inducidas*, consistente en el tratamiento de células adultas con factores reprogramadores, proteínas responsables de mantener la pluripotencialidad de las células madre embrionarias (Takahashi y Yamanaka, 2006). Las células madre inducidas de ratón, como las células madre verdaderas, se diferencian de las células de todos los tejidos adultos. Por consiguiente, es probable que en poco tiempo se obtengan células madre pluripotentes inducidas humanas, lo que sin duda representará un avance extraordinario en el camino hacia su uso terapéutico.

Aunque la investigación con células madre embrionarias y los avances en la reprogramación nuclear son de importancia científica primordial, la aplicabilidad médica de estos tipos celulares se contempla como lejana. En terapia celular humana la seguridad es prioritaria con respecto a la eficacia clínica. Como se señaló antes, las células madre embrionarias (o sus equivalentes generadas por reprogramación nuclear) son poco estables y se desconoce si una vez trasplantadas mantendrán el fenotipo necesario para realizar la función deseada. Por otra parte, la terapia basada en la administración de células madre embrionarias exógenas diferenciadas *in vitro* parece, en principio, indicada sólo en enfermedades con lesiones muy localizadas (por ejemplo, la enfermedad de Parkinson o la diabetes). Por el momento resulta difícil imaginar cómo los implantes neuronales podrán suplir las deficiencias en enfermos como los de Alzheimer, con lesiones cerebrales muy amplias, en quienes, además de reemplazar las células degeneradas, es necesario restablecer la delicada red de conexiones interneuronales de las que depende el control motor o la memoria.

### APLICACIONES BIOTECNOLÓGICAS DE LAS CÉLULAS MADRE EMBRIONARIAS

La terapia celular fundamentada en las células madre embrionarias no es la panacea de la medicina del siglo XXI y es obvio que las expectativas generadas en algunos casos no corresponden al conocimiento científico disponible. No obstante, hay razones fundadas para que la investigación con células madre embrionarias tenga un carácter prioritario en el sistema de investigación de los países desarrollados. El análisis de la diferenciación temprana de las células madre embrionarias está aportando un conocimiento científico básico que, sea cual sea su utilidad en terapia celular, sirve (y servirá mucho más en el futuro) para conocer mejor procesos patológicos como el envejecimiento o el cáncer. Además, a partir de las líneas de células madre embrionarias se pueden generar *modelos celulares de enfermedades humanas* que en la actualidad no son factibles. Esto es importante en particular en el caso de enfermedades genéticas, para las que no se dispone de tratamiento ni de material biológico acerca del cual investigar. Una aplicabilidad adicional de las células madre embrionarias, en mi opinión tal vez la más interesante, es que facilitará los estudios *in vitro* de *farmacogenética humana* una vez se disponga de grandes bancos de líneas celulares representativas de las diferentes poblaciones. Esto permitirá estudiar cómo las células responden a los fármacos según su perfil genético, lo que se prevé que haga más económica y eficiente la generación de nuevos medicamentos.

### APLICACIONES MÉDICAS DE LAS CÉLULAS MADRE ADULTAS (SOMÁTICAS O ESPECÍFICA DE TEJIDOS)

En paralelo a los avances en la investigación básica con células madre embrionarias, el interés por la posible aplicabilidad clínica de las células madre adultas ha incrementado de manera considerable en los últimos años. En el contexto de la terapia celular, las células madre adultas podrían tener algunas ventajas sobre las embrionarias por su mayor estabilidad y, al menos hasta que se desarrolle la clonación terapéutica o la generación de células madre inducidas humanas, porque hacen factible la realización de auto-

trasplantes, lo que evita numerosos problemas técnicos, entre los que destaca el rechazo inmunario. La existencia de células madre hematopoyéticas en la sangre es lo que ha permitido realizar, desde hace décadas, los trasplantes de médula ósea a los pacientes con leucemia o aplasia medular. De igual forma, la identificación y multiplicación de las células madre de la piel o la córnea han permitido realizar trasplantes de estos tejidos desde hace años.

En la actualidad se investiga sobre la capacidad de células madre del cerebro para producir *in vitro* diferentes tipos de neuronas adultas, o de las células progenitoras en otras localizaciones para diferenciarse en tejido conectivo, óseo o pancreático. Sin embargo, el conocimiento sobre estos tipos celulares es muy fragmentario. Por ejemplo, aunque en el intestino humano disponemos de una población particularmente activa de células madre, de las que derivan a diario decenas de millones de células epiteliales nuevas, todavía no sabemos cómo aislarlas y mantenerlas en cultivo de forma estable. Como se comentó, un tipo celular que ha recibido atención especial por su potencial terapéutico son las células madre mesenquimales de la médula ósea. Estas células parecen tener una pluripotencialidad muy acusada; son capaces de diferenciarse *in vitro* a células de la sangre y a neuronas, células musculares cardíacas o tejido hepático. También se ha descrito que las células mesenquimales pueden producir otros linajes celulares *in vivo*. En mujeres leucémicas que han sido tratadas con trasplante de médula ósea de un varón (cuyas células contienen el cromosoma Y) y que al fallecer fueron sometidas a autopsia, se encontraron células de diferentes órganos (corazón, hígado o incluso cerebro) que contenían el cromosoma Y. Algunos autores interpretan este hecho como confirmatorio de la *transdiferenciación* (generación de células de un tejido a partir de células madre de otro tejido diferente) de células madre mesenquimales del varón donante en células diferenciadas en los órganos de la mujer receptora (Orlic *et al.*, 2001). Sin embargo, otros investigadores explican estas observaciones simplemente por la *fusión de las células trasplantadas* con las células del receptor (Álvarez-Dolado *et al.*, 2003). En paralelo a estas investigaciones se han realizado estudios piloto en varios países con el objetivo de estimular la regeneración del tejido cardíaco con células madre mesenquimales en pacientes que han sufrido infarto de miocardio. El mecanismo de acción



de estos trasplantes se desconoce y, si bien los resultados, aunque discretos, han sido alentadores en algunos casos, en otros han producido efectos indeseables importantes.

Entre las líneas de investigación sobre medicina regenerativa más activas destaca el uso de células madre del sistema nervioso adulto para producir neuronas o células gliales que sintetizan factores neurotróficos. Éstos podrían usarse para proteger a las neuronas lesionadas o estimular la regeneración de fibras nerviosas dañadas. Dentro de las enfermedades que podrían tratarse con este tipo de tecnologías están las lesiones medulares o la esclerosis múltiple. Por último, la existencia de células madre en el cerebro adulto, en especial en zonas como el hipocampo relacionadas con la memoria témporo-espacial, permite especular con la posibilidad de activación de las células madre adultas, de forma que den lugar no sólo a nuevas células sino al restablecimiento de los circuitos neuronales defectuosos.

En conclusión, la investigación con células madre embrionarias y somáticas o adultas ofrece posibilidades muy atractivas por su aplicabilidad a diferentes campos y, por tanto, debe ser apoyada de forma decidida y sin reservas. Sin embargo, el desarrollo de la medicina regenerativa no podrá ocurrir fuera de un sistema de investigación biomédica de calidad que lo permita. En mi experiencia, los programas de terapia celular creíbles necesitan de la cooperación estrecha entre la mejor investigación básica y servicios clínicos de excelencia. El apoyo a instituciones capaces de ofertar estos medios es, sin duda, la forma adecuada de potenciar la medicina regenerativa en los países avanzados.

### ASPECTOS ÉTICOS E IMPACTO SOCIAL DE LA INVESTIGACIÓN CON CÉLULAS MADRE. LA RESPONSABILIDAD DEL CIENTÍFICO

La investigación con células madre embrionarias, como otras facetas de la ciencia o la técnica actuales, tiene aspectos éticos no desdeñables. Además, el debate sobre el uso científico y terapéutico de células madre embrionarias está teñido de connotaciones religiosas para unos, imprescindibles y, para otros, indeseables. A pesar de que, en palabras del Papa Juan Pablo II, “la fe nunca debe entrar en conflicto con la razón”, la realidad es que el principio del derecho a la vida, incluso en la fase embrionaria inicial, defendido a ultranza por la religión católica, choca

con otro anhelo fundamental del ser humano, como es la lucha contra el sufrimiento y la enfermedad. Parece que, al igual que sucediera en el pasado con Galileo o Darwin, la investigación con células madre ha reavivado la tensión entre la fe y la ciencia. No obstante, es importante destacar que, en lo concerniente al debate teológico sobre el origen de la vida humana, *las posiciones de las diferentes religiones son variables*. Para la mayoría de los judíos o los musulmanes, el embrión sólo alcanza la naturaleza humana varias semanas tras la fecundación, una vez que adopta una forma parecida a la del hombre. De hecho, dos países muy ortodoxos en el aspecto religioso como Israel e Irán han aceptado la investigación con embriones humanos. Como los católicos, algunas sectas hindúes sitúan en la concepción el origen de la vida, en tanto que los budistas consideran la clonación terapéutica como una saludable “reencarnación de la vida”, en armonía con sus creencias más genuinas. En los foros donde se discute sobre bioética, las diferentes posiciones, muy influenciadas por las creencias religiosas, varían entre los que niegan en forma rotunda cualquier manipulación del embrión humano y los fervientes defensores de la clonación terapéutica. Después de años de debate, la Organización de las Naciones Unidas elaboró hace unos pocos años una declaración de “compromiso”, no vinculante que, para satisfacer a todos, instaba a los estados miembros a que en sus respectivas legislaciones sobre el uso de embriones y la clonación terapéutica se respete la “dignidad humana”. Sin embargo, prevalece un acuerdo unánime en el rechazo a la clonación reproductiva en el hombre, es decir, al uso de la reprogramación nuclear para producir individuos semejantes al donante. Con independencia de los aspectos éticos y de la ausencia de indicaciones médicas que la aconseje, la clonación reproductiva tiene limitaciones técnicas e incertidumbres tal vez insuperables. Los mamíferos obtenidos hasta la fecha por reprogramación nuclear desarrollan numerosas patologías y envejecimiento precoz.

Desde la perspectiva de un científico sorprende el intenso debate social, e incluso el enfrentamiento entre grupos, que el uso médico de las células madre embrionarias genera, sobre todo en países como España, donde desde hace décadas una legislación permite la fertilización *in vitro* y el aborto terapéutico de forma rutinaria de fetos completamente desarrollados con más de 20 semanas de gestación. Creo también importante llamar la atención sobre el papel desmitificador de la ciencia y la forma en que ésta convierte en obsoletas algunas disputas políticas o ideológicas. Esto podría ocurrir, al menos en parte, con el debate sobre la clonación terapéutica humana, que pasará a adquirir prioridad científica secundaria si las técnicas de obtención de células madre pluripotentes inducidas, referidas en los apartados anteriores, se ponen a punto en el hombre.

Los comentarios relativos a la “socialización” del debate sobre la investigación con células madre embrionarias obligan a la reflexión, aunque sea preliminar, sobre el papel de la Ciencia y la *responsabilidad de los científicos*, en particular importante en sociedades con poca tradición científica e incorporadas de manera tardía al desarrollo económico y tecnológico. La ciencia es una herramienta cultural del hombre que ha permitido su evolución hasta los niveles hoy conocidos. El avance científico se basa en la libertad y la creatividad, por lo que, en general, los investigadores (aunque con ideologías dispares) suelen adoptar posiciones de vanguardia en la sociedad. Conviene recordar que el objetivo último de la ciencia es el hombre, que la hace posible, y que los usos de la ciencia los regulan las sociedades y no los científicos. En esta relación biunívoca ciencia-sociedad, ¿cuál es el papel del científico? En mi opinión, el científico debe comprometerse

no sólo con la divulgación de la ciencia, para facilitar que la sociedad la comprenda y acepte sus aplicaciones, sino que también debe involucrarse en el uso correcto de la misma en beneficio de todos. En el campo de la biomedicina es importante en especial que los científicos seamos capaces de facilitar a nuestros conciudadanos la comprensión de los avances científicos sin crear falsas expectativas. En estos menesteres es absolutamente necesario mantener un código ético basado en el uso exclusivo del lenguaje y normas de la ciencia, contrarias a la demagogia o exageración y que emanan del trabajo en el laboratorio sometido al juicio crítico de los colegas. La divulgación científica debe tener como objetivo fundamental la labor educativa, orientada a conformar una sociedad más culta e informada y, por tanto, más libre. Una situación anómala, que incluso calificaría de patológica, se presenta con especial virulencia en España y otros países occidentales, donde, junto al disfrute de los medios de comunicación más potentes y eficaces nunca conocidos, convive la desinformación más injusta y cruel. En este caldo de cultivo, en el que se combina sin juicio crítico lo científico y lo fantástico, lo material y lo espiritual, la realidad y la ficción, crecen las reacciones oscurantistas acientíficas, manipulables con facilidad y propias de la posmodernidad. La actividad científica es un ejercicio de libertad individual y colectivo; el científico debe ser el agente que facilite la incorporación de la sociedad de forma responsable y con el mayor consenso posible a esta aventura maravillosa de la humanidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez-Buylla, A., J. M. Garcia-Verdugo y A. D. Tramontin. 2001. "A unified hypothesis on the lineage of neural stem cells", en *Nature Review Neuroscience*, 2, pp. 287-293.

Alvarez-Dolado, M., R. Pardal, J. M. Garcia-Verdugo y cols. 2003. "Fusion of bone marrow-derived cells with Purkinje neurons, cardiomyocytes and hepatocytes", en *Nature*, 425, pp. 968-973.

Chien, K. R. 2004. "Lost in translation", en *Nature*, 428, pp. 607-608.

Chiu, A. Y. y Rao, M. S. 2003. *Human embryonic stem cells*, Totowa, NJ, Humana Press.

Hwang, W. J., Y. J. Ryu, J. H. Park y cols. 2004. "Evidence of a pluripotent human embryonic stem cell line derived from a cloned blastocyst", en *Science*, 303, pp. 1669-1674.

Jiang, Y., B. N. Jahagirdar, R. L. Reinhardt y cols. 2002. "Pluripotency of mesenchymal stem cells derived from adult marrow", en *Nature*, 418, pp. 41-92.

Orlic, D., J. Kajsture, S. Climenti y cols. 2001. "Bone marrow cells regenerate infarcted myocardium", en *Nature*, 410, pp. 701-705.

Pardal, R., P. Ortega-Sáinz, R. Durán y J. López-Barneo. 2007. "Glia-like stem cells sustain physiologic neurogenesis in the carotid body", en *Cell*, 130, pp. xx-xx.

Takahashi, K. y S. Yamanaka. 2006. "Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors", en *Cell*, 126, pp. 663-676.

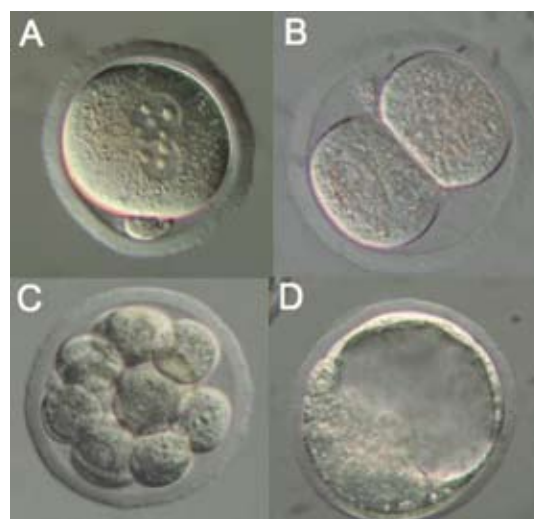
Thompson, J. A., J. Itskovitz-Eldor, S. S. Shapiro y cols. 1998. "Embryonic stem cell lines derived from human blastocysts", en *Science*, 282, pp. 1145-1147.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al doctor C. Óscar Pintado por la donación de las fotografías que aparecen en la figura 1. El presente texto está basado en parte en el artículo publicado por el autor en *Revista de Libros*, vol. 101, mayo de 2005, pp. 20-23.

FIGURA 1.

EMBRIÓN DE RATÓN EN CUATRO ETAPAS DISTINTAS. A. EMBRIÓN RECIÉN FORMADO TRAS LA FECUNDACIÓN DE UN ÓVULO POR UN ESPERMATOZOIDE. SE PUEDE APRECIAR EN EL CIGOTO LOS PRONÚCLEOS FEMENINO Y MASCULINO. B. EMBRIÓN DE UN DÍA CON DOS CÉLULAS. C. EMBRIÓN DE DOS DÍAS EN FASE DE MÓRULA. D. EMBRIÓN DE TRES DÍAS EN FASE DE BLASTOCISTO. EL ACÚMULO DE TEJIDO EN LA PARTE INFERIOR IZQUIERDA DE LA ESFERA ES LA MASA CELULAR





# LA FUGA DE CEREBROS. EL CASO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN ECONOMÍA

JAVIER RUIZ CASTILLO

Catedrático de Teoría Económica, Universidad Carlos III de Madrid

**A** LO LARGO DEL SIGLO XX Y, SOBRE TODO, DESDE LA II GUERRA MUNDIAL, Estados Unidos de América ha constituido un polo de atracción indudable para científicos del mundo entero. Legiones de europeos, sudamericanos y centroamericanos y, en fechas más recientes, asiáticos, han acudido a ese país a realizar un doctorado o una estancia posdoctoral. En muchos casos, algunos de los mejores han optado por desarrollar el grueso de su carrera académica en los centros de excelencia estadounidenses, lo que ha dado lugar al fenómeno de la “fuga de cerebros” (*brain drain*) del que nos ocuparemos con brevedad en este artículo.

**J**AVIER RUIZ CASTILLO NACIÓ EN 1944. LICENCIADO EN CIENCIAS ECONÓMICAS, Universidad Complutense de Madrid, 1967, y Ph. D. en Economía, Northwestern University, 1978. Profesor visitante en varias universidades norteamericanas. Desde 1990 es catedrático de Teoría Económica en la Universidad Carlos III de Madrid. Director general del Instituto Nacional de Estadística, 1986-1989. Consultor de distintos organismos internacionales. Ha publicado de manera extensa sobre temas teóricos y aplicados relativos a la economía del bienestar, la medición de la desigualdad de la segregación y de la desigualdad de oportunidades, la política de vivienda y el análisis de los presupuestos familiares. Sus trabajos han aparecido en revistas como *Journal of Business and Economic Statistics*, *Journal of Economic Theory*, *Journal of Political Economy*, *Social Choice and Welfare*, *Journal of Population Economics* y *The Journal of Economic Inequality*.

# LA FUGA DE CEREBROS. EL CASO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN ECONOMÍA

JAVIER RUIZ CASTILLO

Catedrático de Teoría Económica, Universidad Carlos III de Madrid

**I**GNORO A QUIÉN SE DEBE ESTA ELOCUENTE DENOMINACIÓN y cuándo surgió por primera vez, pero recuerdo vivamente que, hace 40 o 45 años, la imagen de cerebros que huían o escapaban hacia Estados Unidos de América, con seguridad por buenas razones, era una imagen conocida entre los jóvenes españoles de la época, llegados a la universidad en torno a 1960. Algunos años después, durante la década de 1970, tuve la suerte de recalar en el Departamento de Economía de Northwestern University, en Evanston, el primer suburbio al norte de Chicago, en el estado de Illinois. En algo más de un lustro, cuatro españoles terminamos allí un doctorado en esa disciplina. Pero al menos 12 españoles más terminaron el suyo por esas fechas en MIT, la Universidad de Wisconsin y, sobre todo, la Universidad de Minnesota. Junto a algunos pioneros anteriores, este grupo constituye la primera andanada de cierto peso de un fenómeno que habría de multiplicarse desde entonces: en 30 años Estados Unidos de América ha producido, con facilidad, un centenar de doctores españoles en economía.

Como en otras ciencias, algunos de los mejores permanecieron décadas “fugados” en Estados Unidos de América; otros, trabajan hoy allí alimentando el *brain drain*. Sin embargo, la mayoría, entre los que me cuento, unió fuerzas a la vuelta con otros españoles que se doctoraron en el Reino Unido y algún otro país europeo, incluida España. Entre todos, vencimos los obstáculos y la inercia existentes, y las tesis según las cuales

“la teoría económica es un lujo para España” y “desde España es imposible publicar en el extranjero”. Así, a finales del siglo XX España se sitúa en el quinto o el sexto lugar de Europa en cuanto a volumen de publicaciones académicas en economía, mientras que, si se considera la calidad de las revistas en las que aparecen esas contribuciones y otros factores de ajuste, España pasa a ocupar la cuarta posición en Europa (tras el Reino Unido, Holanda y Francia) y la séptima mundial. Cuatro departamentos universitarios –en la Universidad Pompeu Fabra, la Autónoma de Barcelona, la de Alicante y la Carlos III de Madrid– y dos centros de investigación –el Instituto de Análisis Económico, en el campus de Bellaterra en Barcelona, y el Centro de Estudios Monetarios y Financieros de Madrid– figuran por lo regular en los *rankings* internacionales.<sup>1</sup>

España no es el único país europeo cuya producción científica en economía haya crecido en fechas recientes por encima de la media mundial. Como veremos de inmediato, Holanda ha cosechado éxitos similares, mientras que el Reino Unido mantiene su posición dominante. Dado que la construcción de indicadores basados en la publicación de artículos especializados es una tarea plagada de dificultades, es preciso reconocer que no existe un sistema de evaluación plenamente satisfactorio para todos los fines concebibles. Sin embargo, el trabajo de Kalaitzidakis *et al.* (2003), por ejemplo, reúne buenas propiedades. Utiliza un algoritmo para determinar la importancia relativa de las distintas revistas en función del prestigio de las revistas donde figuran las citas que recibe, que se determina de manera endógena en el mismo ejercicio. Elimina las autocitas, es decir, las citas que una revista recibe de artículos de esa misma revista, y realiza otros ajustes tomando en cuenta el tamaño de las páginas de cada revista, el número de autores de cada artículo y sus posibles afiliaciones múltiples. La ordenación de los centros de investigación a escala europea y mundial se hace finalmente en función de las publicaciones en las mejores 30 revistas, que acumulan 83.4% del total de citas que se realizan en 159 revistas del SSCI (*Social Sciences Citation Index*) del ISI (*Institute for Scientific Information*) durante 1998 sobre los artículos publicados en 1994-1998. Pues bien, en el

<sup>1</sup> Para una exposición de esta historia, consúltese Villar (2003) y Ruiz-Castillo (2006). Para una revisión crítica (y punzante) de la situación europea en relación con Estados Unidos de América, véase Drèze y Estevan (2007).

CUADRO 1.

DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL POR PAÍSES DE LOS 75 DEPARTAMENTOS MÁS PRODUCTIVOS EN EUROPA Y EL NÚMERO DE PÁGINAS AJUSTADAS POR TODOS LOS CONCEPTOS DURANTE 1995-99

	75 departamentos en %	Páginas ajustadas en %
1. Reino Unido	26.6	33.3
2. Holanda	9.3	13.8
3. Francia	12.0	11.0
4. España	5.3	9.3
5. Alemania	9.3	5.4
6. Italia	8.0	4.6
7. Suecia	5.3	5.1
8. Bélgica	2.7	4.2
9. Suiza	5.3	2.8
10. Dinamarca	2.7	2.5
11. Noruega	4.0	2.3
12. Otros países*	9.5	8.2
TOTAL	100.0	100.0

Fuente: Kalaitzidakis et al. (2003, Table 4)

\* Austria, Chipre, Finlandia, Grecia, Irlanda, Portugal y Turquía, cada uno de los cuales contribuye con un departamento a los 75 más productivos de Europa.

cuadro 1 se muestra la contribución de los 75 departamentos universitarios más productivos de Europa durante el periodo 1995-99, de acuerdo con esa metodología, agrupados por los países a los que pertenecen.

Los 19 departamentos del Reino Unido, que representan algo más de 25% de los primeros 75, son responsables de un tercio de la producción total. Holanda, un país pequeño, aporta cerca de 10% de los Departamentos y 14% de las páginas ajustadas. España (junto con Bélgica) destaca también por su elevada productividad en la investigación de calidad: con algo más de 5% de los Departamentos aporta más de 9% del *output* total. Francia, Suecia y Dinamarca producen algo menos de lo que sería de esperar por su contribu-

ción porcentual a los 75 mejores Departamentos, mientras que Alemania, Italia, Suiza y Noruega presentan productividades mucho más bajas.

Ahora bien, ¿cual es la situación relativa de Europa y, en particular, cómo ha evolucionado la brecha que separa Estados Unidos de América del resto de las demás regiones del mundo? En el cuadro 2 se presenta la información pertinente, de acuerdo con la metodología de Kalaitzidakis et al. (2003).

CUADRO 2.

LA BRECHA ENTRE ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA Y EL RESTO DEL MUNDO DENTRO DE LOS DEPARTAMENTOS DE ECONOMÍA MÁS PRODUCTIVOS DURANTE 1995-99

	Núm. de deptos. %		Núm de deptos. %		Núm. de deptos. %	
EUA	97	48.5	53	53.0	35	70.0
Europa	62	31.0	31	31.0	7	14.0
Resto del mundo	41	20.5	16	16.0	8	16.0
TOTAL	200	100.0	100	100.0	50	100.0

Distribución porcentual en grandes áreas del número de páginas ajustadas publicadas en las mejores 30 revistas de economía durante 1995-99.

EUA	65.0
Unión Europea-15	21.2
Resto del mundo	13.8
TOTAL	100.0

Fuente: Kalaitzidakis et al. (2003).

CUADRO 3.

UNA ESTIMACIÓN DE LA “FUGA DE CEREBROS” EN LOS MEJORES 20 DEPARTAMENTOS DE ECONOMÍA DE ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA, DONDE LA NACIONALIDAD SE IDENTIFICA CON EL LUGAR EN EL QUE SE HAYA OBTENIDO EL PRIMER TÍTULO UNIVERSITARIO

EUA	468	54.2
CANADÁ	37	4.3
EUROPA	199	23.1
- Italia	36	4.2
- Alemania	33	3.8
- Reino Unido	32	3.7
- Francia	23	2.7
- Turquía	14	1.6
- España	8	0.9
- Otros	66	6.2
AMÉRICA CENTRAL Y AMÉRICA DEL SUR	34	3.9
- México	6	0.7
- Otros	28	3.2
ÁFRICA, ASIA Y OCEANÍA	100	11.6
NO SABE	25	2.9
TOTAL	863	100.0

Fuente: estimación propia.

La proporción representada por Estados Unidos de América en los 200 departamentos de economía más productivos del mundo es algo menor a 50%; sin embargo, a medida que descendemos hacia los mejores 50, la posición dominante de Estados Unidos de América se refuerza hasta alcanzar 70%. De hecho, sólo una universidad no estadounidense –la *London School of Economics*– figura de manera consistente entre las 20 primeras del mundo. Por otra parte, del total del número de páginas publicadas por los mejores 200 centros del mundo, cerca de dos tercios se atribuyen a ese país. Hay que concluir que la brecha entre Estados Unidos de América y el resto del mundo es sustancial.

Como sostienen Drèze y Estevan (2007, p. 286), “Da qué pensar que la investigación en economía a escala mundial se desarrolle bajo el liderazgo de sólo unos pocos centenares de profesores de universidad educados y empleados por un puñado de departamentos de Estados Unidos”. Sin embargo, no todos los investigadores que pertenecen a esos centros de excelencia

mundial son estadounidenses. Debemos preguntarnos cuántos de ellos son producto de la fuga de cerebros desde otras partes del mundo. Para ello, nos concentramos en los primeros 20 departamentos de Estados Unidos de América e investigamos a través de Internet en qué país obtuvieron sus miembros su primer título universitario.<sup>2</sup> Los resultados se ofrecen en el cuadro 3.

Sólo 54.2% de los 863 investigadores de las mejores instituciones de Estados Unidos de América cursaron su primer título universitario en ese país. Algo más de la mitad de los restantes cuyo origen hemos podido recuperar, o 23.1%, llegaron a Estados Unidos de América desde Europa, en tanto que 20% restante procede de Canadá, Centro y Sudamérica, África, Asia y Oceanía.

¿Cómo explicar ese importante porcentaje de extranjeros en los mejores centros estadounidenses? A diferencia de las ciencias naturales, la economía no es una disciplina que requiera grandes instalaciones. Por lo tanto, las diferencias en esta dimensión no constituyen un factor explicativo. Sin embargo, cualquier investigador con aspiraciones valorará la oportunidad de compartir el lugar de trabajo con los mejores especialistas mundiales de su campo y de las áreas afines. La propia heterogeneidad cultural que revela la información del cuadro 3 constituye con seguridad un activo para los investigadores que la alimentan. La cantidad, calidad y variedad del capital humano acumulado en esos centros, en relación con el existente en los países de origen, debe ser una variable explicativa importante.

<sup>2</sup> El trabajo fue realizado por Manuel Mertel, a quien agradezco vivamente su colaboración.

Es posible que haya también diferencias salariales de peso. Por ejemplo, en el caso español, donde casi todos los centros son públicos, los salarios funcionariales de los profesores numerarios oscilan entre 34000 y 73000 euros anuales, y el salario máximo que puede obtener un profesor en la cúspide de su carrera puede llegar a 90000 euros al año. Frente a estas cifras, contamos con información sobre los salarios en dólares percibidos por los catedráticos (*full professors*) por nueve meses en 2006-07 en los mejores 17 departamentos de economía de universidades públicas de Estados Unidos de América. La media y la mediana son de 164000 y 161000 dólares, y el rango de variación va desde 79000 hasta 310000 dólares. Si tomamos en cuenta tanto las oportunidades que ofrece el sistema para completar el sueldo anual, como el tipo de cambio entre el dólar y el euro, tomar las cifras anteriores como denominadas en euros proporciona una aproximación razonable al salario anual en los centros públicos en cuestión. Los salarios percibidos en universidades privadas, donde nos consta que el rango de variación puede llegar hasta los 500000 dólares, deben ser algo superiores. Aunque habría que evaluar los salarios en términos reales, una vez tomados en cuenta los rasgos distintivos de los sistemas de pensiones y seguro de enfermedad, no cabe duda de que el diferencial salarial debe jugar un papel importante en las decisiones de los investigadores extranjeros que prefieren residir en Estados Unidos de América.

Por último, merece la pena recordar que el sistema de ciencia e investigación de Estados Unidos de América está a la cabeza del mundo en el cultivo de la excelencia. La contratación, la promoción y el sistema de incentivos del profesorado se rigen por criterios meritocráticos que desempeñan un papel mucho más limitado en otros países, donde los departamentos de economía están organizados en mercados relativamente cerrados al exterior y donde los incentivos guardan escasa relación con la investigación de calidad difundida a través de revistas académicas editadas en inglés (véase, por ejemplo, Portes, 1987, y Frey y Eichenberger, 1993). Los investigadores intelectualmente ambiciosos de cualquier edad y, sobre todo, los más jóvenes, suelen valorar estos aspectos.

No obstante, en otros países de tradición anglosajona los sistemas de incentivos están más cerca de los de Estados Unidos de América que de lo que encontramos, por ejemplo, en la mayor parte de América Central, América del Sur, Alemania y la Europa del sur. Nos referimos a Canadá, el Reino Unido y los propios centros de excelencia españoles mencionados antes, que se caracterizan por haber abandonado la endogamia e importado ciertos modos de organización de los centros de Estados Unidos de América donde, como se ha dicho, muchos realizamos el doctorado. A este respecto, sería interesante contrastar con rigor si la cantidad de canadienses, británicos o españoles en las mejores universidades estadounidenses es en efecto menor, *ceteris paribus*, que la de italianos, alemanes o franceses donde –como destacan con fuerza Drèze y Estevan (2007)– el antiguo régimen juega un papel dominante.

