

EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN DE MATERIALES EN ESPAÑA

José María Serratosa

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. CSIC

ABSTRACT: This article refers to the great development experienced by material research in Spain during the last 20 years. This development has been, in great part, a consequence of the initiative of the National Research Council of Spain (CSIC) to include Material Science as a priority area in its Scientific Programme in the years 1980. Four new institutes for research in advanced materials were created in 1986-1987 in Barcelona, Madrid, Sevilla and Zaragoza, the last two in cooperation with the respective universities. Funding of research projects in Material Science was secured by three ways: 1) the research programme of the CSIC; 2) the National Programme for Scientific Research and Development of the Spanish Government and 3) the Framework Programme of the European Communities. An analysis of the area of Materials Science in Spain shows an important increase of the research activity during the last 20 years, as indicated by the number of papers published in international journals. Finally, the relationships between industry and research centers and universities are discussed. The article concerns mainly with material research in the CSIC but data on material research in universities and, in general, in Spain are also included.

KEY WORDS: Material science and technology, National Programme for Scientific Research and Development (PN), Framework Programme of the EU, Industry-Research Centers Relationships.

1. INTRODUCCIÓN

La Ciencia de Materiales tiene su origen en la Metalurgia, que hacia los años 1920 comenzó a explicar las propiedades de los materiales metálicos en base a su composición y microestructura. Es, sin embargo, en la década de los años 1950 cuando las nuevas exigencias tecnológicas de los diversos sectores industriales hacen que los conceptos, teorías y técnicas provenientes de muy diversas ramas de la Ciencia (Física de la materia condensada, Química de estado sólido, Cristalografía, Física y Química de superficies, Metalurgia, Polímeros, Cerámica, etc.) tienden a interrelacionarse para dar una respuesta a tales exigencias, naciendo así el concepto moderno de Ciencia de Materiales.

ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura
CLXXXIII 727 septiembre-octubre (2007) 687-704 ISSN: 0210-1963

RESUMEN: Este artículo se refiere al desarrollo de la investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales que ha tenido lugar en España durante los últimos 20 años. Este desarrollo se debe, en gran parte, a la iniciativa del CSIC de incluir la Ciencia de Materiales como área prioritaria en su programación científica en los años 1980. El CSIC creó, en 1986-1987, cuatro institutos de Ciencia de Materiales en Barcelona, Madrid, Sevilla y Zaragoza, los dos últimos centros mixtos Universidad-CSIC. La financiación de proyectos de investigación en Ciencia de Materiales quedó establecida a tres niveles: 1) el Programa Sectorial del CSIC; 2) el Programa Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico y 3) el Programa Marco de la Comunidad Europea. El análisis del área de Ciencia de Materiales en España, muestra un aumento importante de la actividad científica en los últimos 20 años, como lo prueba el número de artículos publicados en revistas internacionales. Finalmente, se hace un análisis de las relaciones entre empresas y centros de investigación y universidades. Este artículo se refiere especialmente a la investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales en el CSIC pero también se hace referencia a la investigación en materiales en las universidades y en general al conjunto de España.

PALABRAS CLAVE: Ciencia y tecnología de materiales, Programa Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (PN), Programa Marco de la UE, Relaciones Empresa-Centros de Investigación y Universidades.

La investigación de materiales tiene como objetivo el estudio fundamental de la preparación, caracterización y propiedades de materiales a fin de obtener un conocimiento más profundo de las relaciones entre estructura y comportamiento de tal manera que permita el diseño y preparación de aquellos que satisfagan determinadas especificaciones físico-químicas que son necesarias para sus aplicaciones.

Debido a su complejidad, la investigación en materiales es necesariamente multi-disciplinaria e intersectorial; es a la vez analítica y empírica, básica y aplicada, teórica y experimental. La separación tradicional que ha existido entre el conocimiento básico de sistemas sencillos y las aplicaciones a sistemas complejos ha desaparecido en gran medida,

gracias a: i) un mejor conocimiento de la relación entre el comportamiento tecnológico de los materiales y su composición y microestructura; ii) la capacidad de caracterizar y controlar los materiales a escala microscópica, y iii) la posibilidad de la teoría de abordar el estudio de materiales y fenómenos complejos. Ciertamente, el desarrollo de nuevos materiales con propiedades cuidadosamente escogidas ha sido y es esencial para el progreso de diversos sectores de la Tecnología.

En los países más avanzados, la investigación en materiales ha recibido gran atención desde hace años, existiendo en la mayoría de las universidades programas especiales que contemplaran el carácter multidisciplinar del área. Un ejemplo de la adaptación de las universidades para el desarrollo de la investigación en este campo, fue el cambio que se produjo en los años 1960 en muchos departamentos de Metalurgia que pasaron a denominarse departamentos de Ciencia e Ingeniería de Materiales incluyendo estudios sobre metales, cerámica y polímeros. Un ejemplo de esta tendencia de las Universidades americanas fue mi propia experiencia; en 1964 emigré a Estados Unidos para incorporarme a un centro de Ciencia de Materiales de la Universidad de Texas en Austin.

Sin duda, la superioridad tecnológica de los países más avanzados se apoya en gran parte en el desarrollo y utilización de nuevos materiales. También la vitalidad del campo se manifiesta en los aspectos científicos fundamentales como se deduce del gran número de premios Nobel de Física y Química que ha recaído en científicos dedicados a temas relacionados con la Ciencia de Materiales.

En los años 1980, existían en España (Universidades y CSIC) un cierto número de grupos de investigación de prestigio internacional activos en aspectos fundamentales relacionados con la Ciencia de Materiales (especialmente en Física de la Materia Condensada, Química del sólido, Polímeros y Catálisis). Estos grupos estaban concentrados en institutos del CSIC y en algunas universidades (Universidad de Barcelona, Universidad Complutense y Universidad Autónoma de Madrid, Universidad del País Vasco, Universidad de Sevilla, Universidad de Zaragoza), aunque, en general, no se puede decir que la actividad fuera muy amplia. En el campo de la Tecnología, la actividad era mayor, pues dentro del CSIC se habían creado años atrás los Institutos de Cerámica y Vidrio, Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), Plásticos y Caucho

(después Ciencia y Tecnología de Polímeros) y Construcción y el Cemento ("Eduardo Torroja") cuya actividad era más aplicada y en muchos casos concentrada en la asistencia técnica a las empresas españolas.

En las universidades politécnicas, existían grupos de prestigio en algunos aspectos de la investigación de materiales, entre ellos: en la Universidad Politécnica de Madrid, el grupo de la ETSI de Caminos dirigido por Manuel Elices (metales, hormigones, materiales compuestos), los grupos de la ETSI de Telecomunicación, uno dirigido por Elías Muñoz (ingeniería electrónica) y el segundo dirigido por Antonio Luque (materiales fotovoltaicos); el grupo de materiales del CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas) de la Universidad de Navarra en Guipúzcoa.

Por otra parte, en el sector privado se habían creado, especialmente en el País Vasco, centros tecnológicos muy vinculados a la industria, para asistencia técnica y ayuda al desarrollo tecnológico de las empresas. Un ejemplo de ellos era y es INASMET, con sede en San Sebastián, que fue uno de los primeros en participar en el Programa Marco europeo después de la incorporación de España a la UE.

Las deficiencias en investigación eran muy patentes en materiales electrónicos y optoelectrónicos, ópticos, eléctricos y magnéticos, es decir aquellos que se definen como materiales funcionales frente a los materiales estructurales (basados en las propiedades mecánicas) o a los materiales para catálisis, que habían recibido mayor atención.