Esto nos lleva a la necesidad de construir bancos de datos microeconómicos si deseamos dilucidar las causas de la fuga de cerebros con los estándares de rigor habituales. Bancos de datos que deben incluir otros centros de excelencia no-estadounidenses para dirimir hasta qué punto el fenómeno de la fuga de cerebros es privativo de Estados Unidos de América. Esta tarea informativa debe extenderse a otras disciplinas científicas, en muchas de las cuales el dominio de Estados Unidos de América a escala mundial no será tan grande como en economía. Para empezar, sería interesante confirmar la intuición de sí, a diferencia de lo expuesto en eco-

nomía, en matemáticas y otras ciencias exactas o naturales, los investigadores asiáticos tienen un peso mayor que los europeos en los centros de excelencia estadounidenses. Los resultados que se obtengan de explotar las bases de datos mencionadas podrían ser de gran utilidad en el diseño de la política científica de los países tradicionalmente exportadores de cerebros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Drèze, J. y F. Estevan. 2007. "Research and Higher Education in Economics: Can We Deliver the Lisbon Objectives?", en *Journal of the European Economic Association*, 5, pp. 271-304.

Frey, B. y R. Eichenberger. 1993. "American and European Economics and Economists", en *Journal of Economic Perspectives*, 7, pp. 185-193.

Kalaitzidakis, P., T. Mamuneas y T. Stengos. 2003. "Rankings of Academic Journals and Institutions in Economics", en *Journal of the European Economic Association*, 1, pp. 1346-1366.

Portes, R. 1987. "Economics in Europe", en *European Economic Review*, 31, pp. 1329-40.

Ruiz-Castillo, J. 2006. "Economics Research in Spain During the 1960s: A Literature Review", Working Paper 06-36, Economic Series 09, Universidad Carlos III, aceptado para su publicación en la *Spanish Economics Review*.

Villar, A. 2003. "La evaluación de la investigación en economía", en *Revista Valenciana de Economía y Hacienda*, 8, pp. 97-133.





# HUMANIDADES EN LA ENCRUCIJADA. EL CASO DE LA LINGÜÍSTICA

VIOLETA DEMONTE

Catedrática de la Universidad Autónoma de Madrid

LA TESIS DE ESTAS PÁGINAS ES QUE LAS DISCIPLINAS HUMANÍSTICAS SE ENCUENTRAN

En este momento en una delicada encrucijada entre la tradición y la modernidad, entre el saber estable y vías nuevas no fáciles de discernir, que afecta al contenido mismo de sus estudios tanto como a los métodos de trabajo y la forma de relacionarse entre sí de las comunidades de humanistas. Para intentar caracterizar y situar de manera escueta esta encrucijada se toma como ejemplo el estudio del lenguaje y de las lenguas: la filología y la lingüística. En la primera sección se analiza con brevedad la “cultura” que impregna a las humanidades y cómo se reciben y administran en ella los giros disciplinares y la adaptación a los requisitos generales de la actividad científica. El segundo apartado trata de los estudios lingüísticos y filológicos en España y sus relaciones con América y Europa. Por último, se hace referencia a la interdisciplinariedad y a la internacionalización como elementos clave para la renovación de los estudios del lenguaje y los humanísticos.

VIOLETA DEMONTE ES LINGÜISTA Y CATEDRÁTICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE Madrid, centro en el que enseña desde 1973. Estudió en la Universidad de Buenos Aires, en Indiana University y en la Universidad Complutense de Madrid. Ha sido investigadora visitante del MIT, UCLA y USC, en Estados Unidos de América, y del Instituto Lingüístico de Utrecht, Holanda. Ha enseñado como profesora visitante en la Universidad de Minnesota, en la Universidad Carolina de Praga, en el Colegio de México, en la Universidad del Comahue, en la Universidad Católica de Valparaíso, entre otras muchas. Sus áreas de especialización son la lingüística teórica, la gramática formal y la semántica léxica de las lenguas naturales. Sus numerosas publicaciones incluyen varios libros y artículos especializados en revistas nacionales e internacionales. Colabora desde 1984 en tareas de gestión y evaluación de la investigación: en la antigua CAICYT, en las direcciones correspondientes del Gobierno Vasco y de la Generalitat de Cataluña, en ICREA, en la European Science Foundation, etcétera. Ha realizado también tareas de evaluación para el National Endowment for the Humanities, Estados Unidos de América, y para el Research Council de Canadá. Ha sido miembro

de la Comisión de Humanidades de la FECYT y representante española en el Standing Committee for the Humanities de la *European Science Foundation*. Ha formado parte del ERA-NET Expert Review Group de la Comisión Europea y en la actualidad forma parte del grupo de expertos del Directorate General of Research de la CE para analizar y extender el ERA-Green Paper. De 2004 a 2007 fue directora general de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia.

# HUMANIDADES EN LA ENCRUCIJADA. EL CASO DE LA LINGÜÍSTICA

VIOLETA DEMONTE

Catedrática de la Universidad Autónoma de Madrid

## LOS ESTUDIOS LINGÜÍSTICOS Y LA “CULTURA” DE LAS HUMANIDADES

LA INVESTIGACIÓN SOBRE LO QUE CREAN LOS SERES humanos y sólo los seres humanos: el arte y la literatura en sus diversas formas, la construcción del conocimiento científico, los materiales de los procesos históricos, la acción consciente sobre la naturaleza..., y sobre las condiciones o capacidades, también específicamente humanas, que permiten esos quehaceres: el lenguaje, el pensamiento, las emociones, las conductas sociales, la posibilidad de reflexionar sobre uno mismo, sobre el mundo y sobre los principios conforme a los cuales actuamos..., forman el contenido de las así llamadas humanidades. Los saberes humanísticos constituyen un caudal de larga tradición e historia compleja, incluso con algunos momentos de hegemonía sobre el resto de las disciplinas académicas. Como es sabido, durante siglos una aspiración de los científicos era convertir los saberes físico-matemáticos en parte central de la filosofía de la naturaleza. La actividad de un físico y un filósofo podían concebirse como dos facetas de una misma actividad: Aristóteles clasificó todos los saberes, Galileo fue “matemático y filósofo del Gran Duque de Toscana”, Newton comenzó por escribir *Quaestiones quaedam philosophicae* [Algunas cuestiones de filosofía] para llegar al fin a revolucionar nuestro conocimiento de la naturaleza y de las leyes que la rigen. Varias de las áreas más recias de la ciencia fueron en sus orígenes filosofía con elementos matemáticos, y saber gramática, retórica y dialéctica –en latín, como es natural– era una precondition para entrar en las actividades matemáticas: el *trivium* preparaba para el *quadri-*

*vium*. De la Edad Media y el Renacimiento viene esa específica acepción de humanismo y humanidades, que tiene aún seguidores, según la cual quien fuera capaz de conocer las lenguas grecolatinas y leer a los clásicos estaba en condiciones de acceder a todos los demás saberes.

Como es lógico, la situación de las humanidades no es ya la del Renacimiento, ni tan siquiera la del siglo XIX. A mi modo de ver, estas disciplinas se encuentran en este momento en una delicada encrucijada entre la tradición y la modernidad, entre el saber que ya es bagaje y las vías nuevas no fáciles de discernir ni de recorrer, que afecta tanto al contenido mismo de sus estudios como a los métodos de trabajo y la forma de relacionarse entre sí de las comunidades de humanistas. Me viene a la cabeza a este propósito un minicuento memorable de Augusto Monterroso que dice sólo lo siguiente: “Cuando despertó, el dinosaurio todavía estaba allí”. La pequeña fábula produce zozobra, no tanto por el pobre dinosaurio condenado a vivir eternamente sino por los que pudieran encontrar dinosaurios al despertarse, aunque hayan pasado a su lado varias eras geológicas.

En estas páginas tendré la osadía de intentar caracterizar y situar, en pocas pinceladas, esta encrucijada. Para hacerlo tomaré como ejemplo aquella rama de las humanidades con la que estoy más familiarizada: el estudio del lenguaje y de las lenguas. Seguir los pasos de esta disciplina me permitirá abordar cuestiones más generales; en primer lugar, trataré brevemente de la “cultura” que impregna a las humanidades y de cómo se reciben y administran en ella los giros disciplinares y la adaptación a los requisitos generales de la actividad científica. En el segundo apartado, más convencional y descriptivo, hablaré en forma breve de los estudios lingüísticos y filológicos en España y sus relaciones con América y Europa. Por último, me referiré a la interdisciplinariedad y a la internacionalización. Todo ello con la brevedad que el espacio exige.

Hace ya casi 50 años, el surgimiento de la lingüística teórica estableció, dentro de las disciplinas que se ocupan de las lenguas, un primer hito en un cambio disciplinar que marcaba la aproximación del estudio del lenguaje (de una parte de él al menos), desde el reino interpretativo de las humanidades, hasta el reino acotado, abstracto, formalizado de las ciencias experimentales y de la naturaleza; ni mejor ni peor en principio, pero sí distinto.

Dos conjuntos de hechos significativos en el aspecto científico, dos ejes complementarios de un mismo paradigma, indicaban ese cambio de ruta. El primero fue la aparición y desarrollo, a lo largo de los años 1960-1970, de la “teoría de la sintaxis generativa”, en sus sucesivos modelos. El segundo, no independiente del anterior y asentado a su vez sobre una larga tradición lógica y filosófica, fue el giro de la semántica lingüística hacia la búsqueda de los principios que establecen cómo la “composición” o interrelación de los morfemas y palabras en una estructura oracional determinan las condiciones de verdad en términos de mundos posibles. Estos dos enfoques confluyen posteriormente con el de la pragmática cognitiva (la teoría de la relevancia, por ejemplo) y dan forma a un modelo que tiene vasta ambición: explicar la naturaleza del lenguaje, formalizar los principios universales sobre los que se construyen y entienden las oraciones de las lenguas y, por último, explicar sus condiciones de uso.

Las afirmaciones centrales de este modelo, que suele llamarse “naturalista” o cognitivo-innatista, son verdades de Pero Grullo para un biólogo, si bien en nuestro caso se formulan en un vocabulario y en un marco teórico que no son, ciertamente, los de la genética o el de la biología molecular. Por otra parte, los modelos formales de los semantistas despiertan interés entre los expertos en procesamiento del lenguaje natural, aunque también es cierto, al menos por el momento, que, por la gran cantidad de variables que ponen en juego, no son articulables con facilidad en los modelos computacionales de la inteligencia artificial. Con otras palabras: las aseveraciones de la lingüística cognitivista en sentido amplio, o lingüística formal, han despertado la atención de dos de las grandes áreas por las que discurren los más rápidos desarrollos científicos en este momento. No obstante, la lingüística no es parte natural de esas disciplinas, pero sí es una disciplina que ha cambiado.

Dada la lentitud con que siempre se llevan a cabo los giros institucionales y de concepto, es fácil entender que este enfoque del estudio del lenguaje, a la vez que era mirado con atención desde focos ajenos, tuviera una difícil comprensión en el interior de las diversas tradiciones y corrientes (a veces llamadas “escuelas”) que encuadran los estudios de las “lenguas”; en el seno pues de la “cultura” de las humanidades. La razón de esa incompreensión es bastante simple: esta cultura aprecia la (re)interpretación, la intertextualidad y la acumulación de datos; la cultura de las disciplinas formales premia la eliminación de soluciones que se demuestran débiles en pro de la adecuación de la explicación y de la búsqueda de la mejor solución. Por otra parte, las humanidades son las guardianas de la historia, de los textos, de las grandes preguntas contestadas desde posiciones especulativas, de las razones de los acontecimientos sociales, de los “genios” particulares. Las ciencias de la naturaleza, con las que se alinearía en última instancia el enfoque de la lingüística antes mencionado, aspiran a encontrar leyes y dar razón de su ejecución en contextos determinados. Es natural, así las cosas, que haya sido y sea aún difícil el mutuo reconocimiento y la cooperación entre los actores de estos dos mundos y que en el interior de áreas que se definen por sus contenidos afines más que por sus métodos –como puede ser la de los estudios lingüísticos hispánicos–, las relaciones entre los filólogos y los lingüistas, los historiadores de la lengua y los lingüistas, los gramáticos tradicionales (sea lo que sea lo que signifique esta locución) y los lingüistas no hayan sido demasiado fluidas pese a lo conveniente que, en ocasiones, podría ser el acercamiento.

Vaya por descontado que el debate sobre las dos culturas no tiene en este momento demasiado sentido. No lo tiene, en primer lugar, porque

a veces lo que parece una “cultura” en un determinado momento resulta ser más tarde una etapa de un proceso que inevitablemente llevará a la integración, o a la desintegración; en todo caso, al cambio. En segundo lugar, porque los cambios generales de la sociedad muestran, de manera progresiva, aspectos nuevos de las así llamadas dos culturas. Durante muchas décadas, al menos en el ámbito europeo, las humanidades y sus actores han dispuesto del prestigio que les daba el ser las dueñas de la interpretación, como alternativa a la explicación, en un mundo donde la comunicación se extendía con lentitud y los textos, lejanos por diversas razones, reservaban misterios, “lecturas” y “ediciones” que se aclaraban e iluminaban poco a poco y parecían ser infinitos. Las ciencias de la naturaleza, a su vez, eran inaccesibles para la mayoría y, lo que es más importante, no se veía tan claro como puede verse hoy día –en especial en lo que se refiere a las ciencias de la vida– que de sus hallazgos y descubrimientos podían derivarse consecuencias decisivas para el desarrollo y mantenimiento del planeta y sus ecosistemas, así como para el bienestar de los países y de los seres humanos.

Es más que seguro que la situación ha cambiado de modo sustancial: ha aumentado el prestigio y el peso social de las ciencias experimentales, su desarrollo se considera estratégico para el crecimiento de las naciones y los científicos empiezan a ser tan dueños de la interpretación como los filósofos o los historiadores. Con todo esto no es menos cierto que la sociedad necesita de los humanistas y los reclama. Por lo menos en el contexto europeo se espera cada vez más que las humanidades (acaso algunas de sus disciplinas) contribuyan a solucionar algunos de los “problemas candentes”: “desde los desafíos que impone la seguridad hasta los relacionados con el multiculturalismo y la identidad europea”, como se dice en un reciente trabajo de la Comisión Europea a propósito del Séptimo Programa Marco de Investigación.

Es cierto: los acontecimientos sociales y políticos y sus razones deben iluminarse desde el pensamiento de otros y desde los análisis previos de hechos similares; la capacidad organizadora y prospectiva de ciertas ramas de la filosofía debe acompañarse con el estudio neurocientífico de la mente y del ser humano desde perspectivas experimentales; o, en otro orden de cuestiones, no es posible entender la capacidad para el lenguaje o simplemente planificar actividades de formación escolar sin saber cómo son las lenguas.

Dado lo anterior, nos encontramos, decía, en una situación de crisis –en el sentido etimológico de “mutación importante”– donde una parte del campo de estudio (la que tiene que ver con los textos) parece mirarse a sí misma con cierta perplejidad y otra aspira a cambiar de vestido y ser un paso hacia una deseable interacción (que no integración) con las ciencias de la naturaleza. No obstante, para ambas partes del espectro debería ser legítima la aspiración –que también lo es de la sociedad– de renovar las humanidades, dotarlas de un papel algo distinto del que han desempeñado hasta este momento: con mayor colaboración interdisciplinaria y más participación en temas, digamos, de enjundia socioeconómica. En todo caso, es evidente que en algunos campos hay un giro teórico-conceptual, y ese giro, junto a otros factores, establece una valoración distinta y un cambio en la situación social de los estudios sobre las lenguas, la historia, o la antropología. Me temo que esta situación, *mutatis mutandis*, se reproduce en algunas otras zonas de las humanidades, como la geografía y la arqueología.

¿Cómo afecta esta situación general al interior mismo de la disciplina? En el caso específico del estudio del lenguaje, una manera de enfrentarse con el giro metodológico y epistemológico planteado por la lingüística formal ha sido, por una parte, reforzar la vía de la interacción lengua-sociedad: más y mejor sociolingüística y, por otra, buscar nuevos elementos para fortalecer el eje descriptivista. Ese manantial de nuevos datos pendientes de acumulación y descripción se ha encontrado en el discurso. Al orientarse hacia el discurso, la lingüística de las lenguas convergía también con el movimiento general “posmodernista” de las humanidades, donde parece haber un debate entre la clásica lealtad a los autores, a los textos, al historicismo y a ciertos imperativos universales, frente a una agenda del análisis literario movida más por aspiraciones políticas u otras exigencias similares momentáneas. Dos formas ambas del interpretacionismo y del descriptivismo, dos formas también de reaccionar y de intentar adaptarse a un desarrollo de las ciencias donde algunas proceden con extraordinaria rapidez y otras parecían ancladas en las tradiciones.

De todos modos, ese giro teórico y sus efectos no es lo único que hay. Me interesa destacar, para cerrar el círculo, dos importantes características recientes de los estudios del lenguaje que, ciertamente, se encuentran también en otras ra-

mas de las humanidades. La primera –debida al perfeccionamiento de los recursos informáticos y a la facilidad de construir *corpus* especializados de gran finura– es la posibilidad de trabajar con cantidades ingentes de datos y de afinar por medio de ellos hipótesis de diversos niveles: fonéticas, sobre la estructura de la conversación, sobre los niveles del análisis morfológico, o sobre el procesamiento de las construcciones, entre otras muchas. La segunda –debida a la convergencia de la lingüística teórica con la psicología y al empleo de técnicas instrumentales y estadísticas para el estudio de la producción / comprensión– es el aumento de los trabajos basados en experimentos con grupos de sujetos.

Entonces, por razones de principio y por cuestiones de modernización de los instrumentos de análisis, el estudio del lenguaje se sitúa así en ámbitos más propios de las ciencias experimentales en los que las observaciones se siguen de estudios extensos, longitudinales a veces, y siempre muy rigurosos. Estos análisis inciden también en los debates internos de la lingüística teórica –en cuyo seno se plantean hipótesis aparentemente alternativas sobre la naturaleza del sistema lingüístico: construccionismo frente a sistema algorítmico, o lingüística cognitiva (una vasta designación para un conjunto de ideas diversas) frente a sintaxis generativa–, pues algunos de los experimentos, como es lógico, se orientan a contrastar hipótesis internas a esos debates.

Éste es el contexto general en el que quiero situar las breves anotaciones que siguen sobre los estudios de lingüística hispánica en España, América y en el contexto europeo.

## LOS ESTUDIOS HISPÁNICOS EN ESPAÑA Y EN EUROPA

Son varios los factores que han condicionado el desarrollo de las disciplinas científicas –no sólo de la lingüística– en España y quiero al menos enumerarlos pues es imposible analizarlos siquiera levemente en una nota como ésta. El primero es el aislamiento de España respecto de Europa y de gran parte del mundo avanzado que caracterizó a los 40 años que siguieron al final de la guerra civil española. Este distanciamiento del mundo de la ciencia española y sus instituciones dificultó en algunos casos su puesta al día cuando comenzó su renovación, a principios de la década de 1980. Hay que decir también que ese aislamiento no impidió que las disciplinas que habían experimentado una puesta al día brillante en la llamada “Edad de Plata” de la ciencia y la cultura españolas, que incluye la Segunda República, resurgieran con rapidez apenas tuvieron ocasión de hacerlo. Tal es el caso de la física y la química que habían crecido ya de manera llamativa con las iniciativas de la Junta para Ampliación de Estudios; o, en otros ámbitos, como el de los estudios histórico-filológicos, en los que, pese a la pérdida de importantes talentos llevados al exilio, algunas ramas del saber tuvieron un desarrollo digno, dentro de ciertos límites, en los años de mayor aislamiento. A la vez que hago la observación que precede, soy consciente de que esto es ya historia pasada para la mayoría de las disciplinas pues la ciencia española ha tenido un crecimiento asombroso en los últimos 20 años y sus resultados en algunas áreas (la física, la matemática, la química, la astrofísica, la agricultura, la economía fundamental...) ocupan un lugar paralelo al que le corresponde al país como quinta economía europea y octava del mundo.

¿Por qué las humanidades no parecen haber entrado en esa carrera hacia la interacción con los miembros relevantes de una amplia comunidad –lo

que se suele llamar el impacto— y hacia la visibilidad internacional, como si está sucediendo en las ciencias experimentales e incluso en algunas ramas de las ciencias sociales? Las razones son muchas y el alcance nacional que muchos de estos estudios suelen tener no es la menos importante. Pero quiero referirme aquí a un segundo condicionante de la situación de las humanidades, a saber, la estructura del sistema universitario. Es fundamental recordar que, a diferencia de otras disciplinas, la investigación en humanidades se desarrolla de manera muy mayoritaria en las universidades. Este sistema se estructura con profesores funcionarios elegidos mediante un sistema de acceso (“oposiciones” o “habilitaciones”) que permite el dominio de escuelas y concede un peso decisivo a los grupos o individuos capaces de influir y presionar. Este sistema es similar al de algunos países europeos (Francia e Italia en particular, si bien en éstos la estructura del sistema científico es, o era, bastante más compleja), pero muy distinto del de los países anglosajones o de los nórdicos.

Se señala también, con razón, que el sistema universitario español, pese a haber sufrido reformas que aspiraban a impulsar la autonomía universitaria, ha tendido a la selección endogámica. En España, en efecto, ha predominado lo que los expertos llaman la selección interna (la cooptación por razones de afinidad, escuela o clientelismo) frente a la selección por el mercado, o la selección por planificación y necesidades científicas o académicas. En todo caso, para lo que aquí nos concierne, este factor —unido a los factores culturales que indicaba al comienzo de esta nota— trajo consigo que la entrada de corrientes innovadoras se hiciera con mayor lentitud de lo que hubiera sido conveniente. En las áreas experimentales no integrarse en el mundo significaba, de una manera más evidente e inminente, simplemente desaparecer; en el caso de las humanidades esa consecuencia no era tan clara; incluso podía suceder lo contrario.

En España, la investigación sobre el español, así como la organización de las carreras universitarias giran hasta los años 1980 sobre dos ejes que se derivan en buena medida de la escuela filológica anterior a la guerra: los estudios de historia de la lengua y gramática histórica y los estudios gramaticales en una doble vía: estructuralismo y líneas devenidas de la buena tradición gramatical descriptivista. La lexicografía es y ha sido otra área de peso, con seguridad —al igual que sucede en el caso de la gramática— por la influencia de la Real Academia Española y sus trabajos en esas dos líneas, que han tenido una gran visibilidad académica (y también mediática), sobre todo en las dos últimas décadas.

La apertura al mundo que empieza a finales de la década de 1970, la increíble ampliación del número de estudiantes universitarios (por razones económicas y demográficas) y la aparición de nuevas carreras a comienzos de los años 1980 hacen que surjan también temáticas y proyectos de otras líneas. Así, en departamentos de Madrid y Barcelona comienzan a hacerse trabajos teóricos por parte de grupos de lingüistas generativistas; en los cada vez más numerosos departamentos de filología inglesa y de traducción e interpretación se desarrollan proyectos de comparación entre lenguas o se crean bases de datos para enseñanza, y aumentan también los proyectos relacionados con el discurso. Todo ello siempre dentro de un sistema que me atrevo a llamar muy conservador de las líneas de trabajo y, sobre todo, relativamente poco preparado en el aspecto técnico, pues el propio sistema de selección no premiaba hasta épocas muy recientes la estancia en centros diversos de aquellos en los que se forman los investigadores, el posdoctorado y, en general, la movilidad de los investigadores en formación. Por otra parte, la falta de masas críticas en

muchas áreas provoca que quienes investigan en cuestiones de mayor riesgo no cuenten con un medio propicio para la discusión constante, los seminarios y el trabajo en grupo que son en este momento consustanciales con la investigación avanzada.

A los efectos de la redacción de este artículo, he tenido acceso a los listados de los proyectos de investigación en lingüística del español presentados para obtener financiación de la Dirección General de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia, el principal organismo financiador de investigación en el ámbito español, con un presupuesto de 430 millones de euros para 2007 sólo para proyectos de tamaño medio (dejo fuera becas, subvenciones a instituciones, grandes proyectos multidisciplinares, infraestructuras, etcétera). Lo que se muestra en ese listado, si se lo mira a lo largo de los últimos cuatro años, es un aumento de los estudios relacionados con la enseñanza (sobre todo comparada) de lenguas, por lo general del español y el inglés, en el marco de ideas sobre la competencia pragmática, las bases léxicas y, a veces, cuestiones semánticas. Por supuesto, abundan las investigaciones sobre el español y otras lenguas peninsulares (en especial, el catalán), orientadas muy a menudo hacia cuestiones pragmático-discursivas, a aspectos de la relación fonética, pragmática y discurso oral y, algo menos, pero con relieve, hacia cuestiones teóricas de la sintaxis y la semántica. Los estudios sobre el cambio y la variación lingüística pueden plantearse tanto desde la lingüística histórica como desde la microsintaxis o la geografía lingüística. Pese a tratarse de un país multilingüe con muchas situaciones de interés para la sociolingüística, son menos abundantes de lo que se esperaría las investigaciones en sociolingüística en sentido estricto. Sin embargo, en fechas más recientes se proponen —además de trabajos sobre “áreas” sociolingüísticas— investigaciones sobre la integración sociolingüística de la población inmigrante. En las peticiones de subvención abundan las dirigidas a la elaboración de diccionarios: diccionarios bilingües, diccionarios de léxicos especializados e incluso diccionarios sobre elementos gramaticales determinados. Por otra parte, algunas de las investigaciones antes mencionadas describen propuestas para construir bases de datos sobre todo léxicas sin precisar en todos los casos los fines por los que se constituyen. Son más recientes y escasos, pero suelen estar bien concebidos, los proyectos de lingüística informática.

El panorama de la investigación en filología y lingüística muestra, en suma, trabajos en numerosos campos, si bien con un predominio de los estudios discursivo-comunicativos, en un sentido muy comprensivo y descriptivo. Según entiendo, el ámbito de publicación de sus resultados es por lo general nacional y no hay apenas proyectos en los que colaboren equipos españoles con equipos europeos, ni grupos que participen en las acciones del Programa Marco de Investigación de la Unión Europea. Son escasos también los grupos que frecuentan las convocatorias de la *European Science Foundation*, muy propicias para enfoques modernos de las humanidades. Otro significativo ausente de los proyectos españoles es el movimiento hacia la interdisciplinariedad (y esta observación se aplica en general a los proyectos de otros países europeos).

Pese a no disponer de elementos de juicio organizados de manera sistemática, me atrevo a afirmar que el panorama que he descrito para España es muy similar en los países de América Latina. No obstante, existen algunos matices dignos de mencionarse. Así, la orientación hacia los estudios relacionados con la enseñanza probablemente sea allí más marcada, hay con seguridad menos concentración en la investigación gramatical (no hay continuidad entre la gramática tradicional y las modernas corrientes gramaticales como sí ha sucedido en España) y tal vez se enfatizan más algunos aspectos de la variación lingüística. Hay una gran confluencia, en cambio, en la orientación hacia el estudio descriptivo del discurso. En el fondo podría hablarse, creo, de una velada dependencia de la investigación peninsular. Prueba de ello es que al ser América Latina un territorio fabuloso para la investigación sobre lenguas indígenas no pueda hablarse más que de escasos resultados en esta área y el terreno de las lenguas aborígenes está más en manos de los antropólogos que de los lingüistas.

### INTERDISCIPLINARIEDAD E INTERNACIONALIZACIÓN

Tengo una cierta confianza en que esa situación, en lo que a España respecta, pueda cambiar en los próximos años, dada la importancia que los países europeos están concediendo a la dimensión internacional de la investigación científica y a la movilidad de los investigadores tanto en

el ámbito europeo como en el transatlántico. Muchos estudiantes graduados y posgraduados, también en humanidades, llevan a cabo periodos de formación en departamentos de universidades extranjeras. Si bien no cuento con datos cuantitativos precisos, los estudiantes interesados por la lingüística se dirigen a departamentos estadounidenses y canadienses, pero también a departamentos del Reino Unido, Alemania, Italia o los países nórdicos. En algunos países europeos se desarrollan proyectos que reciben financiación para posdoctorados adscritos a esos proyectos y se acoge en ellos a estudiantes extranjeros; esta situación no es infrecuente en RU y Alemania, incluso para la lingüística. La movilidad empieza a ser también un mérito bien valorado por nuestros centros de investigación más destacados y por algunas universidades en sus concursos de acceso (mucho menos ciertamente –por no decir “nada”– en humanidades que en otras áreas). Así las cosas, no es impensable que en un futuro próximo las nuevas generaciones de científicos introduzcan perfiles nuevos en la investigación en estas disciplinas, como ha sucedido ya en algunos terrenos de las ciencias sociales, en particular en la economía.

Permítaseme, para concluir, plantear algunas reflexiones sobre el actual debate europeo en torno a las humanidades y las ciencias sociales. En Europa se considera aún a las humanidades y las ciencias sociales como un área global frente a otras tres agrupaciones: las ciencias de la vida, las naturales y experimentales y las diversas “ingenierías”. España no es diferente en este sentido. Sin embargo, esa unión de las humanidades con las ciencias sociales se defiende con dificultad. En la NSF norteamericana, por ejemplo, se distingue desde hace tiempo entre artes y humanidades (historia y literatura, fundamentalmente), ciencias cognitivas y del comportamiento (psicología y lingüística) y ciencias sociales y económicas. Otra característica de las humanidades europeas es su entronque muy decimonónico, muy aislacionista o, si se prefiere, su estabilidad a lo largo de decenios. Es probable que las áreas universitarias en humanidades sean las mismas desde hace 50 o 60 años; basta decir que en nuestro país hay muy pocos departamentos de lingüística. En muchos Estados europeos la situación no es demasiado distinta.

En los dos o tres últimos años, activado por el comisariato de investigación de la Comisión Europea, ha comenzado a plantearse de manera incisiva la necesidad de impulsar cambios en la investigación en humanidades y ciencias sociales. Se ha dicho que la innovación tecnológica debe marchar mano a mano con la innovación social. De hecho, en el VII Programa Marco de investigación de la Comisión Europea se introdujo por vez primera un área específica de ciencias sociales y humanidades. Muchas son las reflexiones que se suscitan en este contexto. Se habla del papel de estas disciplinas en la visión y el cambio de la sociedad, y en su convergencia hacia la estabilidad social, política y económica. Europa se plantea reflexiones de relieve sobre su identidad, sobre los cambios demográficos, sobre el cambio global, sobre el envejecimiento de la población, sobre la inmigración, sobre la desigualdad por razones de género. Es una expectativa más que razonable que las humanidades y las ciencias sociales puedan tener un papel de relieve en la estructuración de esas reflexiones. Se discute también cuál ha de ser el papel de las humanidades en la información y formación de quienes deben tomar decisiones políticas, decisiones científicas e incluso decisiones económicas.

En Europa prevalece un debate vivo y creciente sobre la necesidad de los enfoques interdisciplinarios, que afecta de lleno a los estudios del lenguaje. Como decía en fechas recientes un experto de la NSF, Europa y Estados Uni-

dos de América no cortan la tarta de la misma manera. En esa institución estadounidense lo que marca las pautas es, más que el enfoque disciplinar, la conveniencia de estudiar en conjunto las fuerzas que modelan lo que podríamos llamar humano (y que sería, por tanto, propio de unas humanidades en sentido más abarcador y renovado). La interdisciplinariedad no es, sin duda, un fin en sí mismo, pero la evolución de las disciplinas como la lingüística muestra que si pensamos en términos de los objetivos de los estudios del lenguaje: conocer cómo son y qué fuerzas modulan las lenguas y su evolución e interacción con la sociedad, entonces quizá sea más apropiado reconocernos en un ámbito de ciencias de la cognición y de la relación entre el conocimiento y la sociedad. Uno de los proyectos prospectivos recientes de la ESF se titulaba justo “Origins of man, language and languages” y aspiraba a impulsar la generación de proyectos en los que trabajasen en conjunto filósofos, lingüistas, antropólogos, psicólogos de la cognición e incluso paleontólogos.

En las humanidades europeas de la ESF, por poner otro ejemplo, se proponen proyectos de enfoque disciplinario más o menos convencional, pero de gran alcance comparativo europeo. Hay, pues, un movimiento de lo nacional a lo paneuropeo que se ve facilitado por la mayor disponibilidad de medios informáticos, los equipos mayores y las buenas subvenciones que facilitan el trabajo en red y los desplazamientos para llevar a cabo actividades conjuntas.