Dadas estas condiciones, la propuesta del CSIC fue la de considerar el área de materiales como prioritaria y dentro de esta área prestar especial atención a la investigación fundamental de los materiales funcionales. Para llevar a cabo esta iniciativa era evidente que, dado el carácter multidisciplinar de la investigación de materiales, se requería la participación de científicos teóricos y experimentales formados en las disciplinas de Física de la materia condensada y Química de estado sólido complementados con químicos de síntesis en compuestos orgánicos y órgano-metálicos así como por especialistas en las diversas técnicas de caracterización de sólidos (difracción de rayos X y neutrones, las diversas espectroscopias de IR, Raman, Auger, RMN, etc., así como microscopía electrónica, microscopía de efecto túnel, microscopía de fuerzas, etc.). En el CSIC existían grupos cuya actividad se adaptaba a

las citadas características, de hecho había un Instituto de Física de Materiales y otro de Física de Estado Sólido y grupos asimilables a la Química de estado sólido dedicados al estudio de minerales. Ciertamente, la Química del sólido, en los aspectos estructurales, tiene sus antecedentes en la Mineralogía.

Para el desarrollo de esta área, el CSIC adopta la siguiente estrategia: a) estimular y promover el interés de los científicos hacia la investigación en este campo mediante la creación del Programa movilizador de materiales; b) analizar las posibilidades de creación de centros de materiales y sitios de su ubicación; c) facilitar la financiación de proyectos dentro del campo de materiales a través de los presupuestos propios, de los Planes Nacionales de Investigación y de los Programas Marco de la Comunidad Europea. A las distintas etapas de este proceso me referiré en este artículo haciendo al final un análisis de los resultados y valoración de la iniciativa.

2. PROGRAMA MOVILIZADOR DEL CSIC DE CIENCIA DE MATERIALES

Por iniciativa del vicepresidente Jesús Sebastián, el CSIC crea en 1985 la figura de los Programas movilizadores cuya finalidad era la potenciación y coordinación de la investigación del CSIC en temas prioritarios de especial interés científico y proyección social, económica y cultural. La selección de los temas de los programas movilizadores se realizó tras la evaluación de diversos parámetros incluyendo el criterio científico, el carácter multidisciplinario e intersectorial, el nivel de implantación en el CSIC y la demanda socioeconómica existente. En cada programa existía un comité, nombrado por la Junta de Gobierno del CSIC, que era responsable del desarrollo del mismo mediante la realización de actividades específicas para estimular las interacciones entre los grupos de investigación participantes, así como de realizar informes y propuestas a los órganos de gobierno del CSIC.

El Comité del Programa Movilizador de Ciencia de Materiales fue nombrado por la Junta de Gobierno del CSIC en su reunión de 22 de febrero de 1985 y estaba constituido por los siguientes científicos: José María Serratosa (Director del Instituto de Físico-Química Mineral del CSIC), Rafael

Alcalá (Departamento de Óptica, Universidad de Zaragoza), Salvador de Aza (Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC), Antonio Bello (Instituto de Plásticos y Caucho, CSIC), Jaime Casabó (Departamento de Química Inorgánica, Universidad Autónoma de Barcelona), José María López-Sancho (Instituto de Física de Materiales, CSIC), José Manuel Martínez-Duart (Universidad Autónoma de Madrid e Instituto de Física de Estado sólido, CSIC), Carlos Miravittles (Instituto Jaime Almera, CSIC), Guillermo Munuera (Universidad de Sevilla y Departamento de Investigaciones físicas y químicas, CSIC) y un representante del Ministerio de Industria y Energía (Alejandro Fernández).

Anteriormente, en 1984, el vicepresidente, Jesús Sebastián había nombrado un comisión *ad hoc* formada por S. de Aza, A. Bello, J. M. López-Sancho, J. M. Martínez Duart (coordinador) y J. M. Serratosa, cuyo cometido era la preparación de un informe en el que se propusiera un plan de actuaciones encaminadas a la potenciación y coordinación de la ciencia de Materiales en el CSIC. En este informe (CSIC, enero de 1985), que constituyó la base para la actuación del Comité del Programa, tras una introducción en la que se definía el contenido del ámbito de Ciencia de Materiales y sus característica de investigación fundamental, multidisciplinar e intersectorial, se enumeraban los temas prioritarios a nivel internacional y se proponían una serie de acciones a desarrollar por el CSIC, encaminadas a la promoción de esta área científica. En estas acciones se incluían: a) dotación de un programa de becas predoctorales (20 por año) y posdoctorales (10 por año) para la formación del personal en esta área; b) incorporación de personal científico a los distintos grupos que estaban desarrollando investigación en este campo; c) establecimiento de un programa de "Máster" en Ciencia de Materiales en colaboración con las universidades; d) propuesta de creación de un centro de Ciencia de Materiales. El objetivo de este centro sería la investigación fundamental tanto teórica como experimental de materiales funcionales y se recomendaba una muy cuidadosa selección del personal y que su ubicación estuviera cercana a un campus universitario a fin de facilitar la interacción con el mundo académico. Para conseguir y mantener un nivel de excelencia, se proponía la creación de un Comité Científico Asesor formado por científicos de reconocido prestigio internacional.

El informe incluía también un análisis de la situación de la investigación de materiales en el CSIC. Se identificaron

siete grupos de investigación y tres grupos de apoyo (crecimiento de cristales, determinación de estructuras cristalinas y técnicas avanzadas de caracterización) con un total de 70 investigadores, la mayoría de ellos en institutos ubicados en Madrid. Grupos relacionados con la investigación en materiales existían en los Centros coordinados del CSIC con la Universidad de Zaragoza (Departamento de Física fundamental) o con la Universidad de Sevilla (Departamento de Investigaciones físicas y químicas) y en el Instituto "Jaime Almera" del CSIC en Barcelona, donde había un grupo dedicado a la caracterización estructural de minerales.

En sus dos primeras reuniones (marzo-abril 1985) el Comité del Programa Movilizador elaboró el plan de actividades a desarrollar en 1985, en el que se incluían: 1) celebración de la I Reunión de Materiales, 2) *workshop* sobre materiales para comunicaciones ópticas, 3) invitación a científicos extranjeros, 4) asistencia a reuniones internacionales y visitas a centros de interés. La Junta de Gobierno del CSIC, en su reunión de 23 de mayo, aprobó el presupuesto para el desarrollo de estas actividades por una cantidad total de cuatro millones y medio de pesetas. Parecidas cantidades fueron aprobadas en los dos años siguientes y he de señalar que el Comité del Programa tuvo completa libertad en la planificación y desarrollo de sus actividades.

Actividades de especial relieve en los años siguientes fueron las siguientes reuniones: a) Aplicaciones de la radiación sincrotrón, en colaboración con la CAICYT y la UAM (15-18 de septiembre de 1986); b) Técnicas experimentales con haces de neutrones en colaboración con la CAICYT y la Universidad de Zaragoza (Jaca, 20-25 de octubre de 1986); c) Nuevos materiales, perspectivas y futuro, en colaboración con la Universidad Menéndez Pelayo (Sevilla, 29 de septiembre-5 de octubre de 1986); d) Ciclo de conferencias sobre Química del estado sólido, en colaboración con la Universidad Complutense (mayo-junio 1987), e) Curso sobre espectroscopia de aniquilación de positrones en colaboración con la Universidad Complutense (San Lorenzo de El Escorial, 2-6 de septiembre de 1987).

Quizás la actividad que más ayudó a estimular la investigación de materiales en la comunidad científica española fue la celebración de las reuniones nacionales de materiales.

3. REUNIONES NACIONALES DE MATERIALES

Las reuniones nacionales de materiales surgieron como una actividad del Programa movilizador de materiales del CSIC con el fin de impulsar la investigación de materiales en España. Esta iniciativa constituía un paso importante pues de este modo ampliábamos la actividad del Programa movilizador fuera de los límites del organismo CSIC. Es justo señalar como antecedente de estas reuniones nacionales, el simposio sobre materiales celebrado en 1984 en la Universidad de Barcelona a iniciativa del profesor Javier Tejada.