Éstas son sólo algunas pinceladas, pero quedan muchas preguntas abiertas: ¿ha de haber gran ciencia social y humana del mismo modo que hay *big science*? ¿Cuáles son las grandes infraestructuras que necesitamos para las humanidades? ¿Qué función desempeñan los programas de doctorado en tanto que laboratorios para la formación de nuestros investigadores? ¿Cómo articular y hacer deseables los programas de movilidad de los investigadores para activar también así la internacionalización de las disciplinas? ¿Cómo se consigue que nuestros especialistas aprecien el valor de las publicaciones de calidad y alcance internacional, con independencia de la lengua en que se escriba?

Esperemos que el futuro próximo proporcione interesantes respuestas a todas estas preguntas, y a las muchas que se me habrán quedado en el tintero.







# APUNTES SOBRE EL REFORZAMIENTO DEL SISTEMA DE PATENTES

JUAN CARLOS GARCÍA-BERMEJO OCHOA  
Universidad Autónoma de Madrid

HACE NO MUCHO TIEMPO, LA INCLUSIÓN DE UN TRABAJO SOBRE PATENTES EN un volumen dedicado a la ciencia hubiera resultado extraña, o quizá no hubiera podido producirse siquiera. Pero hoy, recurrir al derecho de la propiedad industrial para proteger resultados de la investigación académica es una práctica en claro crecimiento. Por ello, comentar este fenómeno, al que dedicamos la primera sección, puede ser una propuesta actual y relevante. Asimismo, la tradicional falta de familiaridad, e incluso de interés, por la propiedad industrial por parte de los académicos puede justificar que comentemos algunos rasgos del funcionamiento del mecanismo de las patentes que desentonan con la doctrina tradicional sobre ese funcionamiento y sobre la propia justificación del mecanismo. Son rasgos puestos de manifiesto por la investigación económica a partir de las últimas décadas del siglo pasado, y a ellos dedicamos la segunda sección. Y lo hacemos también en parte porque los sectores en los que parece que las patentes se alejan más de la que sería su función, parecen ser justo aquellos en los que la I+D compartiría más características con la investigación académica. La tercera sección trata de una manera más específica de un aspecto polémico del proceso de extensión y homogeneización internacional del sistema, que recibió un impulso especial también en las últimas décadas del siglo XX, y en el que nuestros países se hallan también envueltos.

JUAN CARLOS GARCÍA-BERMEJO OCHOA, FILÓSOFO Y ECONOMISTA, ES CATEDRÁTICO de Fundamentos del Análisis Económico (en sus orígenes, Metodología General y Económica) en la Universidad Autónoma de Madrid. Fue decano de la Facultad de CC Económicas y Empresariales de dicha universidad. Dirigió durante tres años el *Master* en Análisis y Gestión de la Ciencia y la Tecnología en la Universidad Carlos III de Madrid, donde también impartió clases en el Programa de Doctorado de Economía. Fue presidente de la Sociedad Iberoamericana de Metodología Económica, desde su fundación hasta octubre de 2003. Ha publicado dos libros y numerosos artículos sobre metodología económica, sobre filosofía de la ciencia y su incidencia en economía, así como sobre elección individual, elección social y economía de la ciencia.

# APUNTES SOBRE EL REFORZAMIENTO DEL SISTEMA DE PATENTES

JUAN CARLOS GARCÍA-BERMEJO OCHOA  
Universidad Autónoma de Madrid

LOS ESTUDIOS QUE HAN ANALIZADO EN LAS ÚLTIMAS décadas del siglo XX el comportamiento del sistema y su funcionalidad social, han acompañado un debate sobre la necesidad de reformar, o de abolir incluso, el derecho de las patentes tal como lo conocemos, debate que ha cobrado una intensidad y amplitud notorias en la literatura económica. Y no nos referimos al caso específico del *software*, que en Europa no es (¿todavía?) patentable. El debate pone en juego aspectos del sistema en su conjunto. Y entre las posturas partidarias de cambiar las cosas, se pueden encontrar posturas de radicalidad muy diversa. Desde la propuesta de reformas institucionales que afectarían al sistema judicial y administrativo relacionado con la concesión de las patentes y la defensa del derecho que confieren (véase, por ejemplo, Jaffe y Lerner, 2004), hasta la abolición pura y dura del derecho de propiedad industrial (véase, por ejemplo, Boldrin y Levine, 2005a y 2007), pasando por reformas profundas del sistema (véase, por ejemplo, Thurow, 2004).

El propósito de fondo de este artículo es contribuir a que sean cada vez más los académicos y los profesionales que se sientan interesados en un debate pluridisciplinar sobre la (im)procedencia de imponer limitaciones al conocimiento libre, que es como se ha concebido de manera tradicional el conocimiento científico, en aplicación del derecho de propiedad industrial y en aras de la privatización de la ciencia para estimular su rendimiento.

## LAS PATENTES Y LA INVESTIGACIÓN ACADÉMICA

La inclusión de un trabajo sobre patentes en un volumen dedicado a la ciencia hubiera resultado extraña no hace mucho tiempo por razones conocidas y en apariencia bien asentadas. Las patentes protegen las invenciones técnicas en tanto que la ciencia produce descubrimientos, cuya patentabilidad está excluida expresamente, como también lo está la posibilidad de patentar leyes, fenómenos naturales, o ideas abstractas. Para que cualquier invención sea patentable se exige, además, que cumpla un requisito de aplicabilidad industrial, o de aplicación y utilidad prácticas (y a veces, incluso, de comerciabilidad). Y por si quedara alguna duda, la investigación científica ha estado liberada de la sujeción al sistema gracias a alguna exención por usos experimentales o similar.

Así, la ciencia y la tecnología se han considerado como sistemas complementarios pero distintos y separados (Eisenberg y Nelson, 2002, pp. 89-90). En consecuencia, los sistemas de incentivos para la creación y la innovación (y para la transferencia y la difusión del conocimiento) vigentes de manera tradicional en cada una de ellas han cumplido funciones paralelas (por ejemplo, estimular la rápida difusión del conocimiento), pero han sido distintos y separados: un sistema mertoniano de recompensas en la ciencia (bajo la protección del derecho de autor o *copyright*), y el derecho de patentes (principalmente) en el terreno tecnológico (cf. Dasgupta y Davis, 1994). Además, parece haber un amplio acuerdo sobre el funcionamiento satisfactoriamente efectivo de la ciencia, y ha habido, por tradición también, un amplio acuerdo sobre ventajas del sistema de patentes en su propio ámbito porque, como subrayan Eisenberg y Nelson (2002, p. 93), las empresas captan mejor las oportunidades tecnológicas para las que puede haber demanda en el mercado.

Sin embargo, hoy se observa que desde hace algunas décadas se viene produciendo una vinculación no sólo creciente, sino acelerada, entre la propiedad industrial y la investigación científica, intensificada de tal forma a partir de los años 1980 que puede hablarse, sin temor a exagerar, de una nueva época a este respecto. Sirvan dos botones de muestra. En el plano cuantitativo, Eisenberg (2003a) afirma que, mientras que entre 1969 y

1986 las universidades estadounidenses eran titulares de 1.1% de las patentes poseídas por organizaciones en Estados Unidos de América, en 1999 ese porcentaje ascendía ya a 4.4% (se cuadruplicaba). En el cualitativo, puede recordarse que en abril de 1988 se otorgaba a la Universidad de Harvard la primera patente sobre un animal vertebrado, el *oncorratón*, otorgamiento que pocos decenios antes hubiera sido impensable.

En definitiva, aunque el sistema de patentes no tenía tradicionalmente presencia significativa alguna en el ámbito de la ciencia, ni se consideraba que debiera tenerla, hemos pasado a una situación de participación creciente de las instituciones académicas en el sistema de patentes. ¿Qué factores han hecho posible ese cambio?

Permítaseme un inciso para hacer una observación. Es en Estados Unidos de América donde el proceso se desencadenó de una manera más nítida, tiene lugar de un modo más acusado, y es el país que, en consecuencia, marca la tendencia en relación con estos problemas y en general con la evolución de la propiedad intelectual e industrial se está siguiendo a escala mundial. Por ello, en reiteradas ocasiones habremos de referirnos de manera exclusiva o cuando menos representativa a la evolución de los acontecimientos registrada en ese país.

De vuelta a los factores que han hecho posible la nueva situación tal como se manifiesta sobre todo en Estados Unidos de América, esos factores han sido diversos. En un plano más general, por ejemplo, cambios de actitud política respecto de la financiación de la ciencia, orientada a favorecer la sustitución parcial y gradual financiación pública por financiación privada, como consecuencia de una política presupuestaria más exigente. Posiblemente también, un propósito de fomentar la innovación tecnológica al proteger la ciencia y la tecnología propias frente a competidores foráneos que pudieran (volver a) basar su capacidad de rivalidad en la imitación.

En un plano más específico, debe mencionarse la ley Bayh-Dole de 1980, que trata no sólo de permitir, sino de fomentar que las universidades patenten los resultados de la investigación financiada en forma pública, sin violentar sus objetivos típicos. Por ello, el mecanismo orientado a favorecer la ley mencionada no pretende que la investigación científica sea sustituida en el ámbito académico por otra más aplicada o por actividades de desarrollo. La idea que se persigue con las patentes académicas es asegurar, mediante la protección proporcionada por las patentes, que las instituciones sin ánimo de lucro y sobre todo las empresas (en un inicio las beneficiadas fueron las pequeñas, después también las grandes corporaciones) pudieran tener incentivos suficientes para desarrollar esas invenciones y materializarlas en innovaciones comercializables. Una pieza legislativa anterior pero de ese mismo año de 1980 había incluido la transferencia tecnológica como una parte integrante de las actividades de I+D de los laboratorios federales y de sus empleados (Eisenberg, 1996, p. 1665).

Pero debe destacarse también la reforma institucional del sistema jurisdiccional competente para entender sobre los derechos de propiedad intelectual e industrial que se emprendió por la misma época. La pieza clave fue la creación por el Congreso de Estados Unidos de América en 1982 de un Tribunal Central de Apelaciones para entender en forma unificada de todas las apelaciones relativas a patentes (sobre el proceso de reforma del sistema en Estados Unidos de América, puede verse Jaffe y Lerner, 2004). Con ello se pretendía unificar los criterios jurisdiccionales, mitigando en grado sustancial la dispersión anterior, reforzar la seguridad jurídica de los titulares de patentes frente a presuntos infractores o a posibles denuncias de invalidez, y facilitar la propia tarea de concesión de las patentes al unificar la jurisprudencia.

Como ponen de manifiesto Jaffe y Lerner (2004), un subproducto de esta reforma jurisdiccional, importante en especial para poder patentar resultados de la investigación académica, ha sido una extensión gradual, materializada en sentencias sucesivas, del dominio de las entidades aceptadas como patentables. El tribunal ha ido ampliando el dominio de lo patentable hasta extremos que poco tiempo antes eran impensables, tanto por la naturaleza de las entidades susceptibles de ser patentadas (los seres vivos, por ejemplo), como por la mayor flexibilidad con la que se han ido interpretado los requisitos tradicionales de patentabilidad, tales como la novedad y la actividad inventiva (*novelty* y *non-obviousness* en el sistema estadounidense), o el requisito de la aplicabilidad industrial o de la utilidad práctica de las invenciones (pueden verse también Eisenberg y Nelson, 2002, o Davis, 2004).

La presencia creciente de las patentes en el ámbito científico sería, por lo tanto, un aspecto y, a la vez, una consecuencia de los profundos cambios que ha experimentado el régimen de la propiedad intelectual e industrial a partir de 1980, el cual –en parte en respuesta a los nuevos desarrollos en campos científicos como la biología molecular y la biotecnología o en las tecnologías de la información– ha ampliado su ámbito de protección hasta cubrir resultados propios y típicos de la investigación científica académica.

Como es natural, el proceso no ocurre por igual en todas las disciplinas. A este respecto conviene tener presentes en particular aquellos campos en los que, en términos de Rebecca Eisenberg y Richard Nelson (2002, p. 91), la investigación científica procura una comprensión básica necesaria para abordar y resolver problemas prácticos, como es el caso de las ciencias biomédicas, la ciencia de materiales, la informática o la investigación teórica en ingeniería (un artículo muy recomendable sobre el proceso de participación de las instituciones académicas en el sistema de patentes es Nelson, 2004).

La intensidad con la que las patentes están penetrando en el mundo de la investigación académica ha hecho albergar temores sobre los riesgos a los que dicha investigación podría estar exponiéndose, esos riesgos están fundamentados en las características de la propia figura de la patente. Comentemos con brevedad algunos ejemplos.

La patente, recuérdese, es una figura jurídica cuyo objetivo es hacer que el mercado ofrezca incentivos económicos a las invenciones que terminen por materializarse en innovaciones

comercializadas y que, como es natural, tengan demanda. Por ello, uno de los temores aludidos con mayor frecuencia tiene que ver con la propia orientación de la investigación académica. Se teme que los incentivos inducidos por las patentes sean capaces de reorientar poco a poco la investigación académica, al alejarla de campos y temas en los que se hubiera centrado bajo una orientación básica no aplicada, y al acercarla a campos y cuestiones capaces de originar un rendimiento económico, o de estar más cerca de hacerlo.

Nótese, además, que si la tendencia a la que apunta este tipo de temores llegara a consolidarse, los esfuerzos impulsores de la investigación terminarían por concentrarse en terrenos próximos a la rentabilidad económica, con lo que se despoblarían zonas alejadas de esa rentabilidad y actuarían así como un elemento disuasorio de la investigación básica tal como se ha entendido hasta nuestros días.

La percepción del riesgo se refuerza al considerar que son los gerentes de las universidades, más que los propios investigadores, quienes pueden tener mayor interés en obtener para la universidad los rendimientos que las patentes pueden generar de manera directa e indirecta (mediante licencias y contratos con empresas), y podrían estar así incentivando una reorientación de la investigación en sus instituciones. Con ello, se podría llegar a desvirtuar el objetivo con el que se defendió el recurso al derecho de patentes en la investigación académica. No se pretendía en absoluto reorientar la investigación, sino favorecer que se materializaran las innovaciones a las que esa misma investigación básica podría dar lugar.

Por desgracia, es pronto para poder comprobar hasta qué punto están fundamentados en realidad estos temores. Mowery y otros (2001), por ejemplo, se plantean la cuestión en su estudio empírico de un grupo escogido de universidades estadounidenses y sostienen que la evidencia (entonces) disponible no parece respaldar temores de esta clase.

Otro foco de preocupación es el eco que la generalización de las patentes académicas podría traer consigo en el ambiente social. Así, se teme que esa generalización pudiera suscitar una nueva consideración y valoración social de la ciencia, basada en sus aplicaciones prácticas. A su vez, esta nueva percepción social podría reforzar el recurso a la propiedad industrial como el medio de protección más apropiado de los

resultados de la investigación, relegando el financiamiento público como una fuente subsidiaria de recursos. Al fin y al cabo, no hay grandes diferencias de naturaleza entre las invenciones técnicas que por tradición se han considerado como el objeto propio de protección bajo el derecho de propiedad industrial (piénsese, por ejemplo, en un medicamento), y los resultados de la investigación con aplicaciones prácticas más o menos inmediatas.

Y, como es natural, también son de tomarse en cuenta los efectos que la apropiación de resultados puede ejercer cuando esos resultados son también aplicables en la propia investigación académica. Por el propio diseño del derecho de propiedad industrial, que concede un monopolio temporal a la invención protegida por una patente, no sólo eleva el costo de la aplicación de esos resultados (y puede ser que en forma considerable), sino que pueden generarse también costos nada despreciables de transacción derivados de la negociación para poder aplicarlos. Eisenberg y Nelson (2002), por ejemplo, basan en estos riesgos su justificación de un financiamiento público complementario, para incrementar y garantizar el dominio público y el libre acceso, ante el riesgo de control y bloqueo que genera el derecho de propiedad industrial. Eso por no hablar del retraso que todo ello puede traer consigo, o los bloqueos que en efecto pueden terminar por ocurrir no sólo por razones económicas, sino también de rivalidad. No debe olvidarse que la ciencia es una empresa de un nivel de competencia y rivalidad muy elevado, que basa en gran medida la eficiencia de su funcionamiento en estos mecanismos (junto con el libre acceso a los resultados que producen).

Con independencia de lo anterior, y con una significación menor, debe tomarse en cuenta que, dados los hábitos y medios actuales de comunicación científica, las patentes pueden exigir un retraso relativo en la notificación pública de resultados. Con frecuencia se ha destacado que el sistema de patentes y el sistema de recompensas en la ciencia al premiar la prioridad aceleran la publicación de los resultados. Con esto se ha entendido que los retrasos en esa publicación eran circunstancias de índole más bien técnica y que tendían, por tanto, a ser de una magnitud similar. Sin embargo, hoy día existen múltiples medios por los que un científico puede comunicar a sus colegas los resultados alcanzados sin necesidad de que hayan aparecido en una revista profesional. Las comunicaciones en congresos, la publicación en Internet de los documentos de trabajo, y la propia presentación de los resultados en reuniones y seminarios son canales de difusión de resultados. Pues bien, si con la solicitud de una patente se pretende obtener su concesión, no se puede hacer uso de ninguno de esos medios porque se anularía la condición de la novedad, que es la primera de la patentabilidad. Hay que esperar a que se publique la solicitud de la patente, lo que puede significar más o menos el retraso medio que la publicación de originales suele sufrir en las revistas.

En otro orden de ideas, la inmadurez del sistema de propiedad industrial en nuestros países puede impedir que la obtención de una patente se considere un mérito académico. En España, por ejemplo, coexisten hasta ahora (y sin plazo final prefijado) dos sistemas alternativos de tramitación de las patentes, y en uno de ellos se puede obtener la concesión sin que medie informe favorable alguno. El examen sustantivo de la solicitud es también preceptivo, pero, aunque sea desfavorable, se concede la patente si supera los requisitos formales. Como es obvio, la obtención de una patente por esta vía carece de las garantías de calidad que ofrece el examen por evaluadores anónimos habitual de las publicaciones científicas.

## SOBRE LA EFICACIA DE LAS PATENTES PARA ESTIMULAR LA I+D

Al sugerir las consideraciones anteriores, no se ha puesto en duda la concepción tradicional de la patente como mecanismo para generar incentivos que el mercado no induciría por sí solo en orden a fomentar la actividad y las inversiones en I+D (sobre el tratamiento básico de las patentes en economía puede verse Macho-Stadler, 1999, y Pérez-Castrillo, 1990). Sin embargo, según se desprende de análisis más pormenorizados, las patentes pueden no ser tan eficaces a la hora de estimular las innovaciones como suele suponerse.

En un estudio empírico ya clásico, Levin *et al.* (1987) compararon la confianza que ofrecían las patentes como medios para estimular las innovaciones con la confianza que las empresas encuestadas depositaban en otros cuatro mecanismos: el secreto industrial, la ventaja que procura adelantarse en el tiempo o, como suele llamarse, la ventaja temporal, la intensificación de la eficiencia por el aprendizaje y la gestión de las ventas y de los servicios posventa.

En términos generales, el estudio concluye que la (percepción de la) efectividad de las patentes varía de manera sustancial entre los sectores encuestados y que en la gran mayoría de los sectores, las patentes no se consideran en particular eficaces. Asimismo, se subraya que los sectores más sensibles a las patentes son los basados en tecnologías químicas, como el farmacéutico, y que en las industrias productoras de equipos o dispositivos mecánicos relativamente sencillos (y baratos de copiar) las patentes se consideran patentes moderadamente eficaces.

Por todo ello, después de haber presentado de manera sintética los resultados y las conclusiones del estudio, Levin (1986) se pregunta por qué reforzar y extender el sistema de patentes cuando en muchos sectores no se revela efectivo.

Por otro lado, es de notar que las conclusiones del estudio citado han mostrado su robustez a la luz de otros, como el presentado en Cohen *et al.* (2000) y como sucede también con los estudios comentados por von Hippel (1988, pp. 80-87).

¿Por qué se valoran las patentes de modo tan diverso en distintos sectores? ¿Por qué son tan poco valoradas en la mayoría de ellos?

Suele mencionarse con cierta frecuencia, por ejemplo, que las patentes pueden no resultar tan eficaces por el requisito implicado en el registro de que la invención se haga pública. Este requisito pondría a las patentes en desventaja frente a otras opciones, como el secreto industrial en ese aspecto, por el incentivo que puede desencadenarse para imitar la invención, aunque fuera sólo por el mero conocimiento de su existencia.

A menudo se mencionan también las incertidumbres y los costos relacionados con el proceso de concesión de las patentes y, sobre todo, con la defensa judicial de derechos, bien sea ante una demanda de nulidad de una patente o por violaciones de ella. Antes nos referimos a la reforma del sistema judicial estadounidense de 1982. Mediante la creación de un tribunal central y único de apelaciones para entender de cualquier asunto relativo a derechos de propiedad intelectual e industrial, esa reforma pretendía reducir significativamente la incertidumbre apuntada, y su implantación ha traído consigo, en efecto, mayor seguridad jurídica para los titulares de las patentes.

De manera análoga, y como parece confirmar el estudio citado, las patentes pueden ser relativamente ineficaces, por innecesarias, cuando los costos de la imitación o de la ingeniería inversa son ya en sí elevados. De hecho, en el estudio encontraron que “las patentes tienden a incrementar

sustancialmente el costo de las imitaciones sólo en las industrias en las que las patentes se consideran efectivas” (Levin, 1986, p. 200).

Otra circunstancia importante y que puede presentarse de diversa manera en diferentes sectores es la amplitud de la cobertura de la protección proporcionada por la patente, que, no debe olvidarse, opera de manera combinada con la duración de la vida de ésta. Nótese que esta última dimensión retrasa la posibilidad de poner en circulación nuevas innovaciones que puedan entrar en colisión con las invenciones patentadas. Por ello, en sectores con un ritmo de innovación rápido, las patentes pueden terminar por entorpecer, más que impulsar, las innovaciones.

Respecto a la amplitud de la cobertura, von Hippel (1988, p. 87), por ejemplo, asocia la efectividad de las patentes en el sector farmacéutico a la dificultad para que aparezcan otras invenciones alternativas que resuelvan el mismo problema y, sobre todo, a la “inusual” amplitud de las patentes en el sector (de modo primordial en las de naturaleza química, no tanto en las de naturaleza u origen biotecnológico), es decir, a la cantidad “inusualmente grande” de invenciones potenciales “cercanas” cubiertas o protegidas por cada patente.

Pero si el farmacéutico es el sector al que se alude casi siempre como aquél en el que las patentes han sido efectivas y, en consecuencia, son valoradas en especial, la industria de los semiconductores (y más recientemente la del *software*) es citada como el caso opuesto, como el caso en el que las patentes se han revelado tan ineficientes que, más que estimular la innovación tecnológica, la retrasarían y bloquearían. Y si en el caso del farmacéutico la efectividad atribuida a las patentes se debía sobre todo a la protección que ofrecían, en el de los semiconductores la situación se debería, en forma coherente, a la escasa protección que las patentes proporcionan, a la inseguridad jurídica consecuente y al freno a la innovación que todo ello puede suponer. Esa falta de protección se originaría por la rapidez con la que se producen las innovaciones. Y, por la existencia de múltiples patentes cercanas y relacionadas, de manera que la utilización de una es susceptible, la mayoría de las veces, de ser acusada de infringir alguna otra, y un nuevo producto suele incorporar tecnologías cubiertas por múltiples patentes, que pueden ser inseguras en el aspecto jurídico por esa misma razón (von Hippel, 1988, pp. 87, 88; Jaffe y Lerner, 2004, pp. 57-64).

El comportamiento en las últimas décadas del siglo pasado de industrias como la de los semiconductores se ha analizado, en forma empírica, con especial atención, al poder ponerlo en relación con las reformas del sistema de patentes que se ha registrado desde principios de los años 1980 en Estados Unidos de América principalmente. Estos estudios revelan un fenómeno tan contrario a los propósitos originales del derecho de patentes que algún autor lo ha clasificado también como “paradoja” (Davis, 2004, pp. 399-400).

Es de notar a este respecto que, en la presentación habitual de las patentes, los incentivos se generan mediante la apropiación de los rendimientos económicos que se obtienen mediante el desarrollo y comercialización de la invención (bien sea directamente, bien sea mediante la concesión de licencias). Dicho con otras palabras, la doctrina que se esgrime para justificar el derecho de propiedad industrial presupone que la invención patentada se convierte en una innovación comercializada, que es la forma en la que puede terminar por incrementar el bienestar de los ciudadanos. En el derecho español, por ejemplo, una causa de caducidad de la patente es justo la falta de explotación de la misma.

Además, el proceso de generación de incentivos se retroalimentaría. Las patentes proporcionarían incentivos para invertir en I+D y, simétricamente, la posibilidad de invertir en I+D de una manera rentable induciría incentivos para patentar. Asimismo, es probable que la investigación dé lugar a nuevas invenciones, por lo que más patentes inducirían más inversión en I+D, lo que, a su vez, originaría que se registraran más patentes.

Sin embargo, estas ideas tan ligadas a la doctrina establecida sobre las patentes, chocan con un fenómeno cuya magnitud se ha observado en estudios empíricos recientes y contrario a los propósitos originales del derecho de la propiedad industrial. En efecto, lo que parece ponerse de manifiesto en esos estudios es que, en los sectores analizados, a las patentes no les han seguido las actividades de I+D que hubiera cabido esperar según la doctrina tradicional. Además, la evidencia apunta a un uso estratégico, cuando no directamente recaudatorio de las patentes concedidas. En suma, las patentes no sólo no habrían inducido las actividades de I+D requeridas para su materialización en innovaciones que pudieran incrementar el bienestar social, que es la finalidad que las justifica, sino que serían objeto de una utilización estratégica que, lejos de promover la innovación, la entorpecería y tendería a bloquearla.

La posibilidad teórica y la evidencia empírica de que haya patentes “durmientes” que se registren sólo para ser empleadas como amenazas estratégicas y no se materialicen en innovaciones comercializadas, ya eran familiares en la literatura desde hace tiempo. Tales patentes pueden servir, por ejemplo, para impedir que nuevas empresas entren en la industria, porque de hacerlo tendrían que hacer frente a las ventajas competitivas de las que la empresa incumbente podría disfrutar al comercializar los productos (o procesos) protegidos por las patentes que posee y mantiene sin desarrollar. Por tanto, en estos casos, aunque la invención se conozca, sus beneficios sociales son muy inferiores a los que justificarían la protección concedida, porque quien tiene la capacidad de materializar la invención en procesos o productos a los que pudieran acceder empresas o particulares, decide no hacerlo.

Lejos de ser una curiosidad teórica o una eventualidad empírica infrecuente, los estudios aludidos antes subrayan que estaríamos asistiendo a una especie de generalización del fenómeno de las patentes durmientes.

Una circunstancia que ha permitido observar el fenómeno con mayor claridad ha sido el aumento en el número de patentes registradas y concedidas que se ha experimentado, en especial en Estados Unidos de América, en parte como resultado de las reformas de las que no hicimos eco ya en la sección anterior. Una de ellas, recuérdese, fue la creación por el Congreso de Estados Unidos de América en 1982 de un Tribunal Central de Apelaciones para entender de manera unificada de todas las apelaciones relativas a patentes. Otra, la reorientación financiera y de gestión de la Oficina de Patentes y Marcas, que decidió también el Congreso, esta vez en 1992 (Jaffe y Lerner, 2004, pp. 1-21).

En principio, una reforma tendiente a corregir la dispersión y diversidad de posiciones judiciales en las causas relativas a patentes parecía obligada a disminuir la incertidumbre y unificar los criterios por los que debía regirse el sistema. Pero, de acuerdo con Jaffe y Lerner (2004), la creación de ese tribunal central ha aumentado en grado sustancial la probabilidad de que un titular de una patente ya concedida gane una demanda de infracción interpuesta por él, y de que haga frente con éxito a una demanda de invalidez de la patente interpuesta contra él. Asimismo, las indemnizaciones y pagos impuestos por el tribunal a las partes sentenciadas como infractoras son también superiores desde la creación del tribunal y ha aumentado también la facilidad con la que el tribunal impone suspensiones cautelares o condicionales (*preliminary injunctions*) de la actividad de las empresas sujetas a un proceso de infracción todavía no resuelto, con los considerables costos que esta suspensión puede traer consigo y que puede incluso acarrear el cierre de la empresa o su salida de la industria (para más detalles, véase Jaffe y Lerner, 2004, pp. 9-10;19-20, y cap. 4).

Por su lado, la reorientación financiera y de gestión de la Oficina de Patentes y Marcas, que decidió también el Congreso, esta vez en 1992, ha originado un descenso en el rigor con el que las solicitudes son examinadas y resueltas, y, por tanto, un descenso en los requisitos de calidad (e incluso de idoneidad) exigidos para conceder patentes (para más detalles, véase Jaffe y Lerner, 2004, pp. 11, 21, y cap. 5).

La conclusión es clara: es más ventajoso solicitar patentes, es más fácil conseguir su concesión, y es más fácil hacer valer los derechos otorgados por esa concesión. Y en esa misma medida, la situación de mayor desventaja de un posible o presunto infractor es más arriesgada, tanto por la mayor probabilidad de que el resultado del proceso sea adverso como por el aumento en los costos de un resultado de ese signo.

Resulta, entonces, natural comprobar que ante ese cambio de situación la respuesta fuera un incremento sustancial de las solicitudes y concesiones de patentes, aunque, como sostienen algunos autores, dicho crecimiento no tendría ese único origen.

El hecho es que el número de solicitudes y de patentes concedidas aumentó de manera sustancial en Estados Unidos de América desde principios de los años 1980. Jaffe y Lerner (2004, p. 11) afirman que entre 1983 y 2002 las patentes crecieron a una tasa anual media en torno a 5.7 %, y las solicitudes a una tasa superior, cuando desde 1930 hasta 1983 la misma había sido inferior a 1%.

Y como la función económica que justifica el derecho de patentes presupone su desarrollo hasta materializarse en innovaciones comercializadas y accesibles al público por medio del mercado, lo coherente con esa idea es esperar que el aumento en el número de patentes indujera un aumento en las inversiones y actividades de I+D. Sin embargo, no ha sido así.

En varios estudios se han analizado las relaciones entre las reformas referidas, la evolución del número de patentes que habrían inducido y la evolución de la inversión y de las actividades de I+D a las que esas patentes deberían haber dado lugar. En esos estudios se sugiere de forma mayoritaria que, en efecto, las reformas habrían estimulado la propensión a patentar, logrando así su cometido más inmediato. Sin embargo, en sectores distintos del farmacéutico, ese incremento en el número de patentes no habría dado lugar a un incremento correspondiente en los gastos y actividades de I+D, ni tampoco a los desarrollos correspondientes para convertir las invenciones en innovaciones comercializadas. De ahí los autores sugieren que el aumento del número de patentes habría respondido a la finalidad de enriquecer carteras de patentes como un medio para reforzar la posición negociadora o estratégica de las empresas, en analogía con el ejemplo clásico de la patente durmiente (véase, por ejemplo, Hall y Ziedonis, 2001; Sakakibara y Bransteter, 2001 (sobre el proceso similar registrado en Japón); Bessen y Maskin, 2002; Bessen y Hunt, 2004, y Davis, 2004, pp. 399-400).<sup>1</sup> Asimismo, reafirman la sugerencia de que las empresas podrían confiar más en la eficacia estratégica de otros instrumentos como el secreto industrial, la ventaja temporal, así como las propias capacidades de manufactura y diseño. Lee Davis (2004, pp. 399- 400) sintetiza lo paradójico de la situación en los términos siguientes: "Pero aunque esos derechos de propiedad intelectual e industrial se hayan expandido y sean hoy más importantes, no han llegado, necesariamente, a ser más eficaces al motivar la I+D; de hecho, defenderemos precisamente lo contrario".