I Reunión nacional de materiales. Esta primera reunión de materiales se celebró en Barcelona los días 7 y 8 de octubre de 1985 y, ciertamente, produjo una gran expectación e interés en los asistentes. El programa se estructuró en ponencias a cargo de destacados científicos en las que se presentaba una visión y análisis actualizado de las distintas áreas que comprendía la investigación en materiales. La conferencia inaugural fue impartida por el Dr. Von Klitzing del "Max Planck Institut für Festkörperforschung" que habló sobre el efecto Hall cuántico. El Dr. Von Klitzing recibió unos días después el premio Nobel de Física 1985. El número de asistentes fue de alrededor de 100 personas.

II Reunión nacional de materiales. Se celebró en la escuela de ingenieros industriales de Zaragoza los días 20-21 de noviembre de 1987 y la organización corrió a cargo del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón. El programa se estructuró, como en la reunión anterior, en ponencias y conferencias invitadas. En total se impartieron ocho conferencias por reconocidos científicos de instituciones extranjeras sobre temas de gran actualidad tales como materiales superconductores de alta temperatura, heteroestructuras semiconductoras, cristales líquidos, pulvimetalurgia, cerámicas de SiO₂-Al₂O₃ para altas temperaturas, nuevos materiales a partir de organometálicos, magnetismo de hidruros metálicos y aplicaciones industriales de los nuevos materiales. El número de asistentes fue de unas 130 personas.

III Reunión nacional de materiales. Se celebró en Sevilla del 3-5 de diciembre de 1990 y se organizó con la presentación de conferencias generales (6), comunicaciones orales (60) y pósters (106). El número de asistentes fue de alrededor de 300.

Sucesivas reuniones se celebraron en Oviedo (1993), Cádiz (1996), San Sebastián (1999), Madrid (2002), Valencia (2004), Vigo (2006) y la próxima en 2008 que se celebrará en San Sebastián.

4. CREACIÓN DE LOS INSTITUTOS DE CIENCIAS MATERIALES DEL CSIC (1985-86)

La Junta de Gobierno del CSIC tras considerar las recomendaciones del Programa Movilizador de Materiales y los preceptivos informes de la Comisión Científica decide crear cuatro Institutos de Ciencia de Materiales cuyo objetivo sería el estudio fundamental de materiales funcionales (es decir, materiales con propiedades eléctricas, electrónicas, magnéticas y ópticas). Dos de estos institutos tuvieron la consideración de centros propios del CSIC (Barcelona y Madrid) y los otros dos, la de centros mixtos con universidades (universidades de Sevilla y Zaragoza).

El primer centro que se aprobó, en 1985, fue el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), centro mixto Universidad de Zaragoza y CSIC. Persona importante en la creación de este instituto fue Domingo González, catedrático del Departamento de Física de la materia condensada de la universidad, quien desde su posición de asesor en temas de I+D del Gobierno de la Comunidad Autónoma de Aragón fue el impulsor de esta iniciativa. La Facultad involucrada en esta colaboración fue la Facultad de Ciencias. La parte de Física de esta Facultad era reconocida por sus investigaciones en Magnetismo, Óptica y fenómenos a bajas temperaturas y la parte de Química por las contribuciones en el campo de los compuestos organometálicos. Además existía ya un centro coordinado Universidad-CSIC, el Departamento de Física fundamental, lo que facilitó la organización del nuevo instituto que, ciertamente, fue en aquellos comienzos un centro de referencia para la comunidad científica del área. El primer director del ICMA fue Rafael Alcalá, catedrático de Física de la universidad. Las instalaciones del ICMA están actualmente ubicadas en dos lugares, la Facultad de Ciencias y el Centro Politécnico Superior.

Los otros centros se crearon en el año 1986. El Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB) se constituyó

inicialmente con científicos del Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaime Almera", incluidos en el área de Mineralogía y dedicados a la caracterización estructural de minerales y otros compuestos especialmente mediante técnicas de difracción de rayos X. La incorporación de especialistas en Cristalografía era importante pues el conocimiento de la estructura cristalina es esencial en la investigación de materiales por lo que no se concibe un centro de materiales sin cristalógrafos. Posteriormente, se incorporaron al ICMAB científicos del Instituto de Química del Centro de Investigación y Desarrollo (CID) del CSIC, así como físicos de la Universidad de Barcelona donde como hemos mencionado con anterioridad existía un grupo importante en magnetismo dirigido por Javier Tejada. El primer director del Instituto fue Carlos Miravittles, Profesor de Investigación del CSIC. El ICMAB se trasladó en 1991 a un nuevo edificio construido en terrenos cercanos a la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB).

El Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid (ICMM), también creado en 1986, se constituyó por la unión de tres institutos: a) Instituto de Física de Materiales, ubicado en el edificio "Torres Quevedo" b) el Instituto de Física de Estado Sólido, ubicado en la Facultad de Ciencias de la UAM y c) el Instituto de Físico-Química Mineral ubicado en el edificio del Instituto de Edafología. En 1986 fui nombrado Director de este centro por la Junta de Gobierno del CSIC. Posteriormente, en 1987, se integró en el ICMM, el Instituto de Química Inorgánica.

Una característica del nuevo instituto era la existencia de un importante grupo de teoría de la materia condensada, singularidad importante pues la interacción de teóricos y experimentales produce, sin duda, un conocimiento más profundo de los materiales y de los fenómenos. En el ICMM la actividad científica en cuanto a temas era muy diversa por lo que era necesario un gran esfuerzo por parte de todo el personal para racionalizar esa actividad mediante la elaboración de proyectos con mayor participación de los diferentes grupos del centro, aunque esto no era fácil dada la ubicación en varias sedes.

La Junta de Gobierno del CSIC fue consciente de la situación, facilitando los medios para la construcción de un nuevo edificio que albergara a todo el personal. Por parte de los responsables del proceso no tuvimos dudas para su ubicación que se decidió fuera en terrenos que el

CSIC tenía cedidos en Cantoblanco junto a la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Por indicación del presidente del CSIC (Enrique Trillas) me puse en contacto con el vicerrector de la UAM Sebastián Vieira (carta de 25 de junio de 1986) para fijar una fecha en la que como director del ICMM iría a explicarles el proyecto del nuevo instituto, como así lo hice ante gran parte del profesorado de los departamentos de Física.

Esta reunión fue de gran interés y por las preguntas formuladas pude apreciar la sorpresa que les había causado esta iniciativa del CSIC. Para la elaboración del proyecto del nuevo edificio se realizó una visita a varios centros europeos entre otros el Instituto Max Planck de investigación de sólidos en Stuttgart y el Politécnico y la Universidad de Zurich. El edificio se comenzó a construir en 1991 y aunque al principio hubo algún problema con paralización de las obras por parte del rectorado de la UAM al alegar que no habían sido informados de su comienzo, tras las oportunas explicaciones entre los dos organismos, UAM y CSIC, las obras pudieron continuar y el personal se trasladó a la nueva sede en octubre de 1995. La inauguración oficial fue el 12 de febrero de 1996.

El instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMSE) fue aprobado por la Junta de Gobierno del CSIC en 1986 tomando como núcleo base al Departamento de Investigaciones físicas y químicas ya existentes como centro coordinado de la Universidad de Sevilla y el CSIC. Los grupos que se incorporaron al nuevo instituto fueron los de superficie y catálisis, descomposición de sólidos y organometálicos por la parte química y los de propiedades mecánicas, magnetismo y ferroeléctricos por la parte física. En el instituto se incluyó también un grupo dedicado al estudio de minerales de la arcilla. El Instituto que primeramente estuvo ubicado en edificios de la universidad se trasladó en 1996 al nuevo edificio de la Isla de la Cartuja. El primer director del ICMSE fue Guillermo Munuera, catedrático de Química Inorgánica, quien fue un entusiasta colaborador en todo el proceso del desarrollo de la investigación de materiales en España.

Posteriormente se han producido incorporaciones importantes al área de materiales del CSIC. En 1999 se incorporó el Centro de Física de Materiales (CFM), centro mixto CSIC-Universidad del País Vasco en San Sebastián constituido por dos departamentos, Teoría del Estado Sólido (P. Echenique)

y Polímeros y Sólidos no-cristalinos (J. Colmenero) y muy recientemente el Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (CIN2) de Barcelona.

Actualmente en el área de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC se integran 10 institutos (6 centros propios y 4 centros mixtos con universidades) y 25 unidades asociadas.

4.1. El Comité Científico Asesor de los Institutos de Ciencia de Materiales del CSIC

Una vez creados los cuatro nuevos institutos de ciencia de materiales, el personal científico necesitaba hacer un análisis y reflexión sobre sus posibilidades y tratar de reorientar las investigaciones y concentrar los esfuerzos en temas de interés científico de acuerdo con las tendencias existentes a nivel internacional en el área de Ciencia de Materiales. Para definir estos nuevos temas nos sirvió de guía un informe del "Material Research Advisory Committee" de la "National Science Foundation" (NSF) titulado "Trends and Opportunities in Material Research" (NSF, 1984). En este informe se describen las tendencias y oportunidades en las diferentes subáreas de la Ciencia de Materiales. Primeramente se considera la ciencia de materiales desde la perspectiva de los fenómenos que presentan los materiales (propiedades electrónicas, fenómenos de red, fenómenos a bajas temperaturas, fenómenos críticos y fuera de equilibrio, defectos, propiedades mecánicas y fenómenos de superficie e intercara); en segundo lugar se hace referencia a la preparación de materiales, es decir, síntesis, procesado y fabricación no sólo de materiales conocidos sino también a la búsqueda de nuevos materiales; la tercera parte considera el área desde la perspectiva de las aplicaciones tecnológicas (materiales electrónicos, materiales eléctricos y magnéticos, materiales ópticos, materiales estructurales, materiales para catálisis y biomateriales); la última parte se refiere a la instrumentación necesaria en esta investigación en la que se incluyen los aparatos para un grupo, la instrumentación más costosa para uso en instituciones y por fin las de ámbito regional, nacional o internacional.

Para este proceso de reorientación de la actividad investigadora consideramos necesario tener el asesoramiento de científicos expertos en los distintos campos de la investigación en materiales y siguiendo las recomendaciones

del Programa movilizador propusimos la creación de un Comité Científico Asesor que estaría formado por científicos de gran prestigio a nivel internacional. Para ello nos pusimos en contacto (carta de 8 de abril de 1987) con Manuel Cardona, uno de los directores del "Max Planck Institut für Festkörperforschung", excelente científico y buen conocedor de la situación de la ciencia en España, a quien propusimos aceptara ser el presidente de citado comité. Su respuesta fue rápida y entusiasta y de acuerdo con él elaboramos la propuesta de los miembros del comité que fue aprobada por la Junta de Gobierno del CSIC. Sin duda Manuel Cardona, por su apoyo y constante ayuda, fue persona clave para el desarrollo de la Ciencia de Materiales en España.

La composición del Comité Asesor de las cuatro institutos de ciencia de materiales fue la siguiente: Manuel Cardona, presidente (*Max Planck Institut für Festkörperforschung, Stuttgart*), Máximo Altarelli (*European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble*), G. Chiarotti (*Universita degli Studi di Roma*), Paul Hagenmuller (*Laboratoire de Chimie des solides, CNRS. Bourdeaux*), T. E. Madey (*Rutgers, The State University, New Jersey*), Emilio Méndez, (*Thomas Watson Research Center, IBM, Yorktown, N.Y.*), Fernando Pradal (*Université Paul Sabatier, Toulouse*), John M Thomas (*The Royal Institution of Great Britain, London*). En 1991 se incorporó al Comité Asesor el Dr. K. Alex Muller, de IBM y premio Nobel de Física en 1987 por su descubrimiento de la superconductividad a altas temperaturas en óxidos de cobre, ytrio y bario.

La primera reunión del comité asesor tuvo lugar en Madrid los días 24-26 de mayo de 1989, y sucesivamente en Barcelona (mayo de 1990), en Sevilla (mayo de 1991), en Zaragoza (mayo de 1992) y con posterioridad en las cuatro sedes de los institutos con intervalos de dos años.

Las reuniones del comité tenían, por lo general, una duración de dos días. En primer lugar, cada uno de los cuatro directores hacía una exposición general sobre el instituto destacando los hechos más sobresalientes y el resto del día se dedicaba a la visita individual de los miembros del comité a los distintos grupos del instituto en que celebraba la reunión. El segundo día, se exponían en sesión pública las contribuciones más relevantes del instituto y finalmente se celebraba una reunión de los miembros del comité con los cuatro directores de los centros. El presidente del

comité redactaba un informe con el análisis general de los cuatro institutos y el particular del instituto sede de la visita. Este informe se enviaba directamente al Presidente del CSIC que posteriormente lo pasaba al coordinador del área y a los directores de los institutos.

Sin duda, la existencia del Comité Científico Asesor y sus recomendaciones han sido de gran ayuda para el desarrollo de estos centros.

5. LOS PLANES DE MATERIALES. FINANCIACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN DEL ÁREA

El CSIC había hecho un planteamiento de desarrollo del área de materiales cuya primera y esencial etapa fue la de estimular e incentivar a los investigadores para que concentraran sus esfuerzos en temas relacionados con esta área y así potenciar la infraestructura de personal científico (Programa movilizador de materiales). La segunda etapa consistió en la integración de los grupos seleccionados (Física y Química de estado sólido y Síntesis) en centros de investigación para potenciar su interacción y desarrollo (creación de los cuatro Institutos de Ciencia de Materiales). La tercera y última consistió en la aprobación de medidas que garantizaran el nivel científico de los grupos de investigación mediante un control externo (nombramiento de un Comité Científico Asesor para los cuatro institutos de nueva creación). Pero, por otra parte, la continuidad del sistema exigía el contar con medios económicos a los que los grupos de investigación del área pudieran acudir para la financiación de sus proyectos. Estos medios de financiación se establecieron a tres niveles: 1) nivel de organismo mediante el Programa Sectorial del CSIC; 2) nivel nacional mediante el Programa de Nuevos Materiales incluido en el Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (Plan Nacional de I+D); 3) nivel europeo mediante los Programas Marco de la Unión Europea, en particular los programas EURAM, BRITE y ESPRIT.

5.1. Programa Sectorial del CSIC

Desde el año 1982 se había producido un cambio conceptual y metodológico en la organización del trabajo científico del CSIC al orientarse éste por objetivos. Esta

nueva orientación, cuya iniciativa y realización fue en gran parte debida a la labor del entonces vicepresidente Jesús Sebastián, se plasmó en las programaciones trienales 1982-1985 y 1985-1987 y después de aprobada la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica (marzo 1986), en el Programa Sectorial (quinquenio 1988-1992) del CSIC elaborado de acuerdo con el artículo 6.2.b) de la citada Ley. El programa sectorial se estructuró en 22 ejes de actividad científica que se formulaban como subprogramas y que incluían prácticamente toda la actividad del CSIC en el quinquenio (1988-1992).

El desarrollo de los subprogramas incluía tres grandes líneas de actuación: a) ejecución de proyectos de investigación; b) acciones sobre la estructura científico-técnica (formación e incorporación de personal, equipamiento instrumental y creación y reorganización de institutos y centros de investigación); c) acciones sobre la transferencia de resultados (publicaciones y transferencia de tecnología a las empresas). El presupuesto de los subprogramas ascendía para el quinquenio a 39.608 millones de pesetas que se distribuían en 4.730 millones de pesetas para personal con cargo a los subprogramas, 17.676 millones de pesetas para la financiación de proyectos, 16.793 millones de pesetas para equipamiento instrumental y servicios y 409 millones de pesetas de gestión.