Como apuntábamos antes, después de las reformas comentadas es más ventajoso solicitar patentes, es más fácil conseguir su concesión, y es más fácil hacer valer los derechos otorgados por esa concesión. Pero, por eso, se crea una situación de mayor desventaja a cualquier posible o presunto infractor. El riesgo de ser demandado por infringir una patente concedida con anterioridad es mayor, así como también es mayor el riesgo de ser acusado de infringir un patente concedida de manera improcedente sobre un producto o un procedimiento ya en uso. Y son también mayores las desventajas y los perjuicios posibles para un posible o presunto infractor, tanto por la mayor probabilidad de que el resultado del proceso judicial sea adverso como por el aumento en los costos que trae consigo un resultado de ese signo.

De este modo, el reforzamiento de la posición de los titulares de las patentes, a pesar incluso de que su calidad pueda ser inferior, la debilitación consecuente de los posibles infractores y el aumento de la cuantía de las indemnizaciones, ha favorecido la utilización de las patentes con fines recaudatorios y estratégicos, en lugar de propiciar el incremento de las innovaciones.

Por lo tanto, resulta natural que hayan aumentado los procesos por presunta infracción de patentes, incremento que ha seguido una evolución paralela al crecimiento sustancial de las patentes registradas (Jaffe y Lerner, 2004, p. 13). Además, dada su situación de desventaja relativa, a una empresa amenazada de ser demandada por infracción puede resultarle más atractivo llegar a un acuerdo previo que embarcarse en un proceso judicial. Esto explica que el reforzamiento de la posición de los titulares de patentes haya favorecido una utilización recaudatoria sistemática de la cartera de patentes poseída por grandes empresas (con unidades de negocio encargadas de esa función recaudatoria). Esta actividad ha llegado a reportarles sumas muy considerables de ingresos. En el caso de Texas Instruments, por ejemplo, esos ingresos superaron en algunos ejercicios económicos a los procedentes de las ventas de sus productos (Jaffe y Lerner, 2004, pp. 14-5).

Una empresa grande tiene más mecanismos de defensa. Ella misma puede emplear recursos en crear o aumentar su propia cartera de patentes para poder defenderse de amenazas por parte de empresas competidoras. Además, esta práctica favorece, por la amenaza recíproca potencial que comporta, llegar a acuerdos mutuos, que suelen tomar la forma de acuerdos de licencias cruzadas. Por consiguiente, si su dimensión se lo permite, para una empresa individual puede ser importante seguir patentando, incrementar su cartera de patentes y mejorar así su posición negociadora y su capacidad competitiva frente a sus rivales, sin verse en desventaja en los posibles conflictos o en los procesos de negociación en los que pueda verse inmersa.

Hay que insistir en que esas patentes no tienen como finalidad su desarrollo en innovaciones comercializables. De esta manera, para la industria en su conjunto la actividad desplegada en solicitar patentes y los costos originados por ella no serían más que un costo adicional e innecesario que grava adicionalmente la actividad

1 Von Hippel (1988: 81- 84) subraya el mismo fenómeno con anterioridad a los cambios comentados.



de I+D en esa industria, sin traducirse en innovaciones. Por el contrario, se solicitan para que llegado el caso puedan servir para amenazar a las empresas competidoras.

En el caso de las empresas pequeñas o nuevas en la industria, la situación de desventaja es mayor, en especial las que desarrollan productos o procesos comercializables, que pueden verse amenazadas por múltiples demandas de infracción sin una cartera de patentes con la cual poder defenderse (von Hippel, 1988, pp. 85-6; Jaffe y Lerner, 2004, pp. 59-61). Lo incierto de su situación puede hacerles incluso desistir de líneas de innovación en las que podrían encontrarse con amenazas y riesgos de esta clase.

Por otro lado, parece que, en fechas más recientes, las carteras de patentes empiezan a formar parte de los activos que se emplean para valorar una empresa.

### ¿LIBERALIZAR EL COMERCIO DE PRODUCTOS NO LIBERALIZADOS?<sup>2</sup>

Otro de los rasgos de la evolución reciente del sistema de las patentes es su internacionalización. Desde el siglo XIX han surgido convenios internacionales de carácter multilateral cuyo propósito es armonizar los procedimientos nacionales. Sin embargo, son creaciones del último tercio del siglo XX los convenios que crean sistemas internacionales para canalizar y facilitar la solicitud y las fases iniciales de tramitación de las patentes. El Tratado de Cooperación en materia de Patentes de 1970 crea el sistema que lleva sus siglas (PCT), y el Convenio sobre la Patente Europea de 1973, que va más allá que el anterior en cuanto a los trámites iniciales, crea la figura y el sistema de solicitud y examen de la patente europea. Por razones de carácter general y por lo que diremos más abajo, es importante tener presente que, sin embargo, la patente es aún, hoy por hoy, un derecho de ámbito territorial nacional.

De todos modos, el acuerdo internacional que sería más representativo de los esfuerzos realizados a finales del siglo pasado por impulsar el establecimiento de sistemas de protección homogéneos en el nivel mundial es el Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual relacionados con el Comercio de

1994 (Acuerdo ADPIC), negociado en el marco del Acuerdo General sobre Comercio y Aranceles (GATT), hoy Organización Mundial del Comercio.

No deja de ser curioso que el intento de extensión y de homogeneización internacional de las legislaciones sobre propiedad intelectual e industrial se haya vinculado con los acuerdos internacionales sobre la liberalización del comercio mundial. Y no deja de ser curioso, porque un bien sobre el que recae una patente viva es un bien protegido y, por tanto, no liberalizado. De esta manera, se podría caricaturizar la situación al destacar que lo que se propone a los países que ofrecen básicamente materias primas y productos agrícolas es liberalizar la entrada en otros países de esos bienes, pero a cambio de que ellos (1) liberalicen en el aspecto aduanero también el comercio en general, y además (2) acepten que los productos susceptibles de ser patentados (por lo regular patentados en origen) estén también protegidos por su propia legislación con una protección similar a la que esos bienes tienen en los países desarrollados. Se les pide, pues, que liberalicen el comercio de bienes protegidos.

Por otra parte, hay, además, razones para pensar que la globalización del sistema de patentes, tal como sucede en la actualidad, aumenta las pérdidas de eficiencia que el derecho de propiedad industrial origina por su propio diseño y por su aplicación. Sin embargo, estas pérdidas no parecen atraer en el debate sobre la posible reforma del sistema una atención comparable a los aspectos y problemas referentes a su funcionamiento en los ámbitos nacionales. Y eso aunque los problemas generados en los países en vías de desarrollo por el precio de algunos medicamentos suelen asomar a los medios con cierta frecuencia. Todavía resuenan, por ejemplo, los ecos de la relativamente reciente decisión del presidente Lula de suspender la patente de un medicamento contra el sida. Sin embargo, estos incidentes suelen enfocarse más como problemas de carácter político y de naturaleza redistributiva, que como cuestiones que pongan en tela de juicio la forma en la que se concibe y aplica en forma habitual el derecho de propiedad industrial.

Recuérdese con brevedad la doctrina que, desde el punto de vista económico, respalda la figura de la patente. Si una invención no estuviera protegida, cualquiera podría copiarla y explotarla libremente. El inventor (o el inversor en la I+D correspondiente) tendría que competir con estos rivales, lo haría en inferioridad de condiciones puesto que la inversión en I+D sería superior al costo de copiar, y no vería recompensada su inversión en dinero, tiempo y esfuerzo. En consecuencia, no habría incentivos para inventar ni para innovar, y se invertiría en investigación mucho menos de lo que sería deseable en el aspecto social; ese “mucho menos” se mediría por el incremento en el bienestar social que las invenciones y las innovaciones no materializadas hubieran podido traer consigo. Pues bien, el derecho conferido por una patente protege al titular de una invención al impedir que terceros puedan copiarla y explotarla sin la correspondiente licencia concedida por él. Y al hacerlo, permite que el titular de la patente obtenga en el mercado un rendimiento capaz de hacer atractiva su inversión.

En definitiva, el derecho de patentes introduce una reforma del mercado con el fin de que el posible titular de una invención valiosa tenga incentivos para invertir en su logro. ¿Cómo debieran ser esos incentivos? Suficientes para que la inversión en I+D tenga lugar y para que, además, la invención se materialice en una innovación comercializada y accesible a

2 Una versión abreviada de esta sección fue enviada al diario Expansión. Hasta el momento de escribir estas páginas no ha sido publicada.

la población, cuyo bienestar es el destinatario último del proceso. En consecuencia, lo deseable es que el rendimiento económico de la innovación cubra la inversión en I+D, los costos de producción y comercialización, el rendimiento que esa inversión y la cantidad empleada para hacer frente a esos costos hubiera podido generar en otros empleos alternativos (el costo de oportunidad, en la jerga de los economistas), y si se quiere, una prima de riesgo por la incertidumbre propia de las actividades de investigación. Llamemos “rendimiento suficiente mínimo” al que cubre estos costos, pero se limita a cubrirlos sin añadir beneficios adicionales.

El rendimiento generado por la innovación debería cubrir como mínimo todo eso, es decir, debería ser igual por lo menos al rendimiento suficiente mínimo. ¿Debería cubrir algo más? De preferencia, no. El propósito que, desde el punto de vista económico, justifica y legitima las patentes es el de fomentar el bienestar social, no el de maximizar el bienestar de los inventores ni el beneficio de las empresas titulares de invenciones. El mecanismo económico asociado con una patente es la concesión de un poder monopolista que permite a su titular fijar un precio por encima del costo de producir las unidades puestas a la venta para, de esa manera, poder obtener un rendimiento. La consecuencia previsible es que habrá una parte de la población que estaría dispuesta a pagar un precio igual o superior al costo de producción, pero no tendrá acceso a la innovación por lo elevado del precio. Eso significa que la mejora en el bienestar social que podría acarrear la innovación queda frustrada en parte. Si el rendimiento proporcionado por la patente coincidiera con el rendimiento suficiente mínimo (o fuera el resultado viable más cercano a él), la mejora frustrada en el bienestar social sería parte del costo necesario para que se produjera la propia innovación y la mejora en el bienestar social efectivamente proporcionada por ella. Pero si el precio fijado por el monopolista es superior al que procura el rendimiento suficiente mínimo (o superior al resultado viable más cercano a él), la pérdida de bienestar social será mayor y no tendrá ya justificación socioeconómica, puesto que, como incentivo para inventar, el rendimiento adicional al mínimo es redundante.

Supongamos ahora que una empresa obtiene la concesión de una patente en un país como Estados Unidos de América. Dada la antigüedad del sistema en ese país y el volumen del mercado estadounidense, podemos suponer que si la innovación es capaz de alcanzar el éxito en ese mercado, el monopolio de explotación que se le concede le permite obtener un rendimiento económico igual o superior al rendimiento suficiente mínimo. Supongamos, asimismo, que unos meses después la misma empresa obtiene una patente europea y la válida en varios países que, en conjunto, representan un mercado similar al estadounidense. La empresa obtendría de esta manera un rendimiento adicional en Europa similar al que obtenía en el mercado estadounidense. Sin embargo, no habría tenido que volver a hacer la inversión en I+D, porque ya habría conseguido la invención como resultado de la inversión en I+D hecha en un inicio en Estados Unidos de América. Por ello, la parte del rendimiento obtenido en Europa que debería cubrir la inversión en I+D y la prima de riesgo dejaría de estar justificada. De cara a incentivar la inversión, esa parte del rendimiento obtenido en Europa sería redundante y, además, aminoraría las mejoras en el bienestar social que podrían derivarse de la innovación. A todo ello hay que añadir que la inversión en I+D suele ser la parte del león del costo total. En forma habitual, la inversión en I+D es el costo más cuantioso y los costos unitarios posteriores originados por la producción y la comercialización son mucho menores (con la posible salvedad de los gastos orientados a conseguir la au-

torización administrativa para comercializar un medicamento). Por ejemplo, el costo de producir unidades adicionales de un medicamento ya comercializado o de producir discos con copias de un nuevo programa de cómputo suele ser insignificante, tanto en términos absolutos como en comparación con el costo de la I+D (para un tratamiento técnico de la relación del mecanismo de las patentes con el tamaño del mercado, consúltese Boldrin y Levine, 2005b).

Si suponemos en nuestro ejemplo hipotético que la misma empresa patentara además en otros países, el fenómeno de redundancia apuntado se volvería a producir de una manera análoga y por las mismas razones, y se revelaría como un fenómeno acumulativo.

Podría objetarse que la extensión del ámbito territorial de la protección proporcionada por el conjunto de patentes nacionales permitiría abaratar el precio. Sin duda es una posibilidad teórica, aunque no la única, y su materialización en la práctica sería una cuestión que merecería la pena estudiar de modo empírico. ¿Han disminuido los precios reales de los medicamentos, por ejemplo, por el hecho de estar protegidos en un ámbito territorial más extenso? Pero sea cual sea la respuesta a estas preguntas, lo cierto es que la extensión de la protección es una fuente de beneficios adicionales para las empresas afectadas. Por ello, sigue siendo aplicable el argumento anterior. Esos beneficios adicionales, conseguidos por la concesión de un monopolio, dejarían de estar justificados como incentivo a la innovación, y coartarían el bienestar social que esa misma innovación sería capaz de proporcionar.

Así pues, el proceso de universalización del derecho de patentes, tal como se concibe y se lleva a cabo en la actualidad, parece estar más orientado en la dirección de incrementar los beneficios de las empresas titulares de patentes, que en la dirección de aumentar el bienestar social. Si la finalidad fuera esta última, parece que la aplicación del derecho de patentes tendría que tomar en cuenta la redundancia que puede crearse al patentar en varios países una misma invención en las mismas condiciones que si se tratara de patentar invenciones por completo diferentes.

¿Qué es lo que podría cambiarse? Los partidarios de abolir el derecho de patentes lo tienen claro. Pero quizá sea más realista hacerse la pregunta con una perspectiva menos radical y más posibilista. Si el problema es que el rendimiento de la protección otorgada por una patente puede

ser excesivo respecto de lo que parece justificado por la búsqueda del bienestar social, el objetivo de las reformas podría ser el de atenuar el rendimiento garantizado y acercarlo al rendimiento suficiente mínimo. Con ello se facilitaría que los beneficios de la innovación fuesen accesibles para una parte mayor de la población.

Las vías para desarrollar una reforma de este tipo pueden ser numerosas y diversas, y algunas podrían estar por inventarse, aunque también se puede vaticinar que, como esas reformas deberían ponerse en práctica en nivel internacional, surgirían con toda probabilidad problemas, relacionados, por ejemplo, con la separación de los mercados, con la inexistencia de una autoridad internacional reconocida en la materia, y con el conflicto de intereses entre países, y entre empresas y gobiernos, conflicto que puede hacer difícil o imposible llegar a los acuerdos internacionales necesarios.

Si existiera voluntad por llegar a un acuerdo internacional, una posible vía sería, por ejemplo, la regulación tal como se hace en forma habitual cuando se concede un monopolio para la provisión de bienes o de servicios públicos o colectivos. Esta vía, o la análoga de vender a los gobiernos a precios más bajos que a los particulares (como se hace con las revistas científicas y las bibliotecas universitarias), podría aliviar quizá los problemas originados en los países en vías de desarrollo por los precios de los medicamentos patentados y que ocupan espacio en la prensa diaria con tanta frecuencia. Otra vía podría ser la de poner la duración de la patente en dependencia del ámbito territorial total en el que la invención esté protegida. Una patente válida en un conjunto amplio de países podría tener una duración menor que una patente válida en un ámbito territorial más pequeño. La reforma podría exigir empezar a concebir como un derecho de ámbito internacional lo que hasta la fecha se concibe y administra como un derecho nacional a pesar de la existencia de figuras fronterizas como la patente europea.

Hay, entonces, numerosas posibilidades pendientes de su estudio o, incluso, de su diseño. Unas y otras pueden plantear dificultades y complicaciones a la hora de ponerlas en práctica. Sin embargo, conviene no olvidar que sobre la aplicación del derecho de propiedad industrial pueden decirse muchas cosas, pero, desde luego, no se puede afirmar que sea fácil ni sencilla. Todo lo contrario. Y su evolución reciente ha venido a enmarañar todavía más el asunto.

## (BREVES) COMENTARIOS FINALES

En las páginas precedentes hemos pasado revista a diferentes cuestiones del derecho de patentes en un plano teórico. Pero cuando se habla de estos temas, conviene no olvidar que, hoy por hoy, a pesar de los comentarios que puedan hacerse sobre su legitimidad y su funcionamiento, y a pesar, asimismo, de las propuestas que puedan formularse sobre su reforma o su abolición, ese derecho está vigente en nuestros países, que en este terreno suelen actuar como seguidores. Y conviene no olvidarlo porque por propio diseño, la figura de la patente no sólo permite la apropiación en exclusiva, sino que la concede al que aprovecha la ocasión en primer lugar. Por eso, desde un punto de vista práctico, la vigencia de ese derecho crea una situación estratégica en la que, como pregonan algunos estrategas futbolísticos, la mejor defensa es el ataque. En realidad, las cosas van más allá, porque atacar es la única defensa posible. En efecto, la única manera de defenderse y evitar que terceros se apropien de la explotación de conocimientos propios es adelantarse y apropiarse de ellos de manera formal uno mismo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bessen, James y Maskin, Eric. 2002. "Sequential Innovation, Patents, and Imitation", Working Paper Department of Economics, MIT (disponible en: [www.researchineurope.org/documents/swpat.pdf](http://www.researchineurope.org/documents/swpat.pdf)).
- Bessen, James y Robert M. Hunt. 2004. "The Software Patent Experiment", (disponible en: [www.researchineurope.org/documents/swpat.pdf](http://www.researchineurope.org/documents/swpat.pdf)).
- Boldrin, Michele y David Levine. 2002. "The Case Against Intellectual Property", en *American Economic Review*, 92(2), pp. 209-12.
- \_\_\_\_\_. 2005a. "Intellectual Property and the Efficient Allocation of Social Surplus from Creation", en *Review of Economic Research on Copyright Issues*, 2 (1), pp. 45-67.
- \_\_\_\_\_. 2005b. "IP and Market Size", mimeo, Universidad de Minnesota y UCLA (disponible en las páginas web personales de ambos autores).
- \_\_\_\_\_. 2007. "Copy Right: Against Intellectual Monopoly", en prensa (disponible en las páginas web personales de ambos autores).
- Cohen, Wesley M., Richard R. Nelson y John P. Walsh. 2000. "Protecting Their Intellectual Assets: Appropriability Conditions and Why U.S. Manufacturing Firms Patent (Or Not)", en *National Bureau of Economic Research, Working Paper no. 7552* (disponible en: <http://dsl.nber.org/papers/w7552.v5.pdf>).
- Dasgupta, Partha y Paul A. David. 1994. "Toward a new economics of science", en *Research Policy*, 23, pp. 487-521.
- Davis, Lee. 2004. "Intellectual Property Rights, Strategy and Policy", en *Economics of Innovation and New Technology* 13 (5), pp. 399-415.
- Eisenberg, Rebecca S. 1996. "Public Research and Private Development: Patents and Technology Transfer in Government-Sponsored Research", en *Virginia Law Review* 82, pp. 1663-1727.
- \_\_\_\_\_. 2003a. "Patent Swords and Shields", en *Science* 299, 5609, pp. 1018-9.
- \_\_\_\_\_. y Richard R. Nelson (2002): "Public vs. proprietary science: a fruitful tension?", en *Daedalus, Journal of the American Academy of Arts & Sciences*, 131 (2), pp. 89-101.

Hall, Bronwyn H. y Rosemarie Ham Ziedonis. 2001. "The patent paradox revisited: an empirical story of patenting in the U.S. semiconductor industry, 1979-1995", en *RAND Journal of Economics*, 32(1), pp. 101-28.

Hippel, Eric von. 1988. *The Sources of Innovation*, Nueva York, Oxford University Press (las citas corresponden a la versión castellana de Luis de Calvo Andrés, publicada en Madrid por la Fundación COTEC para la Innovación Tecnológica en 2004).

Jaffe, Adam B. y Josh Lerner. 2004. *Innovation and Its Discontents. How Our Broken System Is Endangering Innovation and Progress, and What To Do About It*, Princeton, Princeton University Press.

Levin, Richard C. 1986. "A New Look at the Patent System", en *American Economic Review*, 76 (2), pp. 199-202.

\_\_\_\_\_, A. K. Klevorick, R. R. Nelson y S. G. Winter. 1987. "Appropriating the Returns from Industrial Research and Development", en *Brookings Papers on Economic Activity*, n° 3: 783-820.

Macho-Stadler, Inés. 1999. "Incentivos y contratos en I+D", en *Ekonomiaz*, 45 (3), pp. 78-111.

Mowery, David C., Richard R. Nelson, Bhaven N. Sampat y Arvids A. Ziedonis. 2001. "The growth of patenting and licensing by U.S. universities: an assessment of the effects of the Bayh-Dole Act of 1980", en *Research Policy* 1 (30), pp. 99-119.

Nelson, Richard R. 2004. "The market economy, and the scientific commons", en *Research Policy*, (33), pp. 455-71.

Pérez Castrillo, J. D. 1990. "Procesos de I+D y estructura industrial: un panorama de modelos teóricos", en *Herri-Ekonomiaz. Economía Pública*, 6, 1/1990, pp. 171-214.

Sakakibara, Mariko y Lee Bransteter. 2001. "Do Stronger Patents Induce More Innovation? Evidence from the 1988 Japanese Patent Law Reforms", en *RAND Journal of Economics*, 32 (1), pp. 77-100.

Thurow, Lester C. 1997. "Needed: A New System of Intellectual Property Rights", en *Harvard Business Review*, septiembre-octubre de 1997, pp. 95-103.





# RED DE REPOSITARIOS DIGITALES PARA DISEMINACIÓN DE INFORMACIÓN

ADOLFO GUZMÁN Y VÍCTOR-POLO DE GYVES

Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, México

**B**IBLIODIGITAL ES UN PAQUETE QUE SE INSTALA EN UNO O MÁS SERVIDORES Y proporciona servicios de guardar, recuperar, buscar e indexar. Es una federación de bibliotecas locales (llamadas repositorios), independientes pero ligadas entre sí por un índice global. Cada uno es un lugar físico (una computadora) donde se almacenan de manera organizada documentos electrónicos para ser suministrados a los usuarios, quienes podrán acceder a ellos desde cualquier punto de Internet. Cada R tiene su propia taxonomía: los *temas* donde los documentos pueden clasificarse o indizarse. Un lector puede conectarse a cualquier R y tener acceso a *todos* los documentos de la federación. Una búsqueda es sólo acceso y manipulación del índice global, pues ya todo documento está indizado, por lo que no es necesario visitar cada documento para ver si en realidad contiene tal o cual palabra o quién es su autor.

**A**DOLFO GUZMÁN ARENAS ES INGENIERO DE LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Es doctor en computación del Instituto Tecnológico de Massachusetts, donde fue profesor asistente en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Recibió en 1996 el Premio Nacional de Ciencias y Artes de manos del presidente Ernesto Zedillo. Es ACM Fellow. En la actualidad trabaja en el Centro de Investigación en Computación (CIC) del IPN, el cual fundó en 1996. Se interesa en procesamiento semántico, representación del conocimiento y aplicaciones de sistemas de información.

**V**ÍCTOR POLO DE GYVES MONTERO ES INGENIERO EN COMPUTACIÓN DE LA UNIDAD Interdisciplinaria (UPIICSA) del Instituto Politécnico Nacional de México y labora en SoftwarePro International (México). Sus intereses son Unix, *software* libre y la confección de aplicaciones de tecnología avanzada.

# RED DE REPOSITARIOS DIGITALES PARA DISEMINACIÓN DE INFORMACIÓN

ADOLFO GUZMÁN Y VÍCTOR-POLO DE GYVES

SoftwarePro International<sup>1</sup>

## BIBLIODIGITAL

**B**IBLIODIGITAL ES UNA FEDERACIÓN DE BIBLIOTECAS locales (llamadas repositorios), independientes pero ligadas entre sí por un índice global. Cada uno es un lugar físico (una computadora) donde se almacenan, de manera organizada, documentos electrónicos para ser suministrados a los usuarios, quienes podrán accederlos desde cualquier punto de Internet. Cada R tiene su propia taxonomía: los *temas* donde los documentos pueden clasificarse o indizarse.

BiblioDigital está formada por un repositorio padre y cero o más repositorios hijos. Cada documento reside en exactamente un R. Cada R reside en una PC con bastante disco, no *break*, anti-virus, conexión a Internet...

El bibliotecario administra un R: da de alta a autores y editores, e inicialmente construye la taxonomía de su repositorio. Los lectores no necesitan, pero pueden, darse de alta.

Un lector puede conectarse a cualquier R y tendrá acceso a todos los documentos de la federación, no sólo a los del R al que está conectado. En BiblioDigital, un lector puede añadir *comentarios* a un documento leído.

Los autores pueden agregar nuevos documentos a su R, actualizar los suyos ya existentes y añadirles documentos complementarios.

También existen *editores*, que son dueños de *colecciones*. Más adelante se proporcionan mayores detalles al respecto.

## HOJEANDO LOS DOCUMENTOS

Un lector que desee saber qué documentos contiene la federación puede visitar la taxonomía temática de cualquier R y pulsar en un nodo de ella; la descripción (metadatos) de los documentos que yacen en ese tema aparecerán en la pantalla. Lo mismo puede hacer visitando la taxonomía de conceptos. Ver figura 1.

## ACCESO A LOS DOCUMENTOS (BÚSQUEDAS)

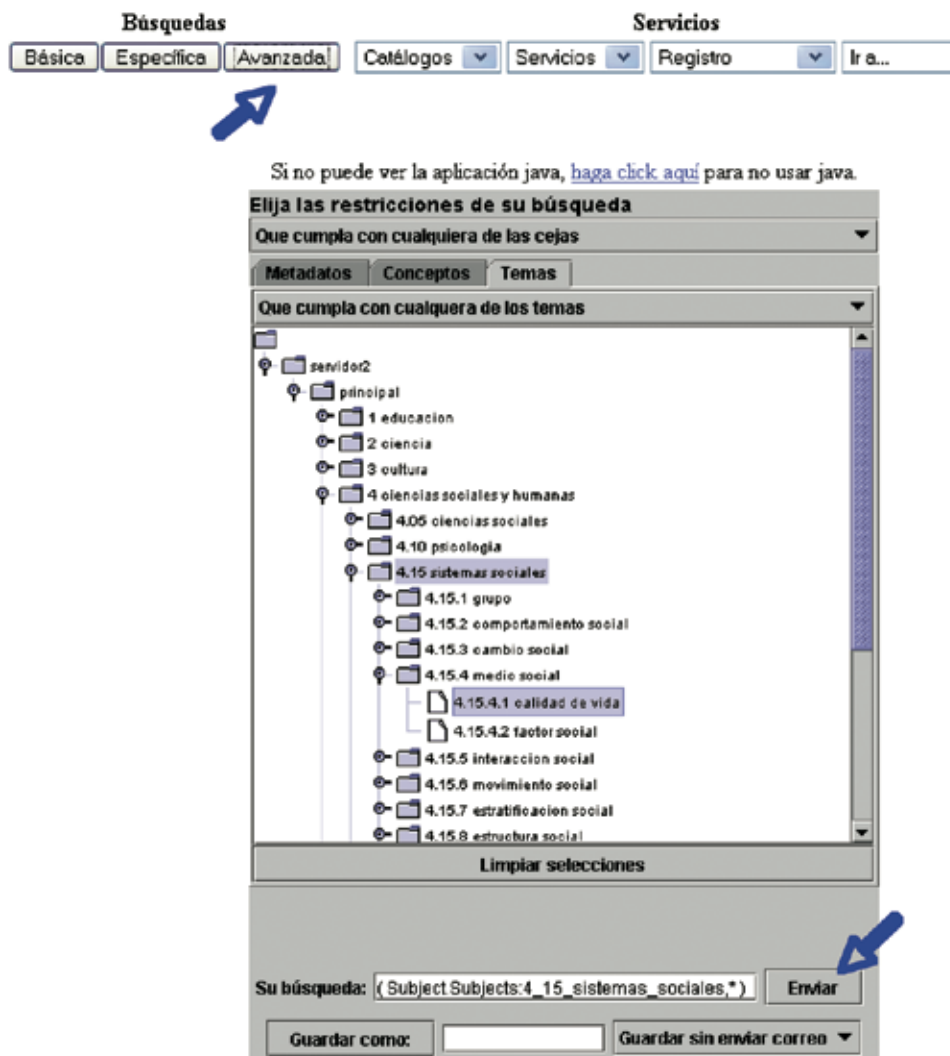
- **Por tema.** La taxonomía temática de un R la define su bibliotecario. Cada autor clasifica su documento en uno o varios de estos temas predefinidos (vocabulario controlado).
- **Por concepto.** La taxonomía de conceptos la da el sistema. Éste (a través de Clasitex ®) clasifica [de manera automática] cada documento en los temas que aborda.
- **Por las palabras y frases temáticas** (“Por mi raza hablará el espíritu”) que contiene en el texto completo. En este caso la búsqueda se hace mediante el uso de lematización (énfasis en las raíces de cada vocablo), por lo que una búsqueda de la frase “escuela danesa” también encontrará “escuelas danesas”. Ver figura 3 y figura 4.
- **Por metadato.** Es decir, por autor, por título, por lenguaje del documento...
- **Mediante combinaciones** de las opciones anteriores. Esto dota al usuario de un poderoso sistema de búsqueda de documentos.

Los documentos están disponibles en su R el día de su publicación y en forma global al siguiente día: la sincronización entre repositorios ocurre cada madrugada.

<sup>1</sup> BiblioDigital es propiedad de SoftwarePro International. Adolfo Guzmán es investigador del CIC-IPN (México).

FIGURA 1.

HOJEANDO LA TAXONOMÍA TEMÁTICA. AL PULSAR “BÚSQUEDA AVANZADA” APARECE UN ÁRBOL CON LA ESTRUCTURA TEMÁTICA DEL R. EL LECTOR PUEDE SELECCIONAR UN NODO, ABRIRLO Y MOSTRAR SUS NODOS HIJOS, ETC. AL PULSAR “ENVIAR”, APARECERÁN A LA DERECHA DE LA PANTALLA LOS METADATOS DE LOS DOCUMENTOS CONTENIDOS EN LOS TEMAS SELECCIONADOS (“SISTEMAS SOCIALES” Y “CALIDAD DE VIDA”, EN EL EJEMPLO)



## COLECCIONES

Una colección (ver figura 2) es un conjunto de documentos a los que se les asocia un nombre (por ejemplo, “Documentos para el curso de Química Básica”, “Concurso de Poesía”, “Revista Digital Computación y Sistemas”), por ser conveniente considerarlos colectivamente. Un editor puede ser editor de varias colecciones. Un documento puede pertenecer a cero o más colecciones. Las colecciones pueden ser abiertas (cualquier autor puede introducirle documentos de su autoría) o cerradas (sólo el editor puede introducirle documentos).

Cada colección reside en exactamente un R; una colección contiene en realidad apuntadores a documentos ya existentes en cualquier R, dados de alta con anterioridad por su autor.

Cada documento en una colección está en un estado (“recibido”, “aprobado”, “publicado”...). El editor define estos estados para los documentos de su colección. El editor cambia de modo manual el estado de un documento de su colección, por ejemplo, de recibido a aprobado, para que los autores del documento se enteren de su situación actual en la co-

lección. Por ejemplo, ¿cuál es el estado de mi tarea que envié a la colección “Tareas del curso de Física”?