El subprograma Ciencia y Tecnología de Materiales fue elaborado por una comisión integrada por: José M. Serratos, coordinador (ICMM), Rafael Alcalá (ICMA), Salvador de Aza (ICV), José Luis Millán (IPC), Carlos Miravittles (ICMAB), Guillermo Munuera (ICMSE) y Alfonso Vázquez (CENIM) e incluía los siguientes objetivos:

- Estudios fundamentales teóricos y experimentales dirigidos a la modelización de materiales.
- Desarrollo de nuevos métodos de síntesis y procesado de materiales y de técnicas de caracterización.
- Materiales cerámicos y vítreos avanzados.
- Aleaciones metálicas de altas prestaciones con estructura controlada,
- Materiales magnéticos blandos (vidrios metálicos), materiales para imanes permanentes (a base de Fe-Nd-B o tierras raras-Co), materiales para registro de alta densidad, materiales superconductores,
- Materiales poliméricos avanzados.

- Materiales para láseres y para comunicaciones y registro óptico.
- Materiales para micro y optoelectrónica.
- Materiales con actividad catalítica selectiva.
- Membranas de transporte selectivo y materiales de alta conductividad iónica.

En la elaboración del subprograma, la comisión procuró que su contenido fuese lo suficientemente amplio para que pudiera ser la base de un programa nacional de actividades que se incluyera en el Plan Nacional de I+D.

El presupuesto del subprograma de Ciencia y Tecnología de Materiales para el quinquenio 1988-1992 fue de 4.060 millones de pesetas, distribuido en los siguientes apartados: personal contratado con cargo al subprograma, 287 millones de pesetas; financiación de proyectos, 1.723 millones de pesetas; equipamiento instrumental y servicios 2.000 millones de pesetas; gestión 50 millones de pesetas. En este presupuesto se incluía la financiación para la construcción de nuevos edificios para los Institutos de Ciencia de Materiales de Barcelona y Madrid.

5.2. Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico

Este plan (Plan Nacional de I+D), establecido en la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica (Ley 13/1986, de 14 de abril, BOE de 18 de abril de 1986), era el mecanismo en manos del Estado para la promoción y programación de la investigación científica y técnica. La elaboración, coordinación y seguimiento del Plan Nacional de I+D era responsabilidad de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), establecida también en la Ley de la Ciencia, y que estaba formada por representantes de los Departamentos Ministeriales. Los Programas Nacionales incluidos en el Plan Nacional de I+D para el cuatrienio 1988-1991 y aprobados por el Gobierno (Consejo de Ministros de 18 de febrero de 1988) fueron en total 24 y uno de ellos fue el Programa Nacional de Nuevos Materiales.

La elaboración del Programa de Nuevos Materiales se inició en el año 1985 cuando a iniciativa de la CAICYT y el CDTI se encarga a una comisión de expertos la redacción de un borrador de programa. Esta comisión presentó su propuesta en 1987 cuando ya la CAICYT había desapare-

cido y se participaba ya en los comités de gestión de los programas de la Comunidad Europea. La CICYT consideró necesario una revisión de la propuesta para completar y actualizar los datos aportados sobre la situación científica e industrial y sobre todo para adecuar los temas prioritarios a los programas europeos en particular EURAM y BRITE. El Secretario General del Plan Nacional, Emilio Muñoz, encargó la revisión de la anterior propuesta y redacción de un nuevo texto a un grupo integrado por Guillermo Munuera, un representante del Ministerio de Industria y yo mismo. Para ello tuvimos la colaboración de miembros del Comité del Programa movilizador del CSIC y otros científicos, entre ellos, Fernando Agulló, Fernando Briones, Antonio Hernando, Francisco José Baltá, Miguel Alario y Óscar Ruano. El nuevo texto fue presentado a la Comisión del Programa de Nuevos Materiales que, tras pequeñas modificaciones, elevó el texto definitivo a la CICYT, que aprobó su inclusión en el Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (19 de febrero de 1988).

El Programa de Nuevos Materiales establecía las prioridades de acuerdo con la siguiente clasificación de los materiales:

- Materiales metálicos y sus aleaciones: aleaciones ligeras a base de Al, Mg y Ti; aleaciones magnéticas; aleaciones resistentes a altas temperaturas; procesos.
- Materiales cerámicos y vidrios: cerámicas estructurales; cerámicas eléctricas y electrónicas; vidrios; procesos.
- Materiales poliméricos avanzados: nuevos materiales poliméricos; materiales poliméricos para aplicaciones específicas (conductores, semiconductores, piezo o piroeléctricos, fotosensibles); procesos.
- Materiales compuestos: matriz metálica; matriz cerámica; matriz orgánica; procesos.
- Otros materiales avanzados: semiconductores; superconductores; conductores iónicos; biomateriales; membranas de transporte selectivo; catalizadores.

Como líneas prioritarias horizontales de carácter general se establecían: a) Síntesis y preparación; b) Caracterización y c) Comportamiento de materiales (corrosión, envejecimiento, nuevos métodos de ensayo y control; estudios de fiabilidad).

Como puede deducirse de los contenidos, el Subprograma de Materiales del CSIC se adaptaba perfectamente al Pro-

grama Nacional de Nuevos Materiales del Plan Nacional de I+D.

Las áreas de actuación del Programa se referían a los tres aspectos siguientes: 1) Formación y especialización; 2) Investigación científica; 3) Desarrollo tecnológico e innovación.

La financiación prevista en el cuatrienio 1988-1991 para el Programa Nacional de Nuevos Materiales ascendía a 29.703,9 millones de pesetas repartido en los siguientes conceptos: a) Formación de personal, 1.464,0 millones de pesetas; b) Investigadores y contratados, 368,0 millones de pesetas; c) Infraestructura, 3.044,0 millones de pesetas; d) Proyectos, 2.366,0 millones de pesetas; e) Planes de Industrias, 8.650,0 millones de pesetas; f) Financiación previa de origen sectorial, 13.603,9 millones de pesetas; y otros gastos, 208,0 millones de pesetas.

5.3. Programa Marco de I+D de la Unión Europea

Cuando España se integra en la Unión Europea (1 de enero de 1986) estaba vigente el I Programa Marco cuya vigencia cubría el período 1984-1987. Había varios programas relacionados con materiales (BRITE; ESPRIT, EUREKA) aunque el que específicamente cubría esta área era el Programa EURAM (*European Research on Advanced Materials*).

El primer programa EURAM se inició en junio de 1986, dentro de la Dirección General XII, Ciencia, Investigación y Desarrollo, de la Comisión de las Comunidades Europeas. Como representantes españoles en el Comité de Gestión de la Acción conjunta programática "Materias primas y Materiales avanzados" fuimos nombrados M. Fontanilla por el Ministerio de Industria para los temas de materias primas y yo mismo por el Ministerio de Educación y Ciencia para los temas de materiales avanzados. El Comité de gestión de EURAM fue consciente del gran esfuerzo que estaba realizando España en investigación científica y nuestra representación tuvo un gran apoyo dentro de ese comité. De hecho M. Fontanilla fue elegido vicepresidente del mismo. El comité consciente del impulso especial que se dedicaba en España y en particular en el CSIC a la investigación de materiales, nos encargó la organización de la reunión "Concerted European Action on Magnets", CEAM, que se

celebró en Madrid en abril de 1988 con participación de investigadores en materiales magnéticos y con asistencia de los máximos responsables de la Política Científica de la Comunidad Europea.

Estas acciones concertadas, a semejanza de los programas movilizados del CSIC, tenían como objetivo estimular a la comunidad científica para que dedicara sus trabajos a temas actuales de interés científico o tecnológico. En aquellos años se habían descubierto simultáneamente en Japón (por la empresa *Sumitomo*) y en Estados Unidos (por la empresa *General Electric*) nuevos materiales magnéticos a base de neodimio-hierro-boro que constituyeron un gran avance como materiales para imanes permanentes. Esta reunión y el apoyo de la Comisión Europea constituyó un gran impulso para el desarrollo de los programas de investigación de materiales en España.

El presupuesto del programa EURAM I era de 30 millones de Ecus para el período 1986-1989. Los temas de la convocatoria se dividían en tres áreas:

Área 1: Materiales metálicos que incluían: aleaciones de Al, Mg, o Ti; materiales eléctricos para contactos; materiales magnéticos; materiales para recubrimientos. Área 2: Cerámicas. Optimización de cerámicas de uso industrial; materiales compuestos de matriz cerámica; intercaras metal/cerámica; cerámicas para uso a altas temperaturas. Área 3: Materiales compuestos; materiales compuestos de matriz orgánica; materiales compuestos de matriz metálica; otros materiales para aplicaciones específicas.

Los temas estaban especialmente relacionados con materiales estructurales para uso en las industrias de medios de transportes (aeroespacial, industria del automóvil, ferrocarril, etc.). Sólo en el último apartado: "otros materiales para aplicaciones específicas" se podían introducir materiales funcionales (eléctricos, electrónicos, ópticos, etc.). Esta deficiencia se quiso corregir en el Programa EURAM II, para el período 1989-1992, pero para este período la Comisión decidió unir los programas EURAM y BRITE en un solo programa para "Las Tecnologías de la Manufactura y los Materiales Avanzados" con apoyo preferente al desarrollo tecnológico.

El nuevo programa BRITE-EURAM con un presupuesto de cerca de 440 millones de ecus para el trienio 1989-

1992 era uno de los programas más importantes de las actividades de I+D de la Comunidad. En él se incluían materiales funcionales ("materiales para aplicaciones ópticas, magnéticas, eléctricas y superconductoras") aunque parte de ellos (materiales para opto-electrónica y magneto-óptica, capas delgadas para sensores, hilos superconductores, entre otros) estaban incluidos en el programa ESPRIT. En ambos casos, BRITE-EURAM Y ESPRIT estaban enfocados hacia la aplicación y el desarrollo tecnológico.

A la convocatoria del programa EURAM I 1986-1989 se presentaron proyectos con participación de los 12 países de la Comunidad (incluida España). En 14 de los 84 proyectos aprobados participaban científicos que trabajaban en instituciones españolas y en tres de ellos, participaban institutos del CSIC. La participación española fue aumentando en las sucesivas convocatorias y por ejemplo en el año 1992, los contratos firmados por el CSIC dentro del Programa Marco III de las Comunidades Europeas fueron 63 por una cantidad total de 15.143.803 Ecus, de los cuales 5 correspondían al programa BRITE-EURAM y 7 al programa ESPRIT.

Durante los tres primeros años del VI Programa Marco (2003-2005) se adjudicaron fondos por un valor total de 11.479 millones de euros de los cuales España obtuvo 655 millones de euros lo que representaba un incremento del 30% sobre el promedio anual del V PM. De esos 655 millones, 83,1 millones correspondían al tema Nanotecnologías, Materiales y Producción. En el mismo período 2003-2005, la financiación obtenida por el CSIC fue de 64,1 millones de euros de los cuales 12,01 millones de euros correspondían al área de Ciencia y Tecnología de Materiales, cantidad sólo superada por el área de Biología y Biomedicina (13,96 millones de euros).

6. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN

A partir de 1986 y como consecuencia de la iniciativa del CSIC, la investigación de materiales en España experimentó una rápida evolución. Ciertamente esta iniciativa del CSIC había producido un fuerte impacto en el sector académico que reaccionó con rapidez poniendo los medios para facilitar el desarrollo de la investigación en esta área.

A esta rápida evolución contribuyeron dos hechos que se produjeron casi simultáneamente: la incorporación de España a la Comunidad Europea y el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura por G. J. Bednorz y K. Alex Muller a quienes se le concedió el premio Nobel de Física en 1987.

Entre las acciones que se produjeron en el sector académico fue especialmente significativo la creación en la UAM de un Instituto de Ciencia de Materiales al que se le dio el nombre de Nicolás Cabrera, ilustre físico y persona clave en el desarrollo de la Física en España en la segunda mitad del siglo XX. La creación de este Instituto fue la mejor prueba del acierto del CSIC en su iniciativa de promover y desarrollar el área de Ciencia de Materiales. El ejemplo de la UAM fue seguido por otras Universidades.

6.1. Evolución del personal en el área de materiales del CSIC

Como consecuencia de la creación de los cuatro institutos de Ciencia de Materiales, en el CSIC hubo un aumento rápido del personal científico dedicado a la investigación en materiales. En el informe del Programa movilizador (1984) se menciona que en el CSIC existían unos 10 grupos que realizaban investigación en el área de materiales en los que se incluían un total de 70 investigadores. En 1987, después de creados los cuatro nuevos institutos, el número de investigadores del CSIC era de unos 220 a los que había que añadir unos 70 profesores de universidad que estaban incluidos en los centros mixtos de Sevilla y Zaragoza. A partir de 1988, establecidos ya los nuevos (8) ámbitos científicos en el CSIC, aprobado el Plan Nacional de I+D e incorporada España a la Comunidad Europea, se consolida el sistema de investigación científica de acuerdo con las referencias de la programación establecida. En la Tabla 1 se da la evolución del personal científico investigador (profesores de investigación, Investigadores y científicos titulares) y del personal en formación en el ámbito de Ciencia y Tecnología de Materiales en el período 1988-2005.

La Tabla 1 muestra la evolución del número de investigadores en el ámbito de materiales en los centros del CSIC. Desde el año 1988 cuando ya se habían consolidados los nuevos institutos de ciencia de materiales y se había in-

corporado al ICM de Madrid el personal del Instituto de Química Inorgánica, hasta 2005, el aumento del número de investigadores es del 50%.

TABLA 1: EVOLUCIÓN DEL PERSONAL CIENTÍFICO Y PERSONAL EN FORMACIÓN (BECARIOS PREDOCTORALES) EN EL ÁMBITO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES DEL CSIC EN EL PERÍODO 1988-2005

	1988	1992	1996	2000	2005
Personal Científico del CSIC	253	275	267	316	356
Personal de Universidades (Centros Mixtos)	75	112	110	151	148
Becarios Predoctorales	152	197	184	160	219
Total	480	584	561	627	723

Fuente: *Memorias del CSIC*.

6.2. Actividad científica (publicaciones, citas y factor de impacto)

Los indicadores más aceptados para evaluar la actividad científica son los referentes a las publicaciones (número e impacto de las mismas). Esto es especialmente cierto cuando se trata de la evaluación de grupos, instituciones o del conjunto de la actividad en un área científica o en un país. Actualmente existen bases de datos que permiten estas evaluaciones y entre ellas destacan las del Institute for Scientific Information (ISI). En esta base de datos la definición de las áreas (Física, Química, Bioquímica, Ciencia de Materiales, etc.) se basa en las revistas que el ISI clasifica como pertenecientes a cada una de esas áreas. Ahora bien, como la Ciencia de Materiales es un ámbito científico multidisciplinar, los artículos relacionados con este ámbito aparecen no sólo en las revistas clasificadas como ciencia de materiales sino también en las clasificadas en el ámbito de la Física o de la Química. Por ello la producción científica de un centro dedicado a la investigación en materiales es superior a la que se deduce del análisis de las publicaciones de este ámbito en la base de datos del ISI.

Un primer estudio sobre la producción científica en el área de Ciencia de Materiales en España fue realizado por el CINDOC (A. Méndez *et al.*, 1993) a fin de analizar el impacto que produjeron la iniciativa e incentivos del CSIC, el Plan Nacional de I+D y los Programas de la Comunidad Europea sobre esa producción. En este estudio se toma como muestra la producción bibliográfica de los científicos españoles que, de acuerdo con el criterio de expertos en el área, investigaban en Ciencia de Materiales en 1990 y se compara el número de artículos publicados en el período 1985-1986, cuando todavía no existía una promoción y una financiación específica de esta área, con los artículos publicados en el período 1989-1990 por esos mismos científicos, producción que representaba una respuesta a esos incentivos. Las revistas seleccionadas son las internacionales incluidas en la base de datos del ISI que cubren no sólo el área específica de materiales (Metalurgia, Cerámica, Polímeros) sino también otras áreas relacionadas con esa investigación (Física de la materia condensada, Química física, Física aplicada, Química inorgánica, etc.).