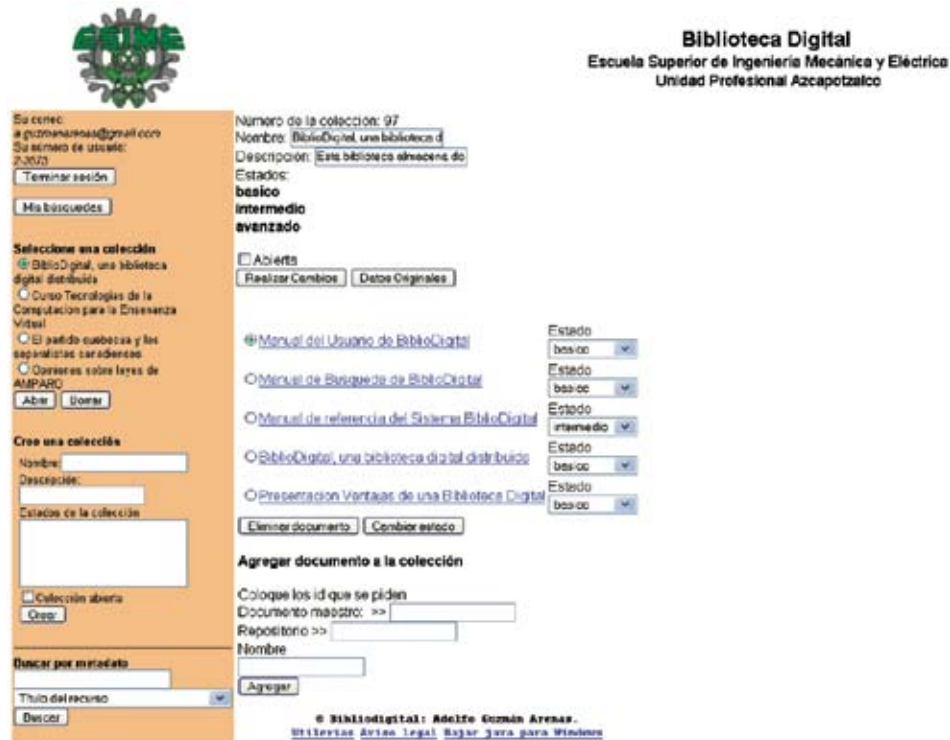
## SUSCRIPCIÓN A BOLETINES PERSONALIZADOS (ALERTA TEMPRANA)

Un lector puede indicar su perfil (o perfiles) de temas, conceptos y palabras clave que le interesan. Entonces el sistema le envía una vez a la semana o a la quincena... por correo electrónico, un boletín de noticias donde aparecen los títulos y resúmenes de los nuevos documentos que coinciden con su perfil, para que él pueda consultarlos en un momento oportuno. Para esto, un autor debe registrarse con el bibliotecario.



FIGURA 2.

**COLECCIÓN “BIBLIODIGITAL, UNA BIBLIOTECA DIGITAL DISTRIBUIDA”.** UNA COLECCIÓN PERMITE CONSIDERAR VARIOS DOCUMENTOS EN CONJUNTO. EL EDITOR (A.GUZMANARENAS@GMAIL.COM) HA ENTRADO A ESTA COLECCIÓN SUYA. LA COLECCIÓN NO ES ABIERTA. CONTIENE CINCO DOCUMENTOS, CUATRO SON BÁSICOS Y UNO ES INTERMEDIO. EL EDITOR PUEDE AGREGAR O ELIMINAR DOCUMENTOS A SU COLECCIÓN



**ARAÑAS. DOCUMENTOS EXÓGENOS**

No importa cuántos documentos pueda haber en una federación, siempre habrá más documentos afuera (en la Web). Por ello, y para aprovechar esta riqueza exógena, BiblioDigital puede leer e indizar (por conceptos y por palabras contenidas) los documentos “fuera de BiblioDigital”. Cada R posee una araña (crawler), que busca de manera automática en la Web documentos a partir de una colección inicial de sitios dados por el bibliotecario. Si los documentos pertenecen a la temática del R, serán indizados en ella y opcionalmente copiados a R. De esta forma las arañas enriquecen cada repositorio, pues le agregan documentos relevantes.

**CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE BIBLIODIGITAL**

- Un lector puede conectarse a cualquier R y tener acceso a todos los documentos de la federación.
- Una búsqueda recobra documentos de todas las R. Una búsqueda es meramente acceso y manipulación del índice global,

dado que ya todo documento está indizado. Por tanto, no es necesario visitar cada documento para ver si en realidad contiene tal o cual palabra o quién es su autor.

- Un bibliotecario (administrador de un R) da de alta a autores y a editores; los lectores no necesitan darse de alta; los documentos son en principio gratuitos, sin encriptación y públicos (cualquiera puede leerlos).
- Permite versiones de un documento, documentos accesorios (ejercicios, software, etcétera).
- Permite indizar (y entregar texto completo) documentos que yacen fuera de la federación de R.
- Un autor proporciona una ficha descriptiva (metadatos en el estándar Dublin Core, por ejemplo) del documento que él aporta.
- Puede almacenar documentos en cualquier formato, aunque está diseñada para manejar los formatos populares (Word, Excel, texto plano, PDF, PowerPoint, imágenes, .mpg...).
- Cada R tiene su propia taxonomía temática y al mismo tiempo utiliza otra taxonomía global de conceptos (impuesta por Clasitex).
- Los documentos pueden ser públicos o tener niveles de seguridad.
- Los repositorios comparten un índice global que se actualiza cada madrugada.
- Es posible saber la localidad (URL) donde yace un documento o colección, y enviar esta dirección a colegas interesados (en vez de enviar el documento completo).
- Un lector puede enviar correos al bibliotecario, autores y editores.
- Además de la búsqueda avanzada, existen búsquedas básicas (sencillas), catálogos de autores, de obras, de temas.

FIGURA 3.

BUSCA DOCUMENTOS CUYO CONTENIDO (TEXTO COMPLETO) CONTENGA TORO, REDONDEL, BUREL O CAPOTE



FIGURA 4.

SE ENCONTRARON 149 DOCUMENTOS COMO RESULTADO DE LA BÚSQUEDA DE LA FIGURA 3, ENTRE ELLOS “EL CUENTO, LAS CURAS Y LOS PRODIGIOS DE LA MEMORIA”, DE SERGIO PITOL



### BÚSQUEDAS AVANZADAS O DE MARKOV

Existe una versión inicial de localización de documentos según la dinámica o patrón de consultas de un usuario. Cada R observa la secuencia de búsquedas de un usuario y lleva estadísticas de lectura, para ofrecerle de manera espontánea documentos que podrían serle útiles. Por ejemplo, “Muchos lectores que consultan el documento A y luego el B a continuación visitan el C; aquí está el documento C”. Estas búsquedas son proactivas; el lector no tiene control sobre ellas, aunque puede ignorar sus sugerencias. El bibliotecario puede desactivar estas búsquedas, si considera que atentan contra la privacidad de sus lectores.

### TAXONOMÍAS Y EL BIBLIOTECARIO

La manera más fácil de crear una taxonomía es partir de un archivo de texto que la contenga. Una utilidad de BiblioDigital toma ese archivo y crea la taxonomía. Existen buenas taxonomías del dominio público y se recomienda su uso.

Se dispone de un editor de taxonomías para modificar en forma interactiva las taxonomías de temas y conceptos: crear o eliminar nodos, o cambiarlos de lugar.

La taxonomía temática se usa para que el autor clasifique su documento en uno o varios temas y para que el lector localice documentos según su temática. El autor lleva a cabo esta clasificación cuando ingresa su documento al R. Es posible pero engorroso reclasificar un documento mal clasificado: habrá que darlo de baja (borrarlo) y volverlo a ingresar. Es un proceso intencionalmente penoso.

La taxonomía de conceptos la maneja Clasitex; el autor o bibliotecario no tienen control sobre ella. Sirve, como ya se dijo, para buscar documentos según sus conceptos.

No es recomendable que el bibliotecario haga cambios frecuentes a la taxonomía temática, ya que desconciertan a los lectores y hacen que los documentos viejos continúen clasificados en temas ahora inexistentes.

Es imposible que un lector registre (indize, clasifique) un documento suyo en un tema inexistente en la taxonomía temática.

Es deber del bibliotecario revisar de modo ocasional los documentos ingresados por los autores, para detectar documentos irrelevantes, contrarios a la política editorial de la empresa, o mal clasificados. Otro deber suyo es respaldar periódicamente la información de su R.

#### ALGUNOS SERVIDORES DE BIBLIODIGITAL:

(Cada instalación tiene su responsable y sus políticas de uso).

<http://148.204.20.100:8080/bibliodigital>,  
Biblioteca Digital, ESIME Atzacotalco en el CIC.

<http://148.204.74.44:8080/bibliodigital>,  
Biblioteca Digital, ESIME Azcapotzalco.

<http://148.204.245.235:8080/bibliodigital>,  
Biblioteca Digital, ESIME Culhuacán.

<http://148.204.46.43:8080/bibliodigital>,  
Centro de Formación e Innovación Educativa.

<http://148.204.197.10:8080/bibliodigital>,  
Centro de Tecnología Educativa del IPN (Ágora).

<http://148.235.144.117:8080/bibliodigital>,  
Universidad Tecnológica de la Sierra de Hidalgo.

<http://201.134.139.88:9080/bibliodigital>,  
Centro Cultural del México Contemporáneo.

Más información: en <http://alum.mit.edu/www/aguzman>, en <http://aguzman.blog.com>.





# LA COOPERACIÓN MATEMÁTICA ESPAÑOLA CON LATINOAMÉRICA

MANUEL DE LEÓN

Instituto de Ciencias Matemáticas & IMDEA-Matemáticas,  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

ENRIQUE ZUAZUA IRIONDO

Departamento de Matemáticas & IMDEA-Matemáticas,  
Universidad Autónoma de Madrid

**E**N ESTE ARTÍCULO ANALIZAMOS CON BREVEDAD EL MOMENTO DE LAS MATEMÁTICAS en España y Latinoamérica. Para ello presentamos algunos datos de productividad e impacto obtenidos de la Web of Knowledge que permiten obtener una rápida visión panorámica del vigor de la investigación en esta área a cada lado del Atlántico. Por otra parte, reseñamos, también en forma breve, algunas iniciativas singulares y de especial envergadura que la matemática española ha emprendido. Por último, analizamos algunas iniciativas conjuntas de cooperación y sus perspectivas de desarrollo futuro.

**M**ANUEL DE LEÓN (REQUEJO, ZAMORA, 1953) ESTUDIÓ MATEMÁTICAS EN LA Universidad de Santiago de Compostela; se doctoró en 1978. En esa misma universidad fue profesor adjunto de Geometría hasta su pase al CSIC en 1986, en el que en la actualidad es profesor de Investigación. Su campo de trabajo es la Geometría Diferencial, la Mecánica Geométrica y el Control Óptimo. Ha desarrollado una extensa actividad social en la Real Sociedad Matemática Española, el Comité Español de Matemáticas, el Año Mundial de las Matemáticas y, en fecha reciente, fue presidente del International Congress of Mathematicians ICM2006, celebrado en Madrid en agosto de 2006. Desde 2007 es miembro del Comité Ejecutivo de la International Mathematical Union. También dedica sus esfuerzos a tareas de la gestión científica: ha sido Coordinador de Matemáticas de la ANEP, y ahora es miembro de la Comisión de Área de Ciencias y Tecnologías Físicas del CSIC, de la Comisión Asesora de Evaluación y Prospectiva, y del Comité PESC de la European Science Foundation. Es académico correspondiente de la Real Academia de Ciencias.

**E**NRIQUE ZUAZUA IRIONDO (EIBAR, GUIPÚZCOA, 1961) SE LICENCIÓ EN 1984 EN Ciencias Matemáticas por la UPV-EHU, obtuvo después el doctorado por esta misma universidad en 1987, en ambos casos con el Premio Extraordinario de la Facultad. En 1988 se doctoró por la Universidad Pierre et Marie Curie. Sus campos de especialización abarcan las Ecuaciones en Derivadas

Parciales, el Control de Sistemas y el Análisis Numérico. Profesor de la UPV-EHU, de la Universidad Autónoma de Madrid y de la Universidad Complutense de Madrid. En la actualidad dirige el Instituto IMDEA-Matemáticas. Ha sido profesor visitante de diversos centros extranjeros, entre los que cabe mencionar el Courant Institute en Nueva York y las Universidades de Minnesota y Rice, en Estados Unidos de América, la Universidad Federal de Rio de Janeiro, el Isaac Newton Institute de Cambridge, así como de diversas universidades francesas, entre ellas la Universidad Pierre et Marie Curie, Paris-Sud, Versailles, Orleans, Toulouse, Niza y de la Escuela Politécnica de París. Es editor en jefe de la Revista *ESAIM: COCV*, editor correspondiente del *SIAM Journal on Control and Optimization* y miembro del Comité Editorial de otras revistas, entre las que cabe mencionar *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, *Systems and Control Letters*, *Asymptotic Analysis*, *Journal of Optimization Theory and Applications* y *Collectanea Mathematica*. Miembro de número de la Academia Vasca de las Ciencias, las Artes y las Letras "Jakiunde". Premio Nacional de Investigación 2007.

# LA COOPERACIÓN MATEMÁTICA ESPAÑOLA CON LATINOAMÉRICA

MANUEL DE LEÓN

Instituto de Ciencias Matemáticas & IMDEA-Matemáticas,  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

ENRIQUE ZUAZUA IRIONDO

Departamento de Matemáticas & IMDEA-Matemáticas,  
Universidad Autónoma de Madrid

## ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN MATEMÁTICA EN LATINOAMÉRICA

LA INVESTIGACIÓN MATEMÁTICA EN LATINOAMÉRICA HA EXPERIMENTADO UN GRAN progreso en los últimos años, aunque en algunos países está todavía en un proceso de consolidación y en otros apenas si puede hablarse de un mínimo sustrato investigador. Esta conclusión se puede extraer si observamos la evolución en los últimos años en cada uno de estos países, lo que se refleja en los siguientes cuadros:<sup>1</sup>

CUADRO 1.  
ARTÍCULOS PUBLICADOS EN REVISTAS DE WEB OF KNOWLEDGE POR QUINQUENIOS

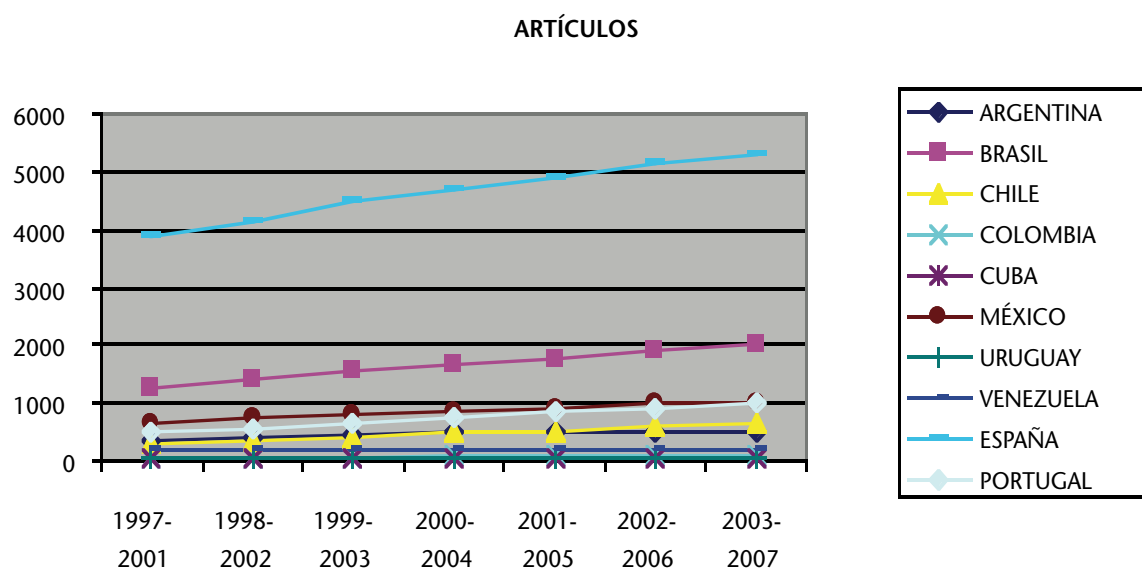
PAÍS	1997-2001	1998-2002	1999-2003	2000-2004	2001-2005	2002-2006	2003-2007
ARGENTINA	363	411	455	481	484	525	527
BRASIL	1 268	1 399	1 564	1 675	1 787	1 938	2 023
CHILE	319	366	426	482	528	610	655
COLOMBIA	47	54	66	77	78	96	102
CUBA	28	30	32	33	37	42	48
MÉXICO	675	759	830	847	930	993	1 006
URUGUAY	53	53	60	60	66	62	62
VENEZUELA	207	216	220	216	202	187	178
ESPAÑA	3 871	4 147	4 480	4 708	4 896	5 138	5 300
PORTUGAL	504	574	675	749	842	922	985

El cuadro se resume en la gráfica 1.

<sup>1</sup> Incluimos también los resultados de España y Portugal, para establecer una comparativa entre ambos lados del océano.

GRÁFICA 1.

EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE ARTÍCULOS DESDE 1997 A 2007



En el siguiente cuadro se muestra la evolución del impacto de la investigación matemática expresado en el número de citas por artículo:

CUADRO 2.

CITAS POR ARTÍCULO POR QUINQUENIOS

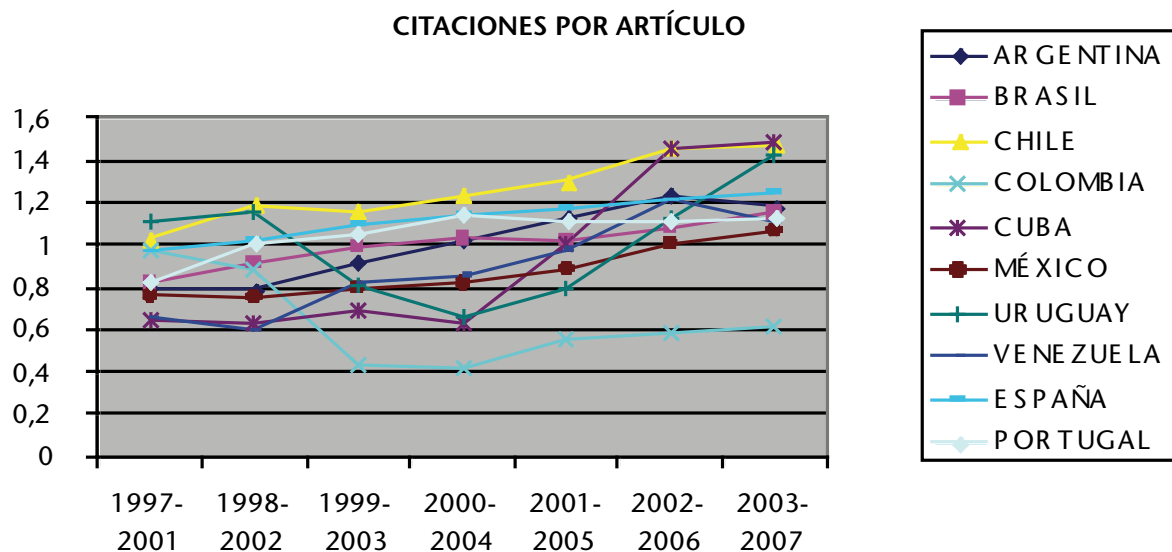
PAÍS	1997-2001	1998-2002	1999-2003	2000-2004	2001-2005	2002-2006	2003-2007
ARGENTINA	0.8	0.79	0.92	1.02	1.13	1.23	1.18
BRASIL	0.82	0.92	0.99	1.03	1.02	1.08	1.15
CHILE	1.03	1.19	1.16	1.23	1.3	1.46	1.47
COLOMBIA	0.97	0.88	0.43	0.42	0.55	0.58	0.61
CUBA	0.64	0.63	0.68	0.63	1	1.45	1.48
MÉXICO	0.76	0.75	0.8	0.82	0.89	1.01	1.07
URUGUAY	1.11	1.16	0.81	0.66	0.8	1.12	1.43
VENEZUELA	0.65	0.59	0.82	0.86	0.98	1.21	1.11
ESPAÑA	0.97	1.02	1.1	1.14	1.17	1.21	1.25
PORTUGAL	0.83	1.01	1.05	1.14	1.11	1.11	1.13

Una vez más el cuadro se interpreta de manera más adecuada en forma de grá-



GRÁFICA 2.

EVOLUCIÓN DEL FACTOR DE IMPACTO DESDE 1997 A 2007



Unos primeros comentarios como consecuencia de estos resultados cuantitativos son los siguientes:

- La producción de los países con una matemática más consolidada (Argentina, Brasil, Chile y México) es inferior en forma notable a la española, a pesar de su importante población. De esto se desprende que el esfuerzo realizado por España en las últimas décadas, y muy en especial desde que se produjera la transición democrática, de universalizar los estudios universitarios a todas las capas de la sociedad y dotar a sus universidades y a su sistema de ciencia y tecnología de medios para que los científicos encontrasen buenas condiciones de trabajo ha tenido un claro efecto: ha aumentado en gran medida el número de científicos dedicados en forma estable a la investigación matemática. Como es obvio, el desigual desarrollo económico y social de los países latinoamericanos afecta sensiblemente las cifras en este ámbito. Ello confirma la necesidad de ligar los esfuerzos para aumentar la productividad en matemáticas con políticas globales de fomento de la educación universitaria y con una inversión sostenida en investigación para que se pueda constatar la misma evolución en los países latinoamericanos.
- Sin embargo, aunque esa producción es todavía escasa para su potencialidad, es de calidad, en algunos casos con un impacto superior al de la matemática española. Esto se debe en gran medida a la existencia de centros y polos de excelencia, como los Institutos IMPA y LNCC de Brasil o el Centro de Modelamiento Matemático de Chile, que han supuesto un auténtico revulsivo en sus ámbitos nacionales y también a escala internacional. El modesto progreso de España en factor de impacto es indicativo también de que los esfuerzos inversores tan importantes que se han realizado, si bien han contribuido a crear una masa crítica importante de investigadores, se han realizado con frecuencia sin atender lo suficiente la calidad, la excelencia y la innovación.
- Países como Colombia y Uruguay (o incluso Cuba, aunque con cifras muy modestas) mejoran paulatinamente su rendimiento. Por el contrario, la situación de Venezuela es preocupante y no parece que la riqueza nacional contribuya a una mejora de la investigación matemática.

**LAS INFLUENCIAS ESPAÑOLA Y EUROPEA. LAS INICIATIVAS REGIONALES**

Si en el pasado (primera mitad del siglo XX) la influencia de los matemáticos españoles en Latinoamérica puede calificarse de importante,<sup>2</sup> debemos reconocer que en los últimos 25 años no ha sido así. El crecimiento notable de la investigación matemática en países como Brasil, Argentina, Chile y México se debe a sus propias dinámicas internas y a sus políticas de cooperación internacional en las que España ha jugado con frecuencia un papel por debajo de lo que podrían haber sido sus expectativas.

Entre los factores que han influido de manera definitiva en este evidente crecimiento está el impacto positivo de centros de referencia como el Instituto de Matemática Pura y Aplicada (IMPA) en Rio de Janeiro, Brasil. El IMPA ha servido para concentrar a un grupo de excelentes investigado-

2 Basta recordar los nombres de Julio Rey Pastor o Lluís Santaló, así como el éxodo republicano con motivo de la Guerra Civil española.

res en algunos campos como Sistemas Dinámicos, Geometría Diferencial o Análisis, que conforman un centro de excelencia internacional. Sus excelentes infraestructuras, que no han cesado de crecer en los años recientes, han formado en los últimos 30 años a jóvenes matemáticos no sólo brasileños, sino también de los países del entorno. Este ejemplo se ha continuado con el desarrollo de otros polos de excelencia en matemáticas, como ocurre en Sao Paulo o Campinas, y también en el área de la Matemática Aplicada y Computacional. En ésta se ha realizado una importante apuesta e inversión al trasladar el Laboratorio Nacional de Ciencias de la Computación (LNCC) a Petrópolis, con unas importantes instalaciones e infraestructura, lo cual ha impulsado con fuerza la investigación en dicha área.

El ejemplo brasileño de centros de investigación capaces de dinamizar la investigación de un país ha sido seguido en otros países. Por ejemplo, el Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Universidad de Chile, creado hace 20 años y dedicado a las matemáticas aplicadas y a los proyectos interdisciplinarios, contribuye a la transferencia de la investigación matemática a los sectores industriales más importantes en Chile. Los casos de Brasil y Chile son singulares también por el extraordinario peso que las matemáticas tienen en su sistema I+D+i, lo cual es fruto no sólo de un esfuerzo colectivo en investigación en el área, sino del empeño personal de unos pocos matemáticos que han sabido conjugar su actividad científica con una gestión eficaz en el más alto nivel.

México cuenta también con importantes iniciativas, como el Instituto de Matemáticas de la UNAM, con una sede también en Cuernavaca, o el Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT), de Guanajuato, con investigadores potentes, muchos de ellos formados en Estados Unidos de América, y que desarrollan importantes programas de investigación y formación de jóvenes investigadores. Pero el impacto de las matemáticas en el sistema nacional de I+D+i no es comparable a los casos ya mencionados de Brasil o Chile.

Argentina es, sin duda, otro país que debe mencionarse cuando se habla de investigación matemática en Latinoamérica, pues es cuna de algunas de las escuelas más sobresalientes del siglo XX. Como ejemplo basta mencionar la persona y obra de Alberto Calderón.<sup>3</sup> De manera sistemática, en las últimas décadas en Argentina han nacido matemáticos que ocupan cátedras en los centros de élite mundial; además, el país ha sido capaz de retener a algunos de sus mejores investigadores. Sin embargo, la inestabilidad política y económica no han constituido un elemento que haya contribuido a la consolidación de la disciplina en el país. De todas formas, los síntomas actuales son buenos y es previsible una mejora significativa en los próximos años. La escuela de Calderón, a quien antes mencionamos, ha sido justo un elemento cohesionador de la matemática española y argentina, mismas que han estado estrechamente unidas en las últimas tres décadas por diversos centros y, en particular, por el Departamento de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Madrid.

España ha tenido una presencia y una relación desiguales en Latinoamérica. El entusiasmo y la dedicación de un puñado de matemáticos españoles

han permitido establecer una cooperación estable con muchos centros latinoamericanos, pero esto no ha sido acompañado de políticas sostenidas que hubieran permitido que estas cooperaciones cristalizaran en iniciativas conjuntas de más calado, como es el caso de otros países, entre ellos Francia, que han desarrollado en la región las actividades que uno esperaría de España. Iniciativas como las Unidades Mixtas de Investigación del CNRS con el IMPA o el Centro de Modelamiento Matemático de Chile son un claro ejemplo de lo que España podía hacer y no ha hecho. La política española en Latinoamérica se ha caracterizado en este ámbito por grandes dosis de entusiasmo por la cooperación pero una escasa organización, lo cual, al cabo de varias décadas, ha contribuido a que los resultados en nivel institucional hayan sido escasos. En este ámbito sería imprescindible una mejor articulación de las iniciativas españolas, en las que el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) español podría jugar un papel similar al que realiza el CNRS francés. Pero para eso es imprescindible una mayor presencia de las matemáticas en el propio CSIC, tema al que aludiremos más adelante.

## LAS SOCIEDADES MATEMÁTICAS Y LA PARTICIPACIÓN EN IMU

En 2003 se realizó en la Universidad de Santiago de Compostela una reunión de sociedades matemáticas latinoamericanas organizada por la Real Sociedad Matemática Española.<sup>4</sup> El objetivo era conocer de primera mano, desde la base, la problemática matemática en Latinoamérica, que a veces aparece oculta tras las declaraciones políticas en las cumbres iberoamericanas.

Casi todos los países latinoamericanos poseen al menos una sociedad matemática. Destacan en el panorama, por su mejor estructuración interna, las siguientes: la Unión Matemática Argentina, la Sociedad Brasileña de Matemáticas, la Sociedad de Matemática de Chile y la Sociedad Matemática Mexicana. Estas sociedades organizan actividades diversas, incluyendo congresos, de manera regular.

3 Véase el más reciente número especial de la revista brasileña *Computational and Applied Mathematics* ([www.scielo.br/cam](http://www.scielo.br/cam)), en la que se celebra el vigésimo quinto aniversario de la conferencia de Calderón en el LNCC, en su antigua sede de Rio de Janeiro, y su artículo sobre el problema inverso para el problema de Dirichlet que revolucionaron un área de tanta trascendencia analítica y aplicada.

4 Luis A. Cordero, Marisa Fernández, Manuel de León, Enrique Zuazua (eds.), *Análisis y perspectivas de la colaboración en Latinoamérica en matemáticas*, Publicaciones de la RSME, Madrid, 2004 (xx + 248 páginas, ISBN: 84-933610-0-3).

Además, un nuevo agente ha asumido un papel importante en la zona, al pertenecer éstas y otras sociedades a la Unión Matemática de América Latina y el Caribe (UMALCA), que en los últimos años está contribuyendo a la coordinación de actividades de la región.

Una de las actividades de UMALCA son las Escuelas de Matemática de América Latina y del Caribe (EMALCA). Las EMALCA fueron creadas por decisión de la Segunda Asamblea General de UMALCA en 1998. El objetivo principal era contribuir al desarrollo de las matemáticas en todas las regiones del continente, en especial en América Central y el Caribe, al poner a los jóvenes en contacto con temas relevantes de interés actual y estimular a los más destacados, entre éstos, a continuar estudios de posgrado.

En una primera etapa, las EMALCA se realizaron de manera alternada en México y en Venezuela, con la participación de estudiantes de países de la región. Así, tuvieron lugar las siguientes:

- Primera EMALCA - Cuernavaca, México, 28 de agosto a 6 de septiembre, 2001.
- Segunda EMALCA - Mérida, Venezuela, 8 a 14 de septiembre, 2002.
- Tercera EMALCA - Morelia, México, 19 a 28 de agosto, 2003.
- Cuarta EMALCA - Mérida, Venezuela, 5 a 11 de septiembre, 2004.
- Quinta EMALCA - Guanajuato, México, 1 al 12 de agosto, 2005.
- Sexta EMALCA - Mérida, Venezuela, 3 al 8 de septiembre de 2006.
- Séptima EMALCA - Cuernavaca, México, 2 al 14 de julio de 2007.

Estas EMALCA cuentan con el apoyo del Centre International de Mathématiques Pures et Appliquées (CIMPA), de Niza, para su realización.

Dado el éxito de las actividades desarrolladas en este programa, UMALCA ha decidido aumentar el alcance geográfico del mismo, con miras a convertirlas en un mecanismo más efectivo para el desarrollo de las matemáticas en todo el continente. De esta forma, y a partir de 2004, se decidió desarrollar EMALCA en otros países de la región con menos desarrollo matemático o que estén en situaciones especiales respecto del desarrollo de la disciplina. Estos eventos se realizan con la participación de estudiantes locales y de países vecinos.

Las actividades de las nuevas EMALCA están dirigidas a estudiantes finales de cursos de grados e iniciales de maestría y cuentan con dos fases:

1. Un mínimo de dos cursos de por lo menos dos semanas de duración, dictados por notorios especialistas de sus respectivas áreas.
2. Informes de los docentes y tutores sobre los alumnos y su posible orientación para estudios posteriores.

Desde 2004, estas nuevas EMALCA, que se añaden a las anteriores, han sido:

- EMALCA Cuba 2004 - La Habana, Cuba, junio de 2004.
- EMALCA Bolivia 2004 - Cochabamba, 31 de mayo al 12 de junio de 2004.
- EMALCA Costa Rica 2005 - San José, 13 al 19 de febrero de 2005.

No cabe duda que esta actividad tendrá a medio plazo un efecto en la mejora de la investigación matemática en Latinoamérica.