Los datos de la Tabla 2 muestran con claridad, especialmente en el caso del CSIC, la influencia que las acciones e incentivos propuestos por el CSIC en los años 1985-1986, el Plan Nacional de I+D y la incorporación de España a la Comunidad Europea, tuvieron en el desarrollo del área de materiales.

TABLA 2: ARTÍCULOS PUBLICADOS POR CIENTÍFICOS ESPAÑOLES DEL ÁREA DE MATERIALES EN LOS PERÍODOS 1985-1986 Y 1989-1990

Ámbito	1985-1986	1989-1990	Incremento
España	603	847	40,5
CSIC	376	713	89,6

Fuente: A. Méndez *et al.*, 1993.

En esos dos períodos, la producción científica total (todas las áreas) de España fue, según la base de datos del ISI (E. Garfield, 1994), de unas 14.500 publicaciones internacionales en los años 1985-1986 y de unas 20.000 en los años

1989-1990 con un incremento del 37,9%, muy parecido al indicado en el análisis bibliométrico de A. Méndez *et al.*, pero sensiblemente inferior al incremento experimentado por el número de publicaciones del CSIC en Ciencia de Materiales.

En los años 1990, a pesar de que el gasto en I+D, en término del % del PIB, permaneció prácticamente constante, el número de las publicaciones de científicos españoles (en todas las áreas) siguió aumentado y en 1992 este número era de alrededor de 14.100 aunque el impacto medio (número de citas dividido por el total de trabajos publicados) o el factor de impacto (número de citas dividido por el número de artículos que las han recibido) estaban muy por debajo de los valores de la Comunidad Europea. Para el período 1988-1992 los artículos españoles fueron citados un 30% menos que el promedio de los artículos comunitarios (E. Garfield, 1994).

En el período 1993-1997, en el área de Ciencia de Materiales, España ocupaba el lugar 15 por el número de artículos, el lugar 13 por el número de citas y el lugar 10 por el impacto medio (citas/artículos) aunque el primer artículo de alto impacto en el que figuraba un autor con dirección en una institución española ocupaba el puesto 83. Estos datos se obtuvieron seleccionando los 300 artículos más citados (artículos de alto nivel) en cada uno de los 5 años, que habían sido publicados en las revistas incluidas en Ciencia de Materiales de acuerdo con la clasificación del ISI (J. C. Galván *et al.*, 2000).

En este período (1993-1997) se publicaron (en todas las áreas) un total de 77.154 artículos en los que al menos un autor tenía su dirección en España lo que representaba el 2,37% del total de publicaciones mundiales y situaba a España en el lugar 11 del *ranking* mundial. En Ciencia de Materiales, el total de artículos españoles publicados en el mismo período (1993-1997) fue de unos 2.300 lo que representaba el 1,93% del total del área. Cuando se considera el impacto relativo de las publicaciones españolas en las distintas áreas científicas, España está, en el período 1993-1997, por debajo de la media mundial en todas las áreas excepto en tres: Ingeniería (+40%), Ciencia de Materiales (+9%) y Física (+2%). En la Tabla 3 se dan los valores de estos indicadores correspondientes a los períodos 1993-1997, 1997-2001 y 2001-2005.

TABLA 3: PARTICIPACIÓN DE ESPAÑA, EN LAS PUBLICACIONES CIENTÍFICAS MUNDIALES EN PERÍODOS DE CINCO AÑOS, EXPRESADA EN % DEL TOTAL DE ARTÍCULOS EN TODAS LAS ÁREAS Y EN EL ÁREA DE CIENCIA DE MATERIALES. SE INCLUYE EL IMPACTO RELATIVO DE LAS PUBLICACIONES EN EL ÁREA DE CIENCIA DE MATERIALES COMPARADO CON LA MEDIA MUNDIAL

Período	Artículos españoles en todas las áreas	% del mundial todas las áreas	% del mundial ciencia de materiales	Impacto relativo
1993-1997	77.154	2,37	1,93	+9%
1997-2001	101.316	2,86	2,64	-2%
2001-2005	124.097	3,18	2,89	+3%

Fuente: ISI Web of Knowledge.

Como indica la Tabla 3, el % de las publicaciones en las que aparece al menos un autor con dirección en España, tanto en el total de las áreas científicas como en el área de Ciencia de Materiales aumenta progresivamente en el periodo 1993-2005 y el impacto medio de las publicaciones españolas en Ciencia de Materiales tiene un valor por encima o cercano al valor medio mundial del área.

Este aumento significativo de la actividad científica en el área de Ciencia de Materiales en España tuvo el reconocimiento de la comunidad científica internacional y así lo evidenció el hecho de la dedicación, por parte de la revista "Advanced Materials" (actualmente con un índice de impacto de 9,1), de un número especial (n.º 2, febrero de 1995) a la Ciencia de Materiales en España.

Otra manera de evaluar la actividad científica en el área de Ciencia de Materiales es a partir del total publicaciones de los centros que se dedican a la investigación en materiales aunque, por el carácter multidisciplinar de este campo, estas publicaciones pueden aparecer en revistas de otras áreas generalmente en las de Física y Química.

En la Tabla 4 se da la evolución del número de publicaciones internacionales (revistas recogidas por el ISI) de los Institutos incluidos en el área de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC en el periodo 1986-2005. Se incluyen también el número de artículos por científico y el número de tesis doctorales leídas en cada uno de los años.

TABLA 4: EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE ARTÍCULOS PUBLICADOS POR LOS CIENTÍFICOS DEL ÁREA DE MATERIALES DEL CSIC EN EL PERÍODO 1986-2005. SE INCLUYE TAMBIÉN EL NÚMERO DE TESIS LEÍDAS EN CADA UNO DE LOS AÑOS

	1986	1988	1992	1996	2000	2005
Artículos en revistas ISI	279	440	602	860	1.160	1.270
Artículos/Científicos*	1,1	1,3	1,6	2,3	2,5	2,5
Tesis doctorales	35	53	23	48	58	57

* En los científicos se ha incluido el personal universitario de los centros mixtos.

Fuente: Memorias anuales del CSIC.

Como se deduce de la Tabla 4, el aumento del número de publicaciones en revistas del ISI es significativo y alcanza en 2005 valores muy importantes, tanto en el número total de artículos por año como en el número de artículos por investigador, cifras que son superiores a las de algunas instituciones de ámbito internacional. Sin embargo, el número de publicaciones en revistas ISI, con ser importante, no garantiza la calidad y trascendencia de las mismas, factores que están ligados al impacto medio (n.º de citas/n.º de artículos).

Los últimos datos publicados en la ISI Web of Knowledge correspondientes a los últimos diez años (del 01/01/1997 al 28/02/2007), confirman los valores y tendencias anteriores. En este periodo, España figura, en el total de áreas,

en el lugar 10 por número de publicaciones (254.968), el lugar 11 por el número de citas (2.029.699) y el lugar 35 por citas/artículos (7,96). En Ciencia de Materiales España figura en el lugar 11 por el número de publicaciones (9.579), el lugar 10 por el número de citas (46.266) y el lugar 24 por citas/artículos (4,83), del total de 77 países incluidos. Este último valor (4,83) está un poco por encima de la media mundial (4,60).