## ORGANIZACIÓN DE GRANDES EVENTOS

Latinoamérica ha organizado hasta ahora un gran evento de relevancia mundial en el campo de las matemáticas, las XLVI Olimpiadas Matemáticas Internacionales,<sup>5</sup> en Mérida, Yucatán, México, del 8 al 19 de julio de 2005. Otro gran evento está en camino: la undécima edición del International Congress on Mathematical Education (ICME-11), por celebrarse en Monterrey, México, del 6 al 13 de julio de 2008. Los ICME son los congresos más importantes en el mundo de la educación matemática y se celebran cada cuatro años. Son organizados por la International Commission on Mathematical Instruction (ICMI), una de las comisiones de la International Mathematical Union (IMU). La siguiente es la lista de los ICME anteriores:

- Primer ICME - 1969, Lyon, Francia
- Segundo ICME - 1972, Exeter, Reino Unido
- Tercer ICME - 1976, Karlsruhe, Alemania
- Cuarto ICME - 1980, Berkeley, Estados Unidos de América
- Quinto ICME - 1984, Adelaide, Australia
- Sexto ICME - 1988, Budapest, Hungría
- Séptimo ICME - 1992, Québec, Canadá
- Octavo ICME - 1996, Sevilla, España
- Noveno ICME - 2000, Tokyo/Makuhari, Japón
- Décimo ICME - 2004, Copenhague, Dinamarca

Como se puede observar, en 1996 se organizó en Sevilla, España.

Latinoamérica tiene en este aspecto una aspiración, la celebración por vez primera de un International Congress of Mathematicians (ICM). En 2006, se celebró por primera vez en España (22 al 30 de agosto), y también por primera vez en un país de habla española. La aspiración latinoamericana podría cumplirse en la segunda década del siglo XXI, pero es probable que para ello su nivel de estructuración debería incrementarse.

5 Recordemos que la Olimpiada Matemática Internacional de 2008 se celebrará en España.

Por otra parte, la presencia de Latinoamérica en IMU es todavía pequeña. Éstos son los países en los que se indica el grupo al que pertenecen:<sup>6</sup>

- Argentina (Grupo II)
- Brasil (Grupo IV)
- Chile (Grupo II)
- Cuba (Grupo I)
- México (Grupo II)
- Perú (Grupo I)
- Uruguay (Grupo I)
- Venezuela (Grupo I)

Destaca la importante actividad de Brasil, que es el único país en el Grupo IV, y que ha contado con un Presidente de IMU (el profesor Jacob Palis) en el periodo 1999-2003 y un vocal en el Comité Ejecutivo (el profesor Marcelo Viana) en el periodo 2007-2010. También hay representantes latinoamericanos en la Commission on Development and Exchanges de IMU (profesores Graciela L. Boente, Argentina, y Paulo Cordaro, Brasil).

IMU acaba de establecer una nueva figura de país miembro que participe como observador, sin pagar cuota y sin derecho a voto, pero que en un plazo breve podría pasar a formar parte del grupo I. Es una excelente oportunidad para los países con menos desarrollo matemático de Latinoamérica para dar sus primeros pasos en IMU.

### LAS NUEVAS INFRAESTRUCTURAS ESPAÑOLAS

En esta sección describiremos algunas nuevas infraestructuras ya en marcha en España y que pueden contribuir en forma notable a una intensificación de la colaboración con Latinoamérica.

### EL COMITÉ ESPAÑOL DE MATEMÁTICAS (CEMAT, WWW.CE-MAT.ORG)

La representación española en IMU se canaliza por medio del Comité Español de Matemáticas, CEMAT, que incluye a representantes de todas las sociedades matemáticas españolas (Real Sociedad Matemática Española, Sociedad Catalana de Matemáticas, Sociedad Española de Matemática Aplicada, Sociedad de Estadística e Investigación Operativa, Sociedad Española de Investigación en Educación Matemática, Federación Española de Sociedades de Profesores de Matemáticas).<sup>7</sup> También incluye tres representantes del Ministerio de Educación y Ciencia de los ámbitos educativos y de investigación, así como al Presidente de la Conferencia de Decanos de Matemáticas. Así el CEMAT se configura como un excelente foro para el debate y la coordinación de las matemáticas españolas.

El CEMAT se articula en una Comisión Ejecutiva, apoyada por cuatro comisiones que son los correlatos españoles de las correspondientes comisiones de IMU:

- Comisión de Desarrollo y Cooperación
- Comisión de Educación

- Comisión de Historia
- Comisión de Información y Comunicación Electrónicas

La Comisión de Desarrollo y Cooperación (CDC-CEMAT) ha emprendido una importante tarea que se enfoca en dos aspectos: el envío de libros de matemáticas a los países con más dificultades y la puesta en marcha de un *master* en Paraguay, país que no cuenta con ningún doctor en matemáticas. En colaboración con el CIMPA, este *master* conduciría a medio plazo a resolver esta carencia. La CDC-CEMAT, de la mano de su presidenta Marisa Fernández (Universidad del país vasco) y con un equipo de matemáticos comprometidos, desarrolla una gran actividad en España, al contactar con las instituciones españolas que puedan ayudar en sus tareas (Agencia Española de Cooperación Internacional, Fundación Carolina, entre otras) con la ayuda del MEC. También algunas universidades (como la Universidad Complutense de Madrid, por citar un ejemplo) colaboran en estas tareas.

Por otra parte, la Comisión de Información y Comunicación Electrónicas (CICE-CEMAT), presidida por Enrique Macías (Universidad de Santiago de Compostela) acaba de realizar la digitalización de más de 75 000 páginas de las revistas matemáticas españolas que pueden consultarse en el portal <http://www.dmlc.cindoc.csic.es> de la Biblioteca Digital Matemática de España. Se trata de una aportación española al ambicioso proyecto de la World Digital Mathematics Library. Este proyecto ha sido posible con la colaboración del Centro de Documentación Científica y Técnica (CINDOC, CSIC) y la ayuda económica del MEC. El proyecto se quiere continuar y ampliar con la digitalización de revistas más antiguas, así como de revistas matemáticas de Latinoamérica una vez establecidos los acuerdos correspondientes.

### I-MATH (WWW-I-MATH.ORG)

Ingenio MATHEMATICA (i-MATH) es un proyecto de investigación singular para el periodo 2006-2011 que propone un Programa de Actividad Investigadora integral para la matemática española, con el objetivo de promover y ejecutar

6 Los países se clasifican según su desarrollo matemático, del I al V. Este número indica el de los delegados en las Asambleas Generales.

7 También se incluye, aunque no en el Comité Ejecutivo, la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas.

actuaciones estratégicas de ámbito estatal que incrementen de manera cualitativa y cuantitativa el peso de las matemáticas en el panorama internacional y en el sistema español de ciencia, tecnología, empresa y sociedad.

El i-MATH es una iniciativa subvencionada por el Ministerio de Educación y Ciencia con 7500000 por medio del programa CONSOLIDER-INGENIO 2010.<sup>8</sup> Está estructurada en torno una Entidad Gestora (Universidad de Cantabria), cinco Nodos (CESGA, CIEM, CRM, ICMat e IMUB) y un amplio grupo de equipos de investigación que agrupa casi a 95% de los investigadores matemáticos españoles. El proyecto está coordinado por Enrique Zuazua, del nodo ICMat, asistido por un Comité de Dirección y otro de Nodos. Eduardo Casas es el responsable de la Entidad Gestora y Laureano González Vega, el secretario ejecutivo del Consejo de Dirección.

Este proyecto, diseñado en principio como un proyecto eminentemente científico, tal y como reza su memoria, es el resultado del esfuerzo de una parte importante de la comunidad matemática española para materializar la iniciativa del Centro Nacional de Matemáticas (CNMat) recogida en el Plan Nacional de I+D+i 2004-2007.

El proyecto comenzó el 3 de octubre de 2006 y desde entonces se han puesto en marcha diversas iniciativas centradas, en esencia, en cinco aspectos: la financiación de actividades bajo convocatorias competitivas entre los miembros del proyecto, el desarrollo de los cuatro mapas sobre la situación de la matemática española que permitirá incidir en sus debilidades, la dinamización de la Oficina de Prensa, la puesta en marcha de la Casa Virtual de las Matemáticas y el desarrollo de un convenio de colaboración con el Massachusetts Institute of Technology (MIT) para poder recibir estudiantes que investiguen en los distintos grupos de i-MATH.

Las convocatorias competitivas en el seno del propio proyecto i-Math, además de tener por objeto gestionar y distribuir de manera eficiente los fondos disponibles, también servirán de base para realizar un continuo ejercicio de prospectiva.

En la actualidad la Oficina de Prensa es coordinada por el Nodo ICMat y ha procedido a la creación de un apartado en la página web de i-MATH, en la que se recogen las noticias relacionadas con las matemáticas. Por último, en estos momentos se procede a la creación de la Casa

Virtual de las Matemáticas, misma que albergará contenidos de suma utilidad para la comunidad matemática española y en general de habla hispana: listado de institutos de matemáticas internacionales, repositorio de *software* matemático, punto de acceso a bases de datos interesantes para los matemáticos, información de acceso compartido y modificable, etc.; además de una agenda sobre eventos matemáticos que ya es de acceso público.

## INSTITUTO DE CIENCIAS MATEMÁTICAS ICMAT

El Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, es el mayor Organismo Público de Investigación de España. Participa de manera activa en la política científica de todas las comunidades autónomas mediante sus casi 120 centros de investigación y abarca todos los campos del conocimiento, desde la investigación básica hasta los más avanzados desarrollos tecnológicos. Superando una laguna histórica, el CSIC ha acordado incluir en su Plan Estratégico la creación de un instituto dedicado a las matemáticas, el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMat), que es un instituto mixto en colaboración con las tres universidades más importantes de Madrid: Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Universidad Complutense de Madrid (UCM) y Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

Un instituto del CSIC (mixto o propio) se organiza en departamentos y sus órganos de gobierno son: director, vicedirector, gerente, Junta de Gobierno y Claustro Científico. El director del ICMat es nombrado por el presidente del CSIC y los tres rectores, y propuesto por el Claustro y la Junta de Gobierno. Bajo la nueva figura de Agencia Estatal, se pretende que los directores de los institutos del CSIC tengan una gran implicación en la gestión científica del instituto, al estilo de los centros de investigación internacionales.

El ICMat tendrá su sede definitiva en el Campus de la UAM en Cantoblanco. El edificio incluye una zona compartida con el Instituto de Física Teórica (IFT), instituto mixto del CSIC con la UAM, y dos alas, una para cada instituto. El edificio contará con casi 13 000 metros cuadrados: 4 000 para cada instituto, y más de 4 000 para las zonas compartidas, entre ellas un salón de actos para 250 personas, un laboratorio de computación, así como una biblioteca y centro de documentación matemática. El costo del edificio es de unos 17 millones de euros, albergará a cerca de 200 investigadores de matemáticas, y se convierte así en la infraestructura matemática más importante de España en el ámbito de las ciencias matemáticas. La construcción se iniciará en septiembre de 2007 y se espera inaugurar el edificio en la primavera de 2009.

En 2005, todos los institutos del CSIC elaboraron un plan estratégico que fue evaluado por comisiones internacionales nombradas por la European Science Foundation. El ICMat es fruto de las recomendaciones del panel de matemáticas, presidido por el profesor Jean Pierre Bourguignon, director del IHES.

La principal fortaleza del ICMat se basa en el proceso de selección rigurosa de sus investigadores, con una gran cantidad de jóvenes investigadores del máximo nivel. No cabe duda de que el ICMat se convertirá en breve en el referente español en la disciplina, y coordinará sus esfuerzos y programas con el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados de Matemáticas y otros centros del Estado.

8 El Programa Consolider es muy similar al puesto en marcha en Alemania para identificar *clusters* de excelencia.

La intención del ICMat es firmar convenios de cooperación con los centros similares en Latinoamérica para organizar programas de intercambios y compartir los esfuerzos de investigación

### IMDEA (WWW.IMDEA.ORG)

La necesidad de impulsar institutos de matemáticas con diversos formatos que propicien la inserción de esta disciplina en el ámbito de la I+D+i y aumenten su impacto social es universalmente reconocida. Por ello en muchos países de nuestro entorno europeo y de América del Norte, hace años (y, en algunos casos, incluso décadas) se decidió promover la creación de institutos de matemáticas, en especial los orientados a los aspectos más computacionales y aplicados. En efecto, a las matemáticas se les pide de manera creciente cuantificar sus respuestas, y hacerlas accesibles y útiles al resto de la sociedad. Esta tarea es hoy posible gracias a las computadoras, al Análisis Numérico y a la Computación, pero exige un alto nivel de especialización y el desarrollo de instrumentos y laboratorios adecuados.

La Comunidad de Madrid (CM), en vista del extraordinario desarrollo económico de la región y la existencia de masa crítica suficiente en el entorno académico madrileño, consideró en otoño de 2005 que se daban las condiciones para crear un nuevo Instituto de Matemáticas de la CM, en el ámbito del IMDEA: Instituto Madrileño de Estudios Avanzados. IMDEA es una red de nueve institutos entre los que, además del de matemáticas, participan IMDEA Agua, IMDEA Alimentación, IMDEA Biomedicina, IMDEA Ciencias Sociales, IMDEA Energía, IMDEA Materiales, IMDEA Medicina regenerativa, IMDEA Nanociencia, IMDEA Redes e IMDEA *Software*. La web de esta red de institutos es [ww.imdea.org](http://www.imdea.org).

El Instituto IMDEA Matemáticas desempeña una función complementario de otras importantes iniciativas, como la del ICMat arriba mencionada, con la que se coordina. En la actualidad es dirigido por Enrique Zuazua (UAM, director), y Ángel Sánchez (UC3M, director adjunto). Asimismo, cuenta con un director de Innovación Tecnológica (Francisco Palacios) y un coordinador de Proyectos (Miguel A. Benítez). A pesar de su reciente creación, ha suscrito ya un importante convenio de cooperación con AIRBUS para el desarrollo de nuevas herramientas matemáticas y computacionales para el diseño óptimo en aeronáutica.

El Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Matemáticas (IMDEA Matemáticas) es una organización sin ánimo de lucro, constituida como fundación, cuyo fin es la realización de investigaciones avanzadas en matemáticas e impartir enseñanzas de posgrado, con la aspiración de alcanzar niveles competitivos en el ámbito internacional. Su sede provisional se encuentra en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid y se está realizando la planificación de una sede estable; se ha realizado una llamada internacional abierta para la incorporación de personal investigador.<sup>9</sup>

El patronato de IMDEA-Matemáticas, presidido por el profesor Juan José Manfredi, director del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Pittsburgh, Estados Unidos de América, es su máximo órgano de gobierno, representación y administración. En el patronato participan los representantes de la Comunidad de Madrid, de las universidades con más fuerte

tradición en investigación matemática de la región, del CSIC, de diversas empresas y expertos independientes, así como un grupo de investigadores internacionales con una trayectoria de excelencia, como son Philippe Tondeur (Illinois, Estados Unidos de América), Pierre Louis Lions (Collège de France, París), Ma Zhi-Ming (Academia de Ciencias Matemáticas, China) y el doctor Jacob Palis (IMPA, Brasil).

### CENTRO INTERNACIONAL DE ENCUENTROS MATEMÁTICOS, CIEM

El CIEM es una iniciativa conjunta de la Universidad de Cantabria y del Ayuntamiento de Castro Urdiales cuyo objetivo fundamental y fundacional es promover la investigación matemática de calidad, tanto en sus aspectos más básicos como en los aplicados y computacionales, prestando especial atención a la investigación multidisciplinar y pluridisciplinar, mediante el apoyo a la celebración de encuentros y reuniones entre investigadores.

El Centro Internacional de Encuentros Matemáticos está abierto a que todos aquellos colectivos interesados en organizar un encuentro, un congreso, una reunión, etcétera, soliciten la posibilidad de que el Centro acoja dicho evento en su programa anual y, con ello, apoye tanto en lo logístico como en lo económico a su organización. Dichos eventos deberán tener las siguientes características:

- Su temática ha de estar relacionada con las matemáticas o campos afines y su calidad debe ser avalada por los miembros de los comités científico y organizador.
- Su duración, de preferencia, debe ser de una semana (de lunes a viernes).
- La calidad y viabilidad de las propuestas es siempre analizada por el Consejo Científico del CIEM.

El CIEM aspira a convertirse en un agente internacional al promover y acoger encuentros matemáticos de la máxima calidad. Los encuentros se celebran en el Centro Cultural y de Congresos "La Residencia", ubicado en Castro Urdiales, que cuenta con sala de computación y de conferen-

<sup>9</sup> Disponible en la web:

<http://www.imdea.org/OferentasdeEmpleo/InternationalCall/Application/tabid/510/Default.aspx>

cias. Las actividades se iniciaron el 1 de enero de 2006, y hasta la fecha unos 1500 matemáticos de todo el mundo han participado en seminarios, congresos y escuelas.

La dirección y gestión del CIEM se realiza mediante la siguiente estructura orgánica: director, Consejo de Dirección y Consejo Científico.

El director del CIEM es un matemático, profesor y/o investigador, nombrado por el rector de la Universidad de Cantabria. El Consejo de Dirección está formado por el director del CIEM, quien lo preside, un representante del Ayuntamiento de Castro-Urdiales, un representante de la Universidad de Cantabria y el presidente del Comité Español de Matemáticas. En la actualidad el Consejo de Dirección del CIEM está integrado por:

- Laureano González Vega (director)
- Concepción Carranza (concejala de Cultura del Ayuntamiento de Castro Urdiales)
- Eduardo Casas Rentería (representante de la Universidad de Cantabria)
- Manuel de León Rodríguez (presidente del Comité Español de Matemáticas).

### EL CENTRE DE RECERCA MATEMÀTICA (CRM)

Por último, queremos señalar una infraestructura existente ya desde hace más de 20 años en nuestro país. El Institut d'Estudis Catalans creó, en 1984, el Centre de Recerca Matemàtica (CRM, (<http://www.crm.es>), con el objetivo principal de proveer a los matemáticos catalanes un espacio que estimulara la mejora, cuantitativa y cualitativa, de la investigación matemática en Cataluña. En 2002, el CRM se convirtió en un consorcio entre el Institut d'Estudis Catalans y el gobierno catalán.

Para conseguir este objetivo, el CRM invita a matemáticos de alto nivel para realizar visitas de investigación y facilita el contacto científico entre los mismos y los jóvenes investigadores locales, con conferencias, cursos avanzados, seminarios, semestres temáticos, y la publicación de una serie de *preprints*.

El CRM es miembro de ERCOM (European Research Centres on Mathematics), del EPDI

(European Post-doctoral Institute for the Mathematical Sciences), y de la ACER (Associació Catalana d'Entitats de Recerca).

El CRM está regido por un Consejo en el que intervienen diferentes instituciones catalanas, y por un equipo directivo que se renueva cada cuatro años; este último lo conforman:

- Joaquim Bruna, Universitat Autònoma de Barcelona (director)
- Carles Casacuberta, Universitat de Barcelona
- Marta Sanz-Solé, Universitat de Barcelona
- Joan Solà-Morales, Universitat Politècnica de Catalunya

El director honorario es Manuel Castellet, promotor del CRM y su director durante casi 20 años.

El CRM tiene sus locales en un edificio de la UAB, con un total de 1 225 metros cuadrados, que alojan su secretaría, despachos para investigadores, sala de computación y dos salas para conferencias (con capacidad para 98 y 24 personas, respectivamente). Además, proporciona a los visitantes servicio de alojamiento, bien en apartamentos o bien en residencia de la universidad. Los visitantes tienen acceso a la biblioteca de la UAB.

El CRM canaliza la cooperación con Latinoamérica de investigadores de las universidades del entorno, que es muy abundante en temáticas como los Sistemas Dinámicos y la Mecánica Celeste. Remitimos a su página web para un mejor conocimiento de sus actividades.

### CONCLUSIONES

Como hemos visto, en España se desarrollan iniciativas ambiciosas que, además de desarrollar e impulsar la investigación matemática en nuestro país, pueden permitir establecer una cooperación más estable con los países más potentes de Latinoamérica en matemáticas (de manera fundamental, Brasil, Argentina, México y Chile) y colaborar con ellos en el desarrollo de los más débiles en la disciplina.

Para ello, España debe dotarse de las estructuras que le permitan asumir un papel de nación líder en la disciplina matemática. Desde el Comité Español de Matemáticas, CEMAT, se está promoviendo la firma de un convenio del Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación y el Ministerio de Educación y Ciencia con el Centre International de Mathématiques Pures et Appliqués (CIMPA) (<http://www.cimpa-icpam.org/>), con el fin de canalizar de una manera estable las actividades de cooperación de los matemáticos españoles, sobre todo en el ámbito latinoamericano.

Otras actuaciones deben venir de las nuevas infraestructuras a las que antes hacíamos alusión junto con otras, también de reciente creación, como el Centro Internacional de Encuentros Matemáticos de Cantabria (CIEM), así como de alguna de las ya existentes.

Pero, para ello, es necesario que se articule una mayor coordinación de la propia matemática española. Habrá que esperar aún unos años para que esto ocurra. En efecto, a pesar de los esfuerzos que se han realizado en los últimos años, hay tareas importantes aún pendientes, como la inminente creación de la Agencia Estatal para la Evaluación, Financiación

10 No olvidemos la especial división administrativa de España en Comunidades Autónomas, que exige una buena coordinación entre las diferentes agencias financiadoras de I+D+i, tarea todavía pendiente, y que de no hacerse con carácter urgente debilitará la competitividad española en el tema.

y Prospectiva, que debería asumir el papel que en otros países europeos –como Francia, Inglaterra o Alemania– desarrollan los Research Councils o las Fundaciones Nacionales para la Ciencia.<sup>10</sup> En dichos países europeos, estas instituciones realizan una labor seria de impulso a las matemáticas que en España queda con frecuencia bajo la responsabilidad de los propios investigadores, como demuestra la iniciativa del proyecto i-Math al que antes aludíamos. Las matemáticas españolas tienen también mucho por hacer para abrirse a otros campos y a una interacción más fructuosa con la industria y, de nuevo, esto se hace con frecuencia desde la iniciativa individual y con escasos niveles de solidaridad en un sistema más acostumbrado al reparto de beneficios que a la generación de riqueza. Sin duda alguna, los años venideros serán fructuosos pero, para ello es imprescindible que se alcance una cierta estabilidad en el sistema español de gestión de la ciencia, sometido con excesiva frecuencia a los cambios de responsables y de rumbo que propician el oportunismo más que los esfuerzos sostenidos y la visión estratégica. La ciencia, en particular las matemáticas y la cooperación Latinoamérica-España, requieren políticas estables y sosegadas con las vistas puestas en la calidad y en el futuro.







# ÓPTICA Y FOTÓNICA: CONTEXTO IBEROAMERICANO

MARÍA LUISA CALVO, ÁNGELA GUZMÁN Y LLUIS TORNER

Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas,  
Universidad Complutense de Madrid/Profesora Emérita de la Universidad  
Nacional de Colombia/ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas,  
Universidad Politécnica de Cataluña, Parque Mediterráneo de la Tecnología

LA ÓPTICA ES LA DISCIPLINA CIENTÍFICA DEDICADA A LA GENERACIÓN, TRANSMISIÓN, detección, control y manipulación de luz. Como es bien conocido, de acuerdo con la formulación de la Física Cuántica a principios del siglo XX, en su nivel más elemental la luz está compuesta por entidades elementales llamadas fotones. La actividad educativa y de investigación en Óptica en varios países Iberoamericanos es intensa y de relevancia internacional. Esta actividad está fraccionada y necesita un apoyo decidido de las entidades responsables, así como una atención prioritaria de las instituciones y empresas privadas que pueden beneficiarse del extraordinario potencial de las tecnologías que nos ocupan. En este artículo presentamos una visión breve de la temática. Discutimos el contexto educativo a escala global, así como la contribución de las sociedades profesionales y organismos internacionales de la temática en el mundo, con especial énfasis en el contexto iberoamericano. Finalmente, presentamos una discusión breve de los programas de cooperación existentes entre los países iberoamericanos.

MARÍA LUISA CALVO PADILLA ES DOCTORA EN CIENCIAS POR LA UNIVERSIDAD DE Paris VI (Francia, 1971) y doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (UCM, España, 1977). Desde 1999 es catedrática de óptica por la UCM. Actualmente es Directora del Departamento de Óptica de UCM. Dirige el Grupo Interdisciplinar de Computación Óptica (GICO-UCM). Desarrolla investigación científica en nuevos materiales holográficos vidrios fotopolímeros, procesado óptico y digital de la información, almacenamiento holográfico de datos y óptica electromagnética. Autora de más de 120 artículos científicos, participa como conferenciante invitada en centros de investigación en el mundo. Coautora de libros de texto sobre óptica avanzada. Desde 2002 es Secretaria General de la Comisión Internacional de Óptica (ICO), organismo asociado al Internacional Council of Science (ICSU) y representa los intereses de la óptica y la fotónica a nivel internacional. ICO tiene actualmente 50 comités territoriales distribuidos en todo el mundo.

ÁNGELA M. GUZMÁN ES FÍSICO, M.Sc. Y PROFESORA Emérita de la Universidad Nacional de Colombia. Realizó su doctorado en el Instituto Max Planck de Optica Cuántica y se doctoró en la Universidad Ludwig Maximilian, Munich (1984). Ha sido distinguida con el Premio "Academia de Ciencias del Tercer Mundo" en Colombia (1988) y el Premio "Sarwar Razmi 1992-1993" del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP) en Trieste, Italia. Presidió el Consejo Internacional de la Sociedad Americana de Óptica (OSA) y sirvió como Miembro de su Mesa Directiva en el periodo 2003-2004. Recientemente se vinculó al Departamento de Física de Florida Atlantic University y en septiembre recibirá la distinción de OSA Fellow por sus contribuciones a la óptica cuántica y atómica, y a la promoción de la óptica en países en desarrollo. Actualmente y hasta el 2008 es Vicepresidente de la Comisión Internacional de Óptica (ICO).

LLUIS TORNER ES LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICAS por la Universidad Autónoma de Barcelona y Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña. Actualmente, Catedrático de la Universidad Politécnica de Cataluña, y Director fundador del ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas. Investigador post-doctoral en varias Universidades y centros de investigación de Estados Unidos. Investigaciones de su grupo han sido seleccionadas para *Optics in the Year* en los años 1995, 1997, 1999, 2001, 2002, 2003 y 2006. Elegido Fellow de la Optical Society of America en el año 2000.

# ÓPTICA Y FOTÓNICA: CONTEXTO IBEROAMERICANO

MARÍA LUISA CALVO, ÁNGELA GUZMÁN Y LLUIS TORNER

Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas,  
Universidad Complutense de Madrid/Profesora Emérita de la Universidad  
Nacional de Colombia/ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas,  
Universidad Politécnica de Cataluña, Parque Mediterráneo de la Tecnología

## 1. INTRODUCCIÓN

LA ÓPTICA ES LA DISCIPLINA CIENTÍFICA DEDICADA A la generación, transmisión, detección, control y manipulación de luz. Como es bien conocido, de acuerdo con la formulación de la Física Cuántica a principios del siglo XX, en su nivel más elemental la luz está compuesta por entidades elementales llamadas fotones. Durante los últimos años, en algunos círculos científicos e industriales se ha popularizado el uso del término *fotónica* para describir a veces las partes más aplicadas, a veces toda la disciplina. Aquí vamos a usar indistintamente los dos términos ya sea juntos o separados, para referirnos siempre al conjunto de la temática en su sentido más amplio posible: La ciencia y la tecnología de la luz, y sus aplicaciones industriales.

La actividad educativa y de investigación en óptica y fotónica en varios países Iberoamericanos es intensa y de relevancia internacional. Esta actividad con frecuencia está fraccionada y necesita un apoyo decidido de las entidades públicas responsables, así como una atención prioritaria de las instituciones y empresas privadas que pueden beneficiarse del extraordinario potencial de las tecnologías que nos ocupan. Así pues, hemos aceptado con placer la invitación de la Consejería de Educación de la Embajada de España en México de contribuir un breve artículo al respecto en la publicación *"Transatlántica de Educación"*.

En los capítulos 2 y 3 presentamos una visión breve de la importancia de la fotónica como ciencia y tecnología fundamental para el currículo de los estudiantes de ciencias físicas y de diversas ingenierías. Esta importancia viene

motivada por el carácter transversal de las aplicaciones de las tecnologías ópticas a una gran variedad de sectores industriales actuales, así como al fenomenal potencial de crecimiento en el futuro. En el capítulo 4 revisaremos brevemente el contexto educativo a escala global. En el capítulo 5 discutiremos brevemente la contribución de las sociedades profesionales y organismos internacionales a la educación e investigación de la temática en el mundo entero, con especial énfasis en el contexto iberoamericano. Finalmente, en el capítulo 6 presentaremos una discusión muy breve de los programas de cooperación existentes entre los países iberoamericanos.

## 2. LUZ: HERRAMIENTA TRANSVERSAL

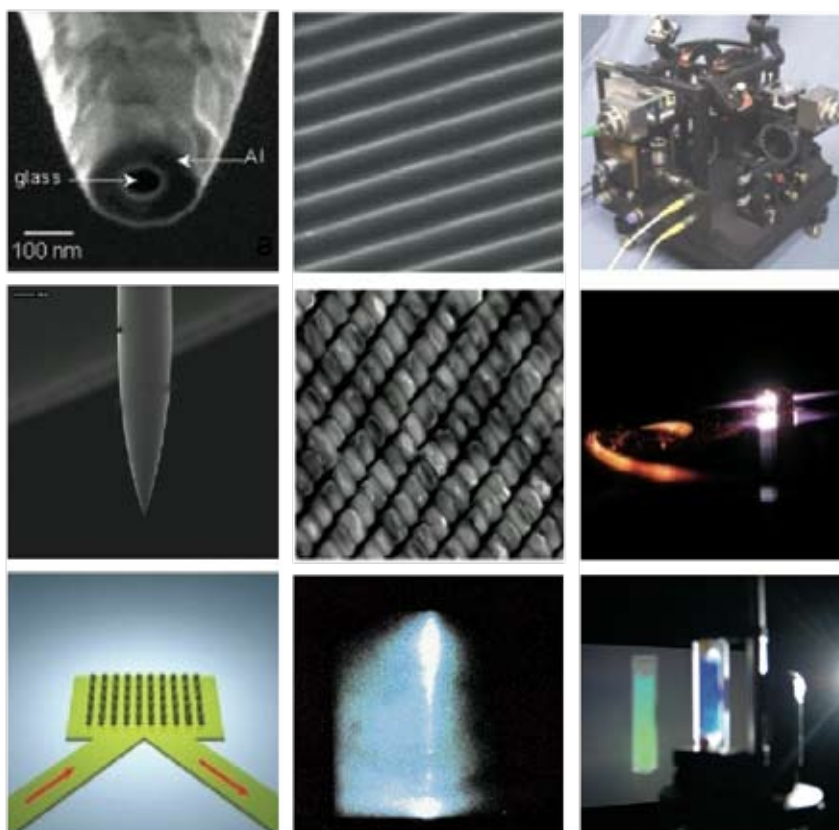
Todas las agencias internacionales coinciden en identificar la fotónica como una de las **tecnologías horizontales clave en el siglo XXI**, y como pilar de los avances científicos y tecnológicos en una gran variedad de áreas de conocimiento, incluyendo las tecnologías de la información y las comunicaciones, las nanotecnologías, las tecnologías energéticas y de medio ambiente, la detección remota, la seguridad, las biotecnologías, ciencias de la vida, y biomedicina, etc. El impacto de las tecnologías fotónicas en el sector industrial es **transversal**:

En **telecomunicaciones y tecnologías de la información**, la fotónica posibilita la transmisión y almacenaje de información a grandes velocidades, a través de enlaces de comunicaciones de ultra-alta capacidad entre continentes, y los sistemas ópticos de almacenamiento de la información. En particular, la transmisión por fibra óptica es la que ha hecho posible el desarrollo de Internet y la herramienta clave para el nacimiento de la Sociedad de la Información.

En **medicina** las aplicaciones de la fotónica son numerosísimas, y crecientes en el tiempo. La fotónica está en la base de técnicas tan importantes de diagnóstico no invasivo, por ejemplo basado en termografía y en técnicas de diagnóstico colorimétrica; constituye en sí misma la base de tratamientos fotodinámicos; y ha hecho posible la utilización del **láser** como instrumento de **microcirugía** ultraprecisa, y como consecuencia, al alcance de la mayoría de los hospitales y centros de salud del mundo.

FIGURA 1.1.

LAS APLICACIONES INDUSTRIALES DE LAS TECNOLOGÍAS FOTÓNICAS SON TRANSVERSALES; ABARCAN UNA VARIEDAD CRECIENTE DE SECTORES INDUSTRIALES, INCLUYENDO LAS TELECOMUNICACIONES, LA DETECCIÓN REMOTA, LAS NANOTECNOLOGÍAS, LAS CIENCIAS DE LA SALUD Y DE LA VIDA, LA SEGURIDAD EN LOS PRODUCTOS DE ALIMENTACIÓN, ENERGÍAS RENOVABLES, CONSUMO, ETC. IMÁGENES CEDIDAS POR EL ICFO-INSTITUTO DE CIENCIAS FOTÓNICAS (BARCELONA, ESPAÑA)



En **biotecnología**, la fotónica ha posibilitado el avance de la **genómica**, a través de sistemas de lectura y descodificación del ADN, y tiene enormes posibilidades de aplicación para la detección de reacciones químicas a escala molecular mediante femto-biología y femto-química. Una de las más prometedoras tecnologías fotónicas puede permitir visualizar procesos bioquímicos celulares de manera no invasiva.

La capacidad de la fotónica para detectar de manera no destructiva está en la base de la **teledetección**, fundamentada en una amplia gama de radares ópticos instalados en sensores de temperatura, presión, humedad, y otros parámetros químicos. Estas posibilidades abren nuevas puertas a la gestión **medioambiental** y a la agricultura. En la misma línea, los dispositivos fotónicos ofrecen prestaciones inigualables en todo tipo de sensores, que son especialmente indicados para entornos hostiles.

Existen también numerosas aplicaciones de la fotónica en **equipos de consumo**, tales como los lectores de CD y lectores de códigos de barras, los aparatos de vigilancia, etc. Asimismo, la fotónica está presente en innumerables **procesos industriales**, desde la inspección y control de calidad hasta las aplicaciones de corte láser especializado, ópticas de precisión para automoción o iluminación, equipos de soldadura y marcaje láser, sistemas láser de perforación de materiales blandos de alta precisión, etcétera.

### 3. LUZ: HERRAMIENTA DE FRONTERA

Con igual o mayor importancia que el carácter transversal de la fotónica aparece el hecho de actualmente la luz láser se ha transformado en una de las herramientas claves para los investigadores que avanzan varios de los límites de la ciencia moderna. Efectivamente, las ciencias y tecnologías de la luz son herramientas imprescindibles para avanzar en las fronteras límite del conocimiento en que la Humanidad tiene exploradores.

Se trata de investigadores que, para ir avanzando, inventan y perfeccionan herramientas revolucionarias: las pinzas más delicadas que se conocen, que se utilizan para atrapar desde partes de células vivas a átomos individuales; la materia más fría que jamás ha existido en el Universo, que forma los fascinantes condensados de Bose-Einstein; los pulsos mas intensos de energía ca-

paces de generar fusión nuclear; los pulsos de luz más breves que los humanos somos capaces de generar, en la escala de los atto-segundos en la que los electrones sufren transiciones atómicas; las imágenes más nítidas de procesos biológicos *in vivo*; los relojes atómicos más precisos, necesarios para sistemas de sincronización de satélites, tales como los que se utilizan en el Global Positioning System; las balanzas más sensibles, capaces de pesar virus individuales; los experimentos científicos más delicados en distintas ramas de la ciencia; las comunicaciones más potentes, con capacidades prácticamente ilimitadas; los códigos criptográficos más secretos, protegidos por las leyes de la física cuántica etcétera.

Así pues, las tecnologías ópticas y fotónicas son esenciales en los laboratorios científicos más avanzados del mundo. Así como en la mayoría de equipos de precisión científica, tecnológica e industrial utilizados en las diversas ramas de las nanotecnologías, los microsistemas, las terapias no invasivas, los biochips, etc. Se hace pues evidente que un país que desee participar en la generación o en el aprovechamiento de los avances científicos y tecnológicos en toda la amplia área de sectores mencionado necesita un sólido sistema educativo donde las tecnologías de la luz estén bien representadas en distintos currículos de ciencias y de ingenierías, a varios niveles, desde los elementales a los más avanzados.

### LOS CONTEXTOS CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO Y EDUCATIVO EN GENERAL: EL CASO DE LA ÓPTICA Y LA FOTÓNICA

Desde los primeros estudios estadísticos realizados en el pasado s. XX por instituciones de prestigio como la Fundación para la Ciencia en los Estados Unidos de América (National Science Foundation, NSF), ha quedado bien establecida la importancia que en el campo de la formación científica y académica tienen la óptica y la fotónica. Esta presencia primordial se debe de intensificar en el s. XXI. La ciencia de la óptica es una parte integral del amplio espectro de disciplinas científicas que se abordan en la formación de futuros físicos, ingenieros y técnicos de muy diversas áreas que incluyen también estudios de carácter interdisciplinario en el área de la salud, biofotónica, y en otras áreas de creciente interés como las ciencias medioambientales. Ello proporciona una posibilidad de currículo profesional altamente interdisciplinario con el reto que

ello supone cuando se busca una especialización de calidad y que pueda ser aceptada de forma inmediata en el mercado de trabajo.

Una idea de la alta velocidad de desarrollo de la óptica y la fotónica se obtiene del dato proporcionado por Optoelectronics Industry Development Association (OIDA) que predice que el mercado de la optoelectrónica crecerá 10% anual de forma que para el año 2013 el volumen de negocio se aproximará a 500.000 millones de dólares USA.

Para tener una visión de conjunto del contexto educativo en el que se desarrollan las enseñanzas de la óptica y la fotónica se estudia su implantación en las universidades y centros de formación de países que pueden considerarse como líderes actuales de estas áreas. Para ello se pueden estimar datos asociados a las variaciones anuales en los índices de la producción científica y tecnológica.

Existe, además, una variedad de opciones en la formación de futuros tecnólogos debido a las distintas tradiciones en regiones geográficas diversas y que han influido en el posterior desarrollo, oferta y demanda de estas enseñanzas. También, hay una conexión directa entre el creciente desarrollo de tecnologías ópticas y fotónicas, su inclusión en la vida diaria en una sociedad avanzada y la necesidad de formar profesionales capaces de abordar nuevas soluciones técnicas en un mundo fuertemente competitivo.

Con estas coordenadas de partida se hace necesario definir ciertas áreas geográficas a partir de las cuales se pueden deducir unas conclusiones específicas sobre el contexto en estudio. Para entender la enorme diversidad que implica este análisis podemos poner el ejemplo del acceso a Internet en el mundo actual. En los países del este asiático más 70% de los usuarios está comprendido entre los 21 y los 35 años, un rango de edad que corresponde a etapas de formación y de orientación profesional. Es fácil entender que la globalización no conduce directamente a una homogenización de recursos educativos ya que estos interfieren con unas imperativas necesidades individuales que aseguren una calidad de vida razonable. En opinión del economista americano Paul Krugmann, la globalización está ligada al mantenimiento de la desigualdad económica, afectando en especial a los países en vías de desarrollo. Un indicador que puede ayudar a obtener una visión del grado de desarrollo es el llamado índice Gross Domestic Product (GDP), que revela la relación entre la región geográfica y el desarrollo económico. La figura 4.1 muestra el mapa mundial con los indicadores GDP [Gallup et al., 1999]. De esta forma podremos extraer datos comparativos en: a) Europa, Asia-Pacífico, América del Norte (continente americano), Norte de África, como sur del continente americano y b) África sub-Sahariana, Asia Central y parte de la región del Caribe del continente americano. Denotaremos que esta subdivisión permite establecer una primera aproximación del desarrollo y oferta de programas de formación tecnológica en óptica y fotónica en el mundo, donde un porcentaje, que puede llegar a 90%, se encontraría localizado en las zonas mencionadas en a). Para apoyar esta tesis se muestran datos adicionales en las figuras 4.2-4.3 obtenidos de organizaciones internacionales como la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y OPERA 2015.

En la figura 4.2a se muestra una estadística publicada por la OCDE con datos de la evolución en el número de investigadores científicos en países de la OCDE desde 1993 hasta 1999.

FIGURA 4.1.

MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA SEGÚN EL ÍNDICE GDP QUE RELACIONA LA REGIÓN GEOGRÁFICA Y EL DESARROLLO ECONÓMICO. LAS ZONAS MENOS COLOREADAS CORRESPONDEN A AQUELLAS QUE DISPONEN DE MENOS RECURSOS Y TIENEN UNA MENOR DENSIDAD DE POBLACIÓN [FUENTE: GALLUP ET AL., 1999]

## GDP Índice

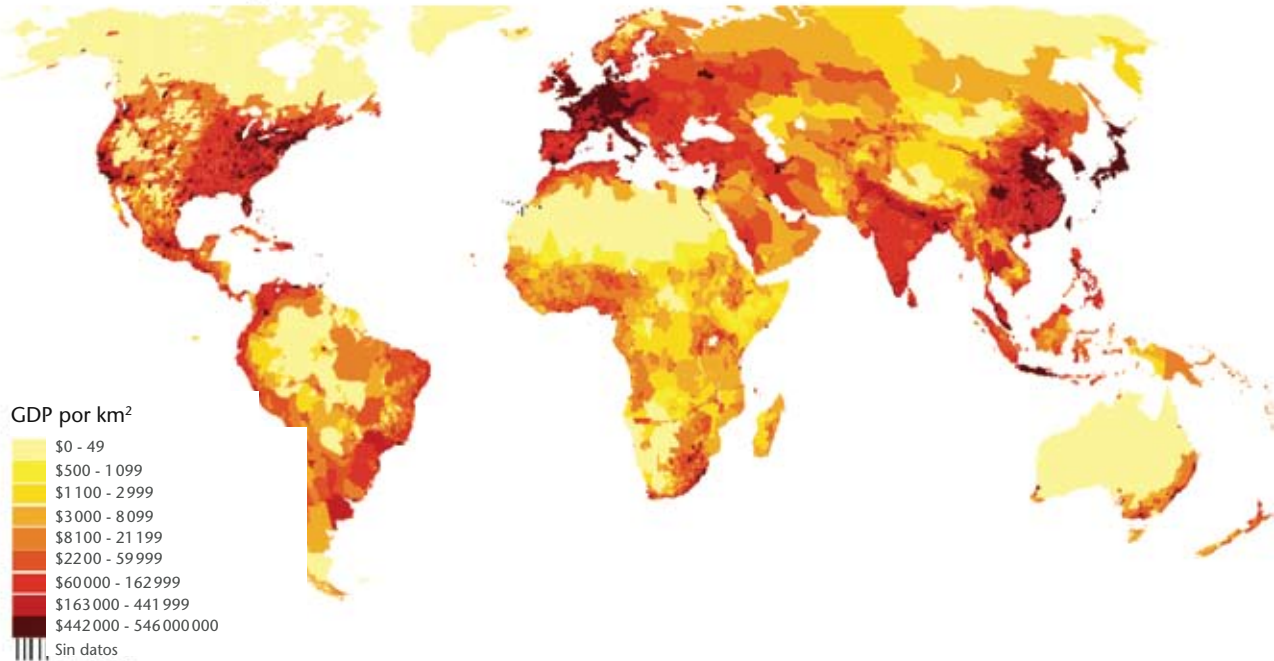


FIGURA 4.2.

ESTADÍSTICAS PROPORCIONADAS POR LA OCDE CON DATOS SOBRE EL VOLUMEN DE FUERZA LABORAL GLOBAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA (PERIODO 1993-1999). A) EVOLUCIÓN DE LA FUERZA LABORAL GLOBAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN PAÍSES DE LA OCDE. B) DISTRIBUCIÓN GLOBAL DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR (FUENTE: ROBERT BARRO Y JONG-WHA LEE, SCIENCE AND ENGINEERING INDICATORS, 2006)

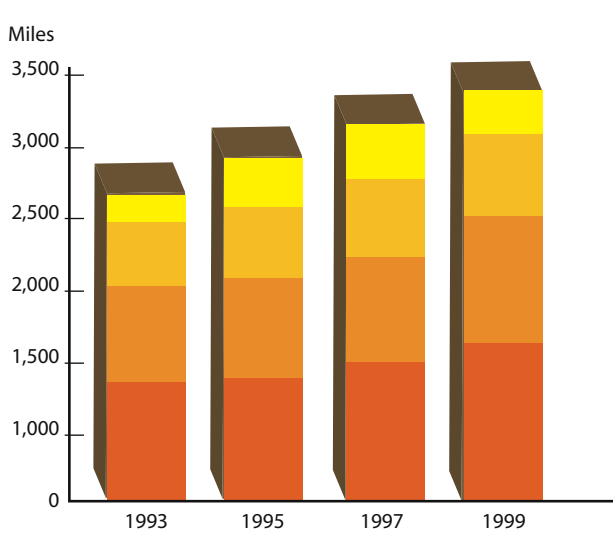


Figura A

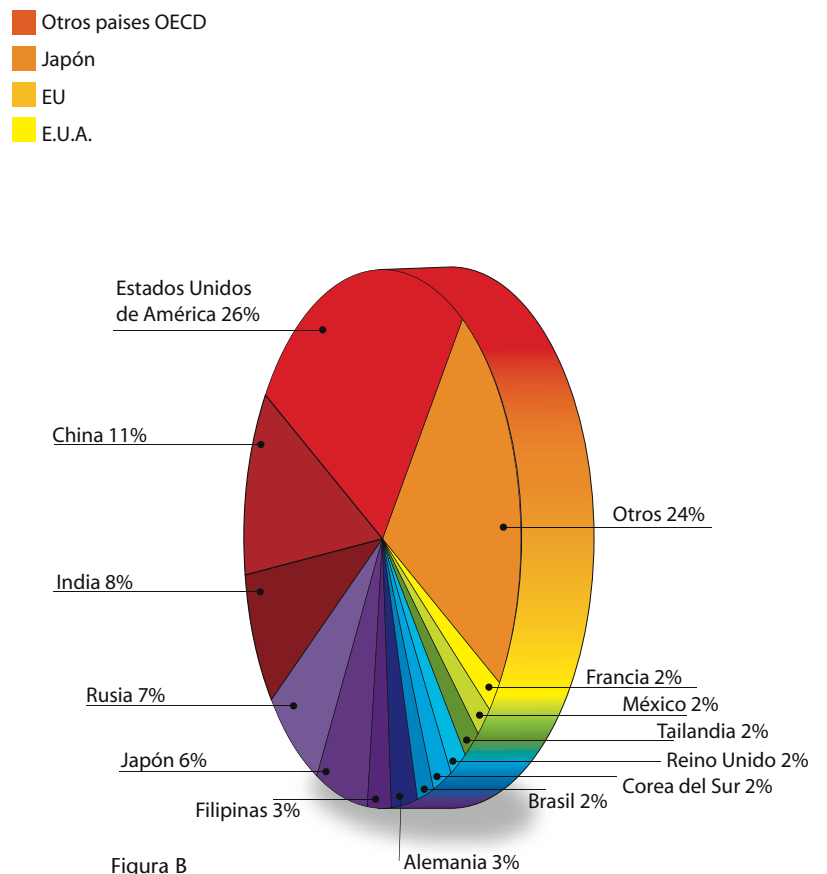


Figura B

Se observa una evolución sostenida en el número de investigadores en los que se considera igualmente a ingenieros en ramas científicas. Los países de la OCDE que no corresponden a Japón, Unión Europea (25 países) y Estados Unidos presentan un crecimiento mayor en este periodo. Estos datos proporcionan una medida directa de la fuerza laboral global existente en ciencia y tecnología. Desde 1993 a 1999 el número total de investigadores (incluyendo todas las especialidades de ciencia, tecnología e investigación biomédica) creció 33,9% (un aumento medio anual de 5%), pasando de aproximadamente 2,46 millones en 1993 a 3,03 millones en 1999. Dentro de este mismo periodo el aumento medio anual en los Estados Unidos de América fue de 4,6%. Si bien la suma de los investigadores de los Estados Unidos de América, Japón y la Unión Europea corresponden aproximadamente a 85,7%, para el año 1999 el mayor índice de crecimiento corresponde a otros países de la OCDE, con 120% de crecimiento, pasando de 196 000 en 1993 a 433 000 de trabajadores en ciencia y tecnología en 1999. Ciertamente en los países que no pertenecen a la OCDE también se ha estimado el porcentaje de trabajadores con un nivel correspondiente a estudios superiores. La figura 4.2b proporciona una estadística de estos datos. Se muestra la distribución global de educación superior (individuos que tenían al menos un grado de diploma o similar) en el año 2000. Alrededor de un cuarto de los graduados como fuerza laboral están ubicados en los Estados Unidos de América. Sin embargo, los siguientes tres países con mayor número de graduados son China, India y Rusia, ninguno de los cuales pertenece a la OCDE.

Un aspecto que debe de ser comentado es que si bien existen países donde un alto número de la población tiene acceso a la educación superior, ello no parece estar siempre en relación directa con la oferta tecnológica, y por ello con el porcentaje del grado de especialización en tecnologías emergentes como la óptica y la fotónica. En un estudio de la evolución anual (desde 1990 a 2003) del porcentaje de empresas dedicadas a desarrollo tecnológico en las cuatro regiones con mayor impacto en el mundo se observa el liderazgo de los Estados Unidos (del orden de 39%) con una tendencia al decrecimiento en la Unión Europea (18% en 2003) y Japón (11% en 2003) y un crecimiento sostenido en Asia-Pacífico (excluyendo Australia) y China. Ambas regiones comparten aproximadamente 12% cada

una en 2003. Se hace notar que países como Rusia, con un alto grado de número de graduados, no aparecen en esta estadística de mayor impacto. Estos países estarían incluidos en 20% restante no contemplado en esta estadística con porcentajes individuales inferiores 11%. Para completar los datos globales que hemos expuesto debemos incluir información relativa al volumen de empresas en óptica y fotónica en regiones geográficas con un desarrollo importante. Se observa que la distribución geográfica del número de compañías operando en óptica y fotónica e implantadas en países de la Unión Europea (27 países), incluyendo cuatro países que han aplicado para ser miembros: Israel, Noruega, Suiza y Turquía. Se observa un liderazgo en Alemania (400 empresas), seguido de Francia (370) y Reino Unido (350).

Como conclusión a este estudio se infiere que la óptica y la fotónica son campos emergentes que tendrán una demanda creciente en el mercado de trabajo en las próximas décadas. Los países en vías de desarrollo deberán hacer frente a un enorme esfuerzo colectivo dentro de la oferta educativa universitaria de especialización tecnológica si quieren participar, en pie de igualdad, con países en los que la creciente demanda de tecnología de última generación está generando nuevas ofertas educativas, en la forma de másteres y estudios de segundo y tercer ciclo con contenidos dirigidos a una formación científica aplicada con amplia proyección industrial.

## 5.- LA CONTRIBUCIÓN DE LAS SOCIEDADES PROFESIONALES Y ORGANISMOS INTERNACIONALES A LA EXPANSIÓN DE LA ÓPTICA Y LA FOTÓNICA

El mundo de la ciencia mantiene una estructura en cierta medida piramidal en el que la presencia de sociedades profesionales se hace evidente en la búsqueda de liderazgos científicos.

La existencia de sociedades científicas profesionales es un hecho que puede constatar en Europa en los comienzos de la expansión científica a partir del s. XVI y la introducción del método científico cartesiano en el s. XVII. La consecución de la revolución industrial en el s. XIX no hizo sino aumentar esta proyección e influencia en los países europeos y la diseminación de la idea de progreso económico. Ciertamente, esta trayectoria no se debe extrapolar a otras zonas geográficas, como puede ser el caso de China, la civilización islámica o de los países del continente americano, en los que la coyuntura histórica ha sido afectada por un devenir diferente. Como ejemplo la Academia Mexicana de Óptica (AMO) fue fundada en la ciudad de León (Guanajuato) en 1987 con el objeto de representar a la óptica en México actuando desde entonces como promotor tanto en el mundo académico como en el empresarial.

La mayoría de las academias de ciencias en Europa se estableció entre los siglos XVII y XVIII. En el continente americano podemos situar estos comienzos a mitad del s. XIX como consecuencia de la expansión universitaria y académica en estas regiones geográficas.

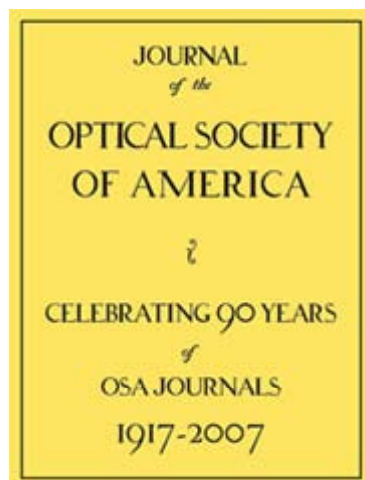
Con el crecimiento de la actividad industrial y de las enseñanzas académicas en el área de las ciencias, con contenidos cada vez más tecnificados, se fue creando una necesidad de interconexión entre el mundo industrial y el mundo académico, mundos por otra parte con desarrollos tradicionalmente poco convergentes.

En el campo de la óptica, la Sociedad Americana de Óptica (*Optical Society of América*, OSA) se fundó en 1916 a partir de iniciativas de grupos

locales (como en Rochester). Uno de los objetivos primordiales fue la promoción y diseminación de las actividades en óptica dentro de cada región donde funcionaba un grupo local. Un año más tarde, en 1917, se fundó la revista *Journal of the Optical Society of America* (JOSA, véase Figura 5.1).

FIGURA 5.1

PORTADA DE LA REVISTA PUBLICADA POR LA SOCIEDAD AMERICANA DE ÓPTICA, CELEBRANDO EN 2007 EL 90 ANIVERSARIO DE SU PRIMERA EDICIÓN [FUENTE: OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, (OSA)]



Esta revista puede considerarse como pionera en las publicaciones científicas en el campo de la óptica clásica y de la óptica contemporánea y una referencia obligatoria para entender el desarrollo de la óptica y la fotónica en el s. XX. El enorme crecimiento en el número de publicaciones científicas fue la causa de que en 1984 la revista se dividiera en dos publicaciones periódicas independientes: JOSA A, dedicada a Óptica y Ciencias de la Imagen, y JOSA B, dedicada a Óptica Física. Estas revistas han aplicado una política de impacto de calidad y ofrecimiento de temas de interés actual en las llamadas publicaciones especiales (*Special issues*). Como ejemplo, para 2007 están propuestas las siguientes: Metamateriales fotónicos, (publicación conjunta JOSA A y B), Láseres de fibras ópticas (JOSA B) y Calidad

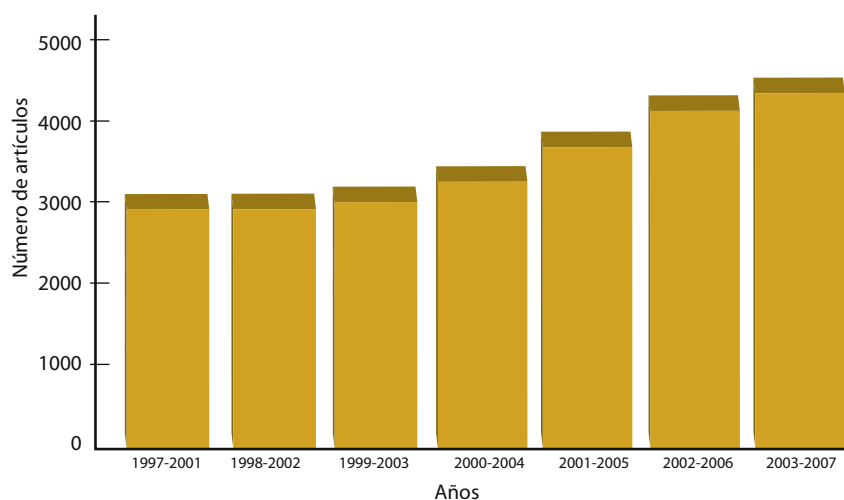
de Imagen (JOSA A). La OSA edita hoy en día además de las mencionadas revistas otra más en óptica aplicada, *Applied Optics*, otra dedicada a publicaciones rápidas, *Optics Letters* (para publicaciones rápidas, la revista de óptica con mayor índice de impacto), y una revista de acceso electrónico exclusivo, *Optics Express*, todas ellas de calidad. En la figura 5.2 se indica la evolución en el número de publicaciones de artículos científicos en el *Optics Letters*. Se observa un crecimiento anual sostenido hasta un total de 4500 artículos en 2007.

En la actualidad la OSA tiene un número considerable de miembros asociados en todo el mundo en centros de investigación, universidades y compañías profesionales dedicadas al mundo de la fotónica. Organiza al menos tres congresos internacionales anuales en ciudades no necesariamente localizadas en Estados Unidos de América, proporciona listas de ofertas de empleo y facilita contactos a los estudiantes que buscan oportunidades de trabajo profesional.

Posteriormente otras sociedades profesionales han ido emergiendo y se han incorporado al mundo profesional de la óptica y la fotónica. Tal es el caso de SPIE fundada en 1955 en Los Ángeles (Estados Unidos de América) por ingenieros de imagen, posteriormente enfocada a un campo más extenso de ingeniería óptica y optoelectrónica. La rápida expansión de la carrera profesional en óptica y fotónica en el s. XX se ha visto reflejada en el considerable aumento en el número de miembros del SPIE distribuidos en todo el mundo. La organización de congresos internacionales aparece como una actividad puntera,

FIGURA 5.2.

EVOLUCIÓN EN EL NÚMERO DE ARTÍCULOS PUBLICADOS EN *OPTICS LETTERS* EN LOS ÚLTIMOS DIEZ AÑOS (1997-2007) (FUENTE: ISI WEB OF KNOWLEDGE, ESSENTIAL INDICATORS, 2007).





como ejemplo, en 1997 el congreso de Fotónica en el Oeste (*Photonics West*) celebrado en San José (California) tuvo 10000 participantes y 400 exhibidores de compañías de óptica y fotónica. Estos congresos se han organizado igualmente en Europa con gran éxito de asistencia y de exhibición de productos compañías empresariales. En la actualidad SPIE publica un total de siete revistas de investigación científica en el campo de la ingeniería óptica, de ellas *Optical Engineering* es la más citada, además publica revistas dedicadas a imagen electrónica, óptica biomédica, detección remota de señales y micro y nano-tecnología.

En Europa y resto del mundo las sociedades profesionales de óptica se han visto beneficiadas de una creciente expansión. Previo a 1984, la óptica en Europa estaba representada en el Comité Europeo de Óptica (EOC). En 1984 EOC se unió a la Sociedad Europea de Física (EPS) como División de Óptica. En 1986 varias sociedades de óptica europeas se unieron para crear *Optica* oficialmente lanzada en 1987. Pronto se establecieron colaboraciones con otras sociedades profesionales como SPIE para organizar congresos internacionales de óptica y fotónica en Europa. La experiencia adquirida en la organización de estas actividades condujo a la fundación de la Sociedad Europea de Óptica (EOS) en 1990, la cual publica varias revistas científicas dedicadas a óptica fundamental y óptica aplicada. Otras instituciones europeas como el Institute of Physics (IOP) participan activamente en la disseminación de actividades en todo el mundo. También podemos mencionar la existencia de sociedades asiáticas como la Sociedad Japonesa de Óptica.

Dentro de un ámbito de proyección internacional la Comisión Internacional de Óptica (ICO), como miembro asociado del Consejo Científico Internacional para la Ciencia (*International Scientific Council of Science, ICSU*), representa y agrupa a un total de 50 comités territoriales en todo el mundo. Igualmente tiene en su seno como miembros sociedades de óptica con proyección internacional: EOS, *the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, la Red Africana para Láseres y Óptica Atómica y Molecular (*LAM Network*) bajo el patrocinio del "Abdus Salam" *International Center for Theoretical Physics (ICTP)*, *Optics Within Life Science (OWLS)*, OSA y SPIE. La ICO fue fundada en 1947 en París (Francia) con el objetivo de contribuir en el escenario internacional al progreso y a la difusión del conocimiento en el campo de la óptica. La

ICO tiene una vocación de solidaridad internacional para el apoyo de actividades profesionales en países en vías de desarrollo. En este sentido apoya la celebración de eventos de carácter internacional en muchos países del mundo no necesariamente ubicados en áreas de actual expansión tecnológica. De esta forma contribuye al desarrollo y autogestión de actividades e iniciativas de carácter local. Tiene una publicación trimestral periódica, *ICO Newsletter*, comenzada en 1989 y edita una serie trienal de libros denominada "*Trends in Optics*", cuyos volúmenes suministran una visión global y actualizada de la investigación en curso en el campo de la óptica a nivel mundial.

En este recorrido resumido de las actividades desarrolladas por sociedades profesionales nacionales e internacionales asociadas con el mundo de la óptica y de la fotónica, y según se extrae de su clara expansión, se puede concluir que la óptica y la fotónica viven un momento de creciente importancia en el mundo de las tecnologías de última generación, hecho que debe de reflejarse necesariamente en su influencia en el mundo académico y empresarial.

### EL DESARROLLO DE LA ÓPTICA Y LA FOTÓNICA EN EL CONTEXTO IBEROAMERICANO.

La óptica moderna inicia su desarrollo en Iberoamérica principalmente en el ambiente académico y como una rama de la física. Por ello la mayoría de los investigadores iberoamericanos en óptica son miembros de sociedades de física que, excepto por la Sociedad Mexicana de Física y la Asociación Física Argentina, carecen de divisiones de óptica. Aunque internacionalmente existe una tendencia hacia el fortalecimiento de las sociedades de óptica (OSA, SPIE, EOS, SEDOPTICA), en la actualidad existen en Iberoamérica sólo tres organizaciones independientes de las sociedades de física y de carácter nacional en óptica: la Academia Mexicana de Óptica, fundada en 1987, la Red Colombiana de Óptica, creada en 1993, y el Comité Venezolano de Óptica, creado en 1990 y aceptado como Comité Territorial de ICO en 1999. Estas organizaciones tienen una componente multidisciplinaria que da cabida a ingenieros en el caso de México y Colombia y a un nutrido número de químicos en Venezuela.

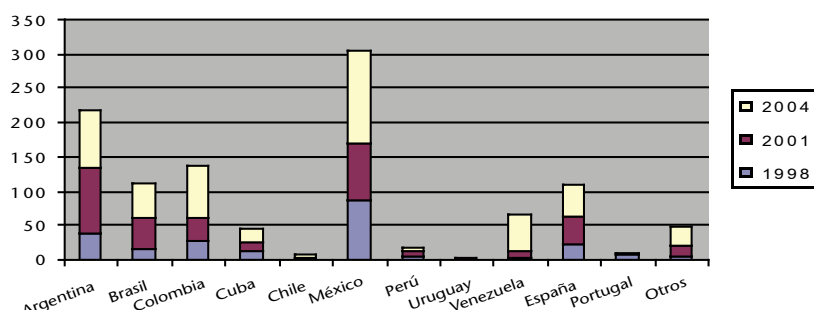
La visibilidad internacional de la comunidad iberoamericana de investigadores en óptica se ha incrementado notoriamente durante las últimas dos décadas debido a un rápido crecimiento de la investigación y la enseñanza de la óptica en la región. Indicadores de este crecimiento son la creación de estructuras organizativas de las comunidades científicas a nivel nacional, el auge y trayectoria de RIAO/OPTILAS como la principal conferencia internacional en Óptica en la región y el establecimiento de nexos con instituciones y sociedades internacionales (ICO, ICTP, OSA, SPIE). Existen dos capítulos de estudiantes de SPIE en Colombia, uno en México, uno en Argentina y uno en Perú. Adicionalmente existen dos capítulos de estudiantes de la OSA en Brasil, tres en Colombia, tres en México y uno en Perú. Actualmente se impulsa la creación de una red de óptica latinoamericana REDOLA que facilite el conocimiento mutuo del recurso humano, intereses investigativos, actividades científicas y tecnológicas, y favorezca la colaboración y el intercambio de investigadores.

RIAO/OPTILAS se nutrió de dos vertientes. A principios de los 80, tres físicos latinoamericanos, Eddien Alvarez, Carlos Massone y Vicente Pais tuvieron oportunidad de encontrarse en el ICTP y concibieron la idea de

realizar un encuentro latinoamericano de láseres y aplicaciones. El primero de ellos se realizó en Colombia en 1984 y fue seguido de encuentros en Brasil (1986), Argentina (1988), México (1993) y Cuba (1995), donde se acuñó para el evento la sigla OPTILAS. En 1992 la comunidad española organizó en Barcelona la primera RIAO (Reunión Iberoamericana de Óptica), en conjunción con su III Reunión Nacional de Óptica y en conmemoración del quinto centenario del descubrimiento de América. En 1995 II RIAO tuvo lugar en México y en 1998 los dos eventos confluyeron en III RIAO/VI OPTILAS en Cartagena de Indias, Colombia, constituyéndose en una conferencia trienal que tuvo sede posteriormente en Argentina (2001) y en Venezuela (2004) y esta programada para octubre de este año en la Universidad de Campinas, UNICAMP, Brasil. En 2004 el evento contó por primera vez con la participación de un Premio Nóbel de Física, el Profesor Claude Cohen-Tanoudji. México ha hecho el mayor número total de contribuciones a las tres últimas conferencias (305), seguido por Argentina (219), Colombia (137), Brasil (112) y España (108) (Figura 6.1).

FIGURA 6.1

NÚMERO DE CONTRIBUCIONES POR PAÍS EN LOS TRES ÚLTIMOS RIAO/OPTILAS.  
DATOS DE N. GAGGIOLI, 2005



En Perú existe interés por el diseño de dispositivos y sistemas ópticos y una estrecha colaboración con Francia en programas de Maestría. Se han realizado dos congresos nacionales y tres escuelas internacionales de óptica; hay interés en crear un Comité Territorial de ICO y en obtener la sede del próximo RIAO/OPTILAS. Chile inició y ha organizado dos de tres conferencias internacionales "Quantum Optics" (2000, 2006). La segunda de la serie tuvo lugar en México en el 2004. En Uruguay se va a celebrar en Punta del Este en diciembre de 2007, el Tercer Taller sobre Ruido, Caos y Complejidad en Láseres y Óptica No-Lineal.

Estos indicadores muestran que la comunidad científica iberoamericana ha logrado un lugar en el contexto internacional en la investigación básica en el área de la óptica, pero el impacto de sus logros en el desarrollo de tecnología en Latinoamérica es menos notorio. Varios países, entre ellos Colombia a través de Colciencias y México a través de Conacyt han diseñado su política de apoyo a la ciencia y la tecnología (CyT) con el objetivo de hacer de ellas componentes efectivos para la competitividad y el desarrollo social y han enfocado la intervención del estado en la búsqueda de investigación e innovación con impacto sobre la estructura productiva y el desarrollo social. Sin embargo, no se observa en estos sistemas de CyT una estratificación de la investigación similar a la de países desarrollados. No existe en ellos una componente fuerte de investigación aplicada que facilite el desarrollo tecnológico y carecen de esquemas de transferencia e incluso de industrias adecuadas para efectuarla.

De la inversión mundial total en investigación y desarrollo (I+D) en 2006, 874 mil millones de dólares, 35% es de USA, 24 % de la Unión Europea incluyendo Gran Bretaña, Japón 14%, China 11% y Corea 3%. Todos los demás países aportan conjuntamente un modesto 13%. Los economistas estiman que la mitad del crecimiento económico de USA en los últimos 50 años es debido a avances tecnológicos. Las Universidades son vistas por quienes establecen la política de CyT como catalizadores del desarrollo económico y de alta tecnología mediante las actividades empresariales que generan con sus resultados investigativos, y a través de las concentraciones de recurso humano altamente calificado que atraen y generan. El gobierno Federal juega un papel central en la investigación universitaria. En 2004, USA invirtió 2.66% de su producto interno bruto en investigación y desarrollo; 64% de esa suma fue aportada por industrias, y 30% por el gobierno federal. Aunque parezca una modesta participación, el aporte del gobierno es crítico pues financia 62% de la investigación básica y 64% de los proyectos de investigación y desarrollo realizada en los institutos universitarios. Pero la estructura del sistema es orientada a la producción de tecnología avanzada. El programa de investigación, desarrollo, prueba y evaluación (RDT&E) del Departamento de Defensa de los EEUU, para citar un ejemplo, establece siete categorías investigación básica y aplicada, desarrollo de tecnología avanzada, de componentes y prototipos, de sistemas y demostración, apoyo administrativo, y desarrollo de sistemas operacionales. El sistema apoya la evolución de proyectos a través de las diferentes categorías buscando solución de continuidad.

La Figura 6.2 muestra la inversión por país en CyT en la región Iberoamericana como porcentaje de su Producto Bruto Interno (PBI), y la Figura 6.3 como se distribuye esta inversión según las fuentes de financiación. El aporte de otros incluye inversiones del extranjero y de organizaciones sin ánimo de lucro.

Si bien los investigadores mexicanos han organizado recientemente múltiples conferencias sobre física e industria y en Argentina ha habido numerosos contactos con la industria en el área de la metrología óptica, Brasil es quizás el único país en donde resultados de investigación básica y aplicada han sido transferidos a la industria y contribuido al desarrollo e implementación de tecnología propia a nivel nacional a gran escala.

FIGURA 6.2.-

GASTO EN CYT POR PAÍS COMO PORCENTAJE DEL PBI. DATOS DE LA RED DE INDICADORES DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA - IBEROAMERICANA E INTERAMERICANA- (RICYT) 2004

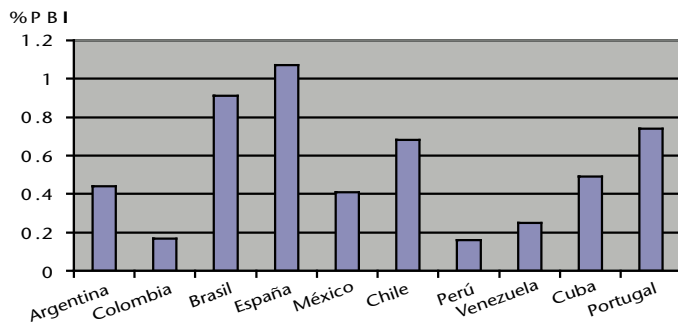
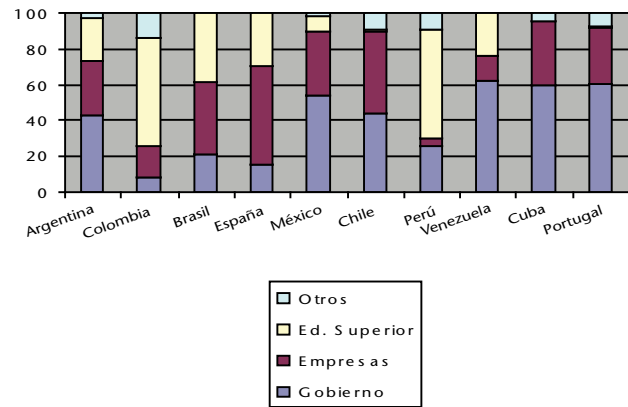


FIGURA 6.3.

DISTRIBUCIÓN DE LA INVERSIÓN EN CYT POR FUENTE DE FINANCIACIÓN. DATOS RICYT 2004



Con una serie de entrevistas con los pioneros de la tecnología de telecomunicaciones por fibra óptica en Brasil, Unicamp celebró el año pasado 40 años de su papel de incubadora de desarrollo tecnológico. La historia de lo que fue un desarrollo tecnológico oportuno y exitoso en Latinoamérica puede servir de ejemplo en esta época en que una nueva revolución, la nanotecnológica, se inicia. En 1970, cuando Bell Labs y Corning sentaban las bases tecnológicas para el desarrollo de las telecomunicaciones por fibra óptica, Unicamp con su campus aún en construcción facilitó la repatriación de brasileros altamente capacitados en optoelectrónica, fibra óptica y sistemas. El gobierno creó Telebras e hizo una fuerte inversión para apoyar la investigación en la Universidad, teniendo en mente el modelo de Universidad como centro de un polo industrial y tecnológico. Posteriormente creó el CPqD (Centro de investigación y desarrollo en telecomunicaciones) en Campinas. La Universidad generaba recursos humanos y tecnología básica; el CPqD tomaba la tecnología básica y la convertía en tecnología industrial para ser transferida a dos o más industrias a quienes la Telebras les garantizaba el mercado impidiendo la instalación de tecnologías que compitiesen con la transferida, pero permitiendo la competencia entre ellas. Así nacieron ABC Xtal y Elebra, empresas que durante más de una década crecieron vertiginosamente. Lamentablemente por asuntos de mercado y cambios de política gubernamental estas grandes empresas desaparecieron y actualmente no se fabrica fibra óptica en el Brasil, pero de ellas se derivaron múltiples empresas brasileras de tecnología de telecomunicaciones y sensores.

### 7. COLABORACIÓN INTERNACIONAL

Uno de los programas más exitosos de colaboración científica internacional en Iberoamérica es el CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, en que participan 19 países de América Latina, España y Portugal, y que tiene como objetivo principal contribuir al desarrollo armónico de la Región mediante el establecimiento de mecanismos de cooperación entre grupos de investigación de universidades, centros de I+D y empresas innovadoras de países iberoamericanos, que pretenden la consecución de resultados científicos y tecnológicos transferibles a los sistemas productivos y a las políticas sociales.

Dentro del CYTED existen tres modalidades de cooperación internacional: las Redes Temáticas, los Proyectos de Investigación Precompetitiva y los Proyectos de Innovación IBEROEKA, que requieren la participación de empresas de, al menos, dos países miembros con un servicio o producto de carácter innovador y cercano al mercado. El Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) español tiene oficinas en México, Brasil y Chile, que facilitan a las empresas españolas la búsqueda de socios para el desarrollo de alianzas y proyectos de cooperación tecnológica internacional, en relación con el Programa IBEROEKA. Sin embargo el Programa CYTED no ha sido muy utilizado en el área de la óptica. Dentro del área temática de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) sólo un proyecto de 53 en curso menciona el uso de sensores con fibra óptica. En el área de *promoción del desarrollo industrial*, los pocos proyectos que lindan con la óptica, son en realidad investigación básica y no tienen como propósito el desarrollo de prototipos de nuevos dispositivos sino el estudio de nuevos materiales. Los esfuerzos en redes temáticas y proyectos de investigación no parecen desembocar en el desarrollo de industrias, ni tener conectividad o solución de continuidad con los proyectos IBEROEKA, al menos en el ámbito de la óptica, los sensores, la optoelectrónica y la nanotecnología. La estructura misma del programa CYTED no parece diseñada para perseverar en un objetivo específico y carece de una verdadera etapa de investigación aplicada y transferencia de tecnología.

Francia estableció colaboración con Chile desde 1962 e inició con él su programa ECOS (Evaluación-orientación de la cooperación científica) en 1992 de cooperación científica y universitaria con la América Hispano parlante. El programa tuvo gran acogida y en 1997 fue necesario subdividirlo

en ECOS-Sud para Argentina, Chile y Uruguay, y ECOS-Nord para México, Colombia y Venezuela. Está destinado a apoyar proyectos de excelencia en materia de colaboración científica. Financia intercambio de investigadores en la forma de misiones de corta duración, estadias de perfeccionamiento y becas doctorales. Está abierto a todos los campos del saber. La colaboración empieza al nivel de establecimientos y de equipos universitarios, y de investigadores que elaboran conjuntamente un proyecto científico donde se involucran intelectualmente en forma equivalente. El CNRS tiene acuerdos de cooperación científica con México (Conacyt), Venezuela (FONACIT), Argentina (CONICET), Chile (CONICYT) y Brasil (CNPq y FAPESP). En 2006 realizó con FAPESP una convocatoria para proyectos conjuntos en las áreas (entre otras) de materiales y nanotecnología, fotónica y óptica.

La Comisión Europea adoptó en el 2002 el Programa Alþan dirigido a América Latina para becas de postgrado (máster o doctorado) o de especialización (formación o actualización profesional superior). Se espera que, hasta el 2010, alrededor de 3 900 estudiantes y profesionales latinoamericanos se beneficien ellas.

La Unión Europea (UE) ha establecido además actividades específicas de cooperación científica internacional dentro de su Programa Marco FP7, principal instrumento de financiación de investigación científica y desarrollo tecnológico durante el periodo 2007-2013. La cooperación con terceros países apunta a grupos específicos entre los cuales se encuentra Latinoamérica. La cooperación internacional se maneja de modo diverso en tres diferentes partes del programa. Acciones de cooperación internacional orientadas por tema se realizan bajo el programa de *cooperación*, que apoya la colaboración entre universidades, industria, centros de investigación y autoridades públicas en la UE y fuera de ella. Parte de él es el programa ICT (Information and Communication Technologies) cuya segunda convocatoria cierra el 9 de Octubre del 2007 e incluye entre otros tópicos componentes fotónicas y subsistemas, y micro/nanosistemas. En el programa NMP (Nanociencias y nanotecnologías, tecnologías de materiales y nueva producción) se pone énfasis en el estudio de fenómenos y manipulación de la materia a nanoescala y al desarrollo de nanotecnologías que conduzcan a la manufactura de nuevos productos y servicios; al uso del conocimiento de nano y biotecnologías para nuevos productos y procesos y a crear condiciones para la innovación continua y el desarrollo de “valores” genéricos de producción (tecnologías, facilidades de organización y producción y recurso humano; integración de tecnologías para aplicaciones industriales).

Dentro del Programa *gente*, las acciones *Maria Curie* relacionadas con formación de recurso humano y movilidad de investigadores, incluyen financiación para entrenamiento y desarrollo profesional de investigadores mediante becas de doble vía entre la UE y terceros países. Si el investigador es originario de uno de los países socios, el esquema puede incluir asistencia a los becarios para retornar a su país de origen, contribuyendo así al establecimiento de cooperación sostenible entre esos países y las organizaciones de investigación europeas.

En el Programa *capacidades*, las actividades *INCO (Specific International Scientific Cooperation Activities)* están diseñadas para apoyar y estimular la participación de terceros países en FP7. La mayoría de países latinoamericanos pueden participar como países socios. Argentina, Brasil, Chile y México han firmado acuerdos con la CEE que incluyen el área de CyT. Brasil puede ser considerado como una región, de modo que dos o más de los socios requeridos para un proyecto pueden pertenecer a estados diferentes del Brasil.

España, dada su integración científica y tecnológica con la UE y su posición abiertamente favorable a la cooperación con Iberoamérica, puede y debe jugar un papel primordial para la optimización de la participación latinoamericana en los Programas de la UE. Diversas organizaciones españolas vienen ya desarrollando una importantísima labor en el contexto de proyectos de cooperación entre España e Ibero América en temas educativos y de investigación. La Agencia Española de Cooperación Internacional, asociada al Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación (MAEC) del Gobierno de España, ofrece becas de postgrado (becas MAEC-AECI) a través del Programa Mutis. El Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) es conciente del impacto que la cooperación científica y tecnológica tiene en la mejoría del nivel de vida de los países en desarrollo y la fomenta, y la Fundación Carolina ofrece becas de formación permanente abiertas indistintamente a latinoamericanos y españoles.

No es noticia que Europa, Estados Unidos y Asia están realizando inversiones monumentales en investigación y desarrollo de nanotecnología por sus aplicaciones en áreas tan diversas como Tecnología de información y comunicaciones, salud, energía, agricultura, tratamiento de aguas, etc. El primero de tales programas a gran escala es la Iniciativa Nacional en Nanotecnología de EEUU (NNI), que se inicio en el 2000. Es quizás menos conocido que dentro del programa FP6 de nanotecnología, la CEE ha fundado el proyecto Nanoforum EU Latín América, que desde el 1 de diciembre de 2006 hasta el 31 de mayo de 2008 fomentará la creación de relaciones duraderas entre instituciones y organismos de investigación en nanotecnología en Europa y Latinoamérica. El proyecto organizará visitas de intercambio entre investigadores latinoamericanos y cuatro instituciones europeas con el objetivo de estimular colaboración en I+D dentro del marco del FP7. Organizará además dos talleres, uno en México y otro en Brasil, con subsecuentes visitas de investigadores e industriales europeos a instituciones en el país anfitrión con el fin de identificar oportunidades de establecer trabajo conjunto. El primer evento, un Taller sobre Prioridades en Investigación en Nanomateriales en Latinoamérica y Europa, tendrá lugar en México en Agosto 2007,

La apertura Europea a la colaboración científica y tecnológica con países latinoamericanos, otorga amplio espacio a aquellos investigadores

latinoamericanos para participar en la nueva revolución tecnológica en forma interdisciplinaria. La óptica, como herramienta horizontal y fundamental para el análisis de las propiedades de nuevos materiales, y para el sensoramiento y monitoreo de procesos está llamada a jugar un papel preponderante en nanofotónica y nanobiotecnología. La comunidad científica latinoamericana cuenta con recurso humano calificado e infraestructura de fabricación y caracterización de materiales, incluyendo técnicas de espectroscopía láser, lineal y no lineal. La revolución en nanotecnología apenas empieza a abrir un inmenso campo para la investigación y Latinoamérica puede formar parte de ella si logra actuar como par científico de investigadores de países desarrollados, utilizando todos los canales de cooperación internacional y apoyando simultáneamente ideas innovadoras de empresas de tecnología avanzada en la región.

## BIBLIOGRAFÍAS

“Harnessing Light: Optical Science and Engineering for the 21st Century”, National Academy Press, Washington, D.C. 1998.

OSA-Optical Society of America, [www.osa.org](http://www.osa.org); <http://www.osa.org/membership/student-services/chapters/location/default.aspx#MO>

EOS-European Optical Society, [www.eos.org](http://www.eos.org)

EPS/QEOD. European Physical Society, Quantum Electronics and Optics Division, [www.quniverse.sk/qeod](http://www.quniverse.sk/qeod)

SEDOPTICA - Sociedad Española de Óptica, [sedo.optica.csic.es](http://sedo.optica.csic.es)

ICO-Comisión Internacional de Óptica, [www.ico-optics.org](http://www.ico-optics.org)

SPIE-International Society of Optical Engineering, [spie.org](http://spie.org); <http://spie.org/x1727.xml>

REDOLA-Red de Óptica Latinoamericana, [www.redola.org](http://www.redola.org)

Fundación Carolina, [www.fundacioncarolina.es/fundacioncarolina](http://www.fundacioncarolina.es/fundacioncarolina)

ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas, [www.icfo.es](http://www.icfo.es)

“Optics in Latin America”, N. Gaggioli, 2005.  
[www.ico-optics.org/pdfs/opticsinlatinamerica.pdf](http://www.ico-optics.org/pdfs/opticsinlatinamerica.pdf)

Inovacao Unicamp. <http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-40anos-smolka.shtml>;  
<http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-40anos-ripper.shtml>;  
<http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-40anos-josemauro.shtml>

Report of the American Association for the Advancement of Science, AAAS Report XXXII, Research and Development FY 2008. <http://www.aaas.org/spp/rd/rd08main.htm>.

National Nanotechnology Initiative (NNI) <http://www.nano.gov>

RICYT: Red de indicadores de CyT : <http://www.riicyt.org/>;

ECOS, Francia, <http://www.ecos.univ-paris5.fr/>

DAAD <http://www.daad.de/deutschland/index.en.html>

Becas MAEC-AECI <http://www.becasmae.com>

Community Research and Development Information Service – CORDIS, [http://cordis.europa.eu/guidance/home\\_en.html](http://cordis.europa.eu/guidance/home_en.html)

MARIE CURIE ACTIONS  
[http://ec.europa.eu/research/fp6/mariecurie-actions/indexhtm\\_en.html](http://ec.europa.eu/research/fp6/mariecurie-actions/indexhtm_en.html)

INCO [http://cordis.europa.eu/inco/home\\_en.html](http://cordis.europa.eu/inco/home_en.html)

Seventh Research Framework Program (FP7)  
[http://cordis.europa.eu/fp7/home\\_en.html](http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html)

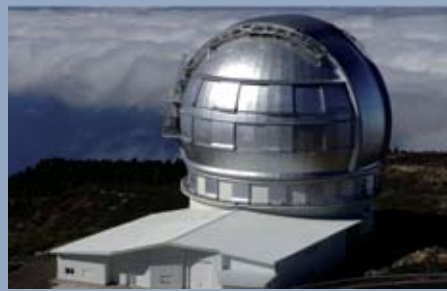
NANOFORUMEULA: UNA RED ENTRE EUROPA Y LATINOAMÉRICA  
<http://www.mesaplustwente.nl/Links/nanoforumeuula/>

Gallup, J.L., Sachs, J.D., Mellinger, A.D., “Geography and economic development”, International Regional Science Review, 22:2, 179 (1999).

**MAPA DE INSTALACIONES CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS SINGULARES**



Centro Nacional de Supercomputación



Gran Telescopio CANARIAS



Centro Astronómico de Yeves



Plataforma Solar de Almería



Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo



Buque de Investigación Oceanográfica Hespérides



Reserva Científica de Doñana



Sala Blanca del Centro Nacional de Microelectrónica



Instalación de Ingeniería Civil del CEDEX

- Supercomputador FinisTerae
- Buque de Investigación Oceanográfica Cornide de Saavedra
- Buque de Investigación Oceanográfica Sarmiento de Gamboa
- Unidad de Tecnología Oceanográfica
- Sistema de Observación Costero

- Nodo de la Red Española de Supercomputación
- Gran Tanque de Ingeniería Marítima

- Fuente de Neutrones por Espalación
- Instalación de Imagen Molecular

- Instalación de Imagen Médica y Diagnóstica
- Centro Nacional de Energías Renovables
- Instalación sobre Biocombustibles

- Laboratorio de Resonancia Magnética Nuclear
- Plataforma Mouse-Clinic
- Instalación de Biología Estructural Proteómica
- Centro de Supercomputación de Catalunya
- Centro Nacional de Supercomputación
- Sala Blanca del Centro Nacional de Microelectrónica
- Canal de Investigación y Experimentación Marítima
- Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería
- Sincrotrón ALBA

- Centro Nacional de Tecnologías para la Fusión
- Dispositivo de Fusión Termonuclear TJ-II
- Instalación de Microscopía Avanzada
- Centro Nacional de Imagen Biomédica
- Instalación de Alta Seguridad Biológica del CISA
- Instalaciones Singulares de Ingeniería Civil en el CEDEX
- Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo
- RedIRIS de Servicios Telemáticos Avanzados
- Central de Tecnología del Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología
- Nodo de la Red Española de Supercomputación



© Ministerio de Educación y Ciencia 2007

Diseño: Divulga

**Islas Canarias**

- Observatorio del Roque de los Muchachos
- Gran Telescopio CANARIAS
- Nodo de la Red Española de Supercomputación
- Observatorio del Teide
- Plataforma Oceánica de Canarias

**Antártida**

- Base Antártica Gabriel de Castilla
- Base Antártica Juan Carlos I

● Ceuta ● Melilla

- Centro Astronómico de Calar Alto
- Radiotelescopio del IRAM en Pico Veleta
- Reserva Científica de Doñana
- Centro Nacional de Aceleradores
- Centro de Tecnologías Avanzadas en Energías Renovables
- Plataforma Solar de Almería
- Nodo de la Red Española de Supercomputación
- Centro de Datos y Servicios para las Ciencias Sociales
- Buque de Investigación Oceanográfica Hespérides
- Instalación Oceanográfica y de Acuicultura
- Plataforma de Investigación en Recursos Hídricos

**Áreas de Investigación**

GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CIENCIA

Astronomía e Investigación Espacial

Ciencias del Mar, de la Vida y de la Tierra

Ciencias Socioeconómicas y Humanidades

Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

Ciencias de la Salud y Biotecnología

Física de Partículas y Microscopía

Energía

Ingeniería



# JUAN SEBASTIÁN BARBERÁ

Juan Sebastián Barberá Durón  
Artista plástico  
Ciudad de México, 1964.

## EXPOSICIONES (1989 - 2007)

Más de cuarenta exposiciones en México, España, India y Francia, y ocho exposiciones colectivas.

## EDICIONES Y PUBLICACIONES

Editado por el taller catalán Polígrafa de Barcelona con la colección de litografías y grabados "Los Conjuros", en 1994. Taller de Emilio Payán en México con los grabados, "El último centauro en el laberinto" (1998). Taller Ditoria con el libro de dibujos "Objeto casi" inspirado en la obra de Saramago, México (1998). Bat Conservation International, con la serie de cuentos del programa para la conservación de los murciélagos migratorios (1995 - 2000).

## PREMIOS Y DISEÑO

Ganador del concurso "Juguete arte objeto" en México (1995). Diseñador de la imagen Lumen e Hiperlumen con el premio Quórum (1997). Diseñador de la nueva imagen editorial de los libros de texto del Conalep (1996 - 2000). Diseñador de su propia agenda artística (1989 - 2002).

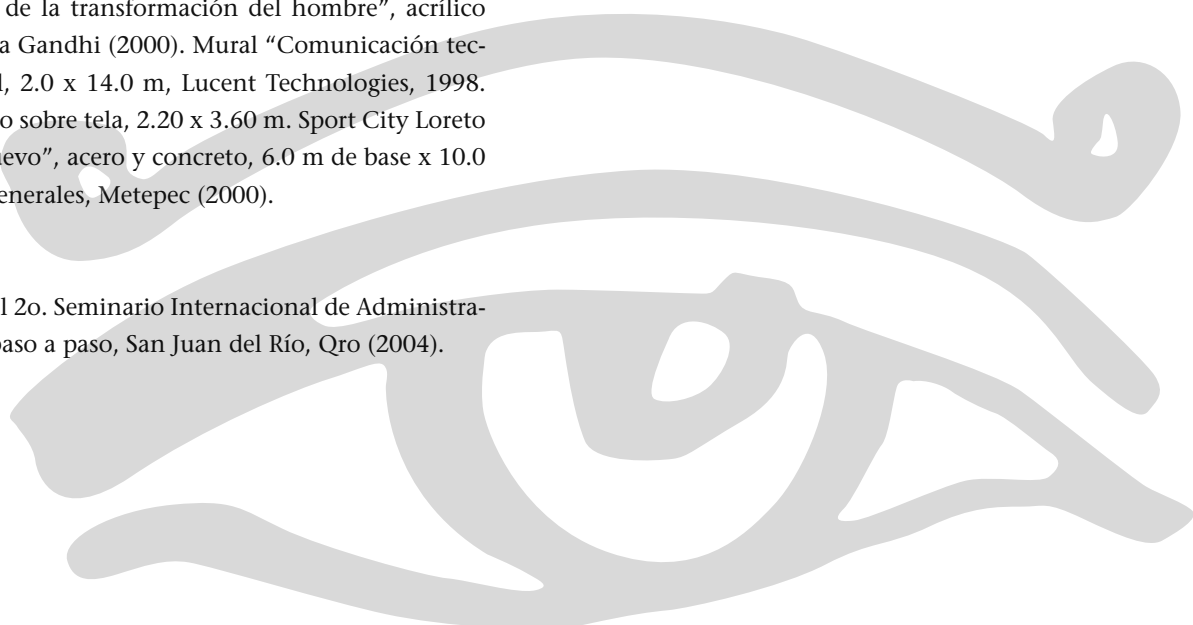
## OBRA PÚBLICA MONUMENTAL

Mural "Mundo Onírico", cerámica de alta temperatura, 120 m<sup>2</sup>, Pasaje Al-tavista (2003). Mural "Visiones de la transformación del hombre", acrílico sobre tela, 1.80 x 12.0 m, librería Gandhi (2000). Mural "Comunicación tecnológica", vinilo sobre trovicel, 2.0 x 14.0 m, Lucent Technologies, 1998. Mural "Deporte infinito", acrílico sobre tela, 2.20 x 3.60 m. Sport City Loreto (1998). Escultura "El hombre nuevo", acero y concreto, 6.0 m de base x 10.0 m de altura, Conalep, oficinas generales, Metepec (2000).

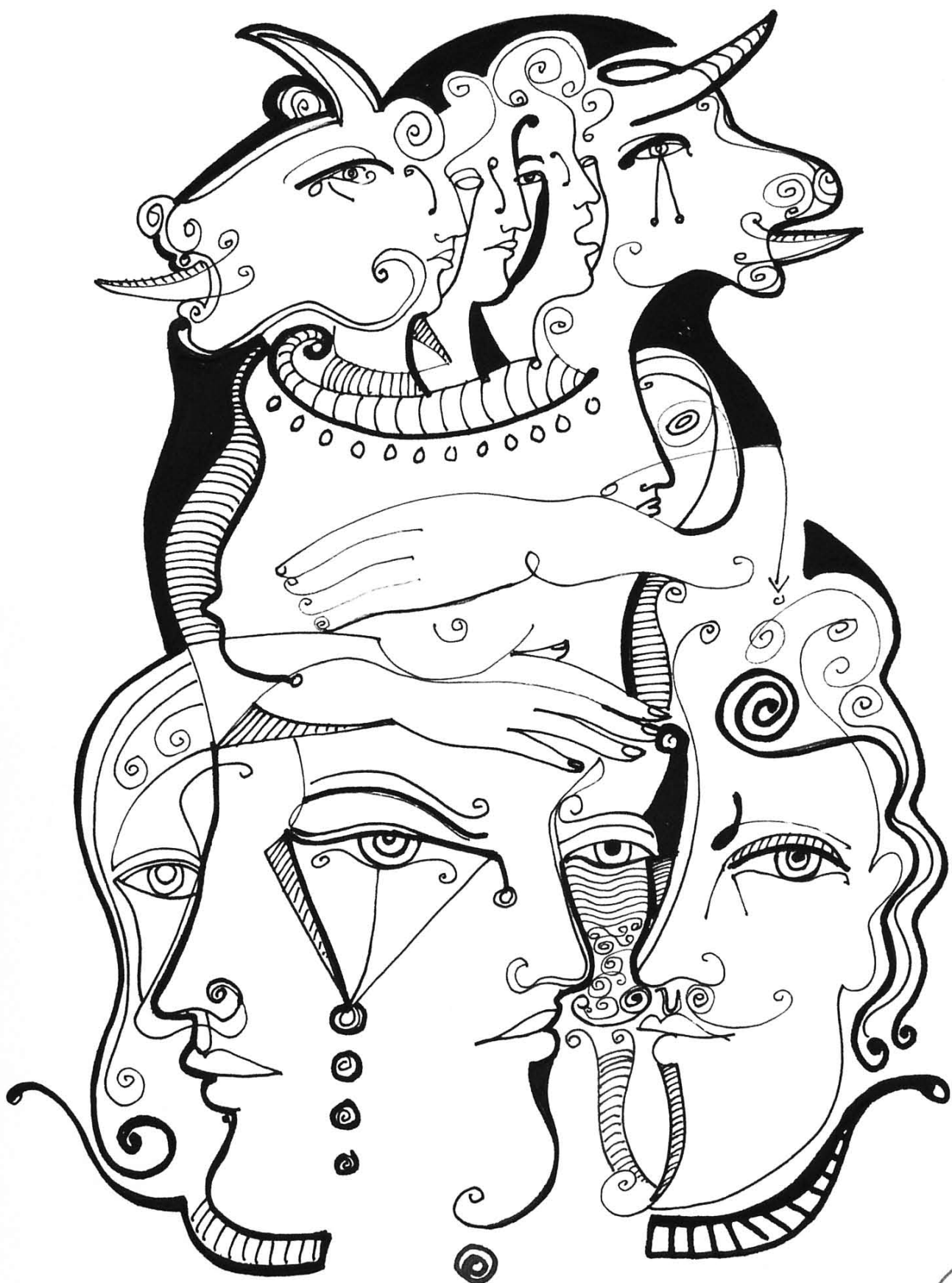
## CONFERENCIAS

"Arte, color y sentimiento", en el 2o. Seminario Internacional de Administración del Color, Color Correcto paso a paso, San Juan del Río, Qro (2004).

JuanS estudio  
T. 2615 2336  
juans.estudio64@gmail.com  
www.juansbarbera.com



*JuanS*



johns





Fundación  
Santillana