En la misma base de datos, para el mismo período de años y para el área de Ciencia de Materiales, en la relación por Instituciones, el CSIC figura en el lugar 9 por número de publicaciones (2.968) y el lugar 11 por número de citas (16.281) en ambos casos por delante del CNRS cuyos valores respectivos son 2.550 artículos y 15.635 citas. El impacto medio (citas/artículos) del CSIC es 5,49 por encima de la media mundial (4,60) y un poco por debajo de la del CNRS (6,13). Sin embargo, el impacto medio, a pesar de ser superior a la media mundial está por debajo del de muchas instituciones y coloca al CSIC en el puesto 321 de un total de 536 instituciones. Algunos valores del impacto de instituciones que deben ser referentes para el CSIC y otras instituciones españolas son: Inst. Weizmann, 16,41 con 249 artículos; MIT, 13,87 con 1.537 artículos; CALTECH, 13,40 con 490 artículos; Univ. Standford, 11,70 con 688 artículos; Max Planck Gessellschaft, 10,79 con 3.026 artículos; Univ. Cambridge 9,15 con 1.953 artículos.

Los valores del impacto medio, en Ciencia de Materiales, de las universidades española (superiores a la media mundial, 4,60) son: Universidad de Vigo, 8,25 con 174 artículos (lugar 125); Universidad de Valencia, 6,92 con 163 artículos (lugar 191); Universidad de Valladolid, 6,92 con 154 artículos (lugar 193); UAM, 6,27 con 346 artículos (lugar 246); Universidad Politécnica de Valencia, 5,89 con 214 artículos (lugar 275); Universidad Complutense, 5,79 con 588 artículos (lugar 282); Universidad Autónoma de Barcelona, 5,69 con 185 artículos (lugar 292); Universidad de Zaragoza, 5,68 con 220 artículos (lugar 294); Universidad de Barcelona 5,39 con 619 artículos (lugar 331).

De todos estos datos se deduce que el número de las publicaciones científicas españolas en el áreas de Ciencia de Materiales ha aumentado significativamente desde el año 1986, alcanzando actualmente valores que colocan a España y a instituciones españolas en los primeros lugares del *ranking* internacional (España en el lugar 11

de 77 países y el CSIC en el lugar 9 entre 536 instituciones). Sin embargo, el impacto que estas publicaciones producen en la comunidad científica internacional no es, en general, de la importancia que corresponde a una investigación de excelencia. Estos datos merecen una reflexión, pues, en definitiva, lo que parece deducirse de ellos es que los trabajos de investigación se centran más hacia proyectos de poco riesgo que garanticen publicaciones rápidas que hacia proyectos con mayor alcance y repercusión científica o tecnológica. Hay que insistir que en el proceso de evaluación del personal investigador debe primar la calidad e importancia de su contribución científica y no el número de sus publicaciones, como ocurre actualmente.

6.3. Contribuciones de interés a la Ciencia y Tecnología de Materiales

Los temas objeto de estudio dentro del área de materiales por los científicos españoles han sido y son muy variados y cubren un amplio espectro de la problemática del área tanto en sus aspectos teóricos como experimentales. Un hecho a destacar es la rapidez con la que los investigadores españoles han respondido ante fenómenos o propiedades inesperadas que exhibían nuevos materiales. El caso más evidente fue la reacción de los científicos españoles ante el descubrimiento de la superconductividad a altas temperaturas por Bednorz y Muller en 1986, reacción que se vio favorecida por la implementación del Programa MIDAS establecido y financiado por la CICYT y las compañías eléctricas (OCIDE, REE, UNESA) en 1988. Entre las primeras reacciones cabe destacar al departamento de Química Inorgánica de la Universidad Complutense, a los Departamentos de Física de la Universidad de Santiago y de la UAM así como a grupos de los Institutos de Ciencia de Materiales del CSIC (ICMA, ICMB, ICMM).

En realidad, no se puede destacar, en el área de Ciencia y Tecnología de Materiales, una temática en la que los científicos españoles hayan realizado una contribución significativa de impacto y trascendencia generalizada, pero sí existen aportaciones en aspectos parciales que son de interés y tienen el reconocimiento de la comunidad científica internacional como se evidencia por las citas que reciben estas aportaciones. Entre ellas y sin tratar de ser exhaustivos, mencionamos las siguientes:

- Superconductividad de alta temperatura. Estudios teóricos para explicar el origen de este fenómeno lo que ha llevado al desarrollo de la Física de los sistemas fuertemente correlacionados. En las aplicaciones, los estudios se han dirigido al desarrollo de procesos y a determinar la microestructura que había que generar para evitar que las fronteras de grano limitaran el paso de las corrientes eléctricas (fabricación de cintas superconductoras y láminas superconductoras nanocomposite).
- Magnetorresistencia colosal de las manganitas. Temática relacionada con la anterior pues se trata de óxidos con fuerte correlación electrónica y donde coexisten dos fases una ferromagnética metálica y otra antiferromagnética aislante.
- Desarrollo del programa SIESTA ("Spanish Initiative for Electronic Simulation of Thousand Atoms"). Este programa permite obtener información sobre la estructura electrónica de sistemas complejos. Actualmente, el programa es utilizado por más de un centenar de grupos de todo el mundo. El desarrollo del programa se inició en la UAM y en el han colaborado científicos de los institutos de materiales del CSIC.
- Nanomateriales magnéticos con aplicaciones como sensores y en Biomedicina.
- Materiales moleculares. Estas investigaciones, en especial en propiedades magnéticas, se realizan en varios institutos de materiales del CSIC y en varios departamentos universitarios. Entre estos últimos queremos destacar el grupo de materiales moleculares del Instituto de Ciencia Molecular de la Universidad de Valencia.
- Cristales fotónicos.
- Cristales líquidos para almacenamiento óptico.
- Materiales poliméricos para tecnologías avanzadas (bioactivos, fotosensitivos y membranas semipermeables).
- Materiales híbridos nanocomposites para sensores y dispositivos electroquímicos.
- Análisis, procesado y reactividad de superficies.
- Fotoactividad en óxidos semiconductores.
- Materiales intrermetálicos.
- Aleaciones ligeras de grano ultrafino.
- Materiales eutécticos cerámicos.
- Desarrollo de la teoría de sinterización para la obtención de materiales cerámicos.
- Materiales cerámicos bioactivos.
- Cerámicas tenaces.
- Materiales compuestos.

Investigaciones con fuerte impacto en el sector industrial se realizan en varios centros y departamentos. Entre estos merecen destacarse el Instituto de Tecnología Química (ITQ, incluido en el área Ciencias y Tecnología Químicas del CSIC) por los trabajos sobre búsqueda y obtención de nuevos catalizadores, especialmente, para procesos de petroquímica y refino, y el Instituto de Magnetismo Aplicado "Salvador Velayos" de la Universidad Complutense y Unidad Asociada al CSIC.

En aspectos fundamentales hay que destacar las investigaciones sobre Física de la materia condensada que se realizan en departamentos de universidades y en institutos de materiales del CSIC (CFM, ICMA, ICMB, ICMM). Física es el área científica que, en términos de impacto de las publicaciones, ha estado siempre por encima del valor medio mundial. Actualmente (período 2001-2005) ocupa el primer lugar entre las áreas científicas españolas con un impacto relativo (+20%) muy por encima de la media mundial (base de datos ISI). Asimismo, hay que destacar las investigaciones, que se llevan a cabo en departamentos de Química de universidades sobre estado sólido y sobre compuestos organometálicos.

6.4. Relaciones investigación-empresas

El esfuerzo realizado para la promoción de la investigación en Ciencia y Tecnología de materiales en España que ha producido un notable incremento en la actividad investigadora de las universidades y de los centros públicos de investigación no ha producido efectos parecidos en el caso de las empresas.

El retraso relativo de la participación de las empresas españolas en el sistema de I+D sigue siendo el punto más débil del necesario proceso de convergencia europea (Informe COTEC, 2006). En la I+D, el gasto empresarial en España representa el 0,6% del PIB frente a una media europea del 1,3. En cuanto al número de investigadores en las empresas españolas el déficit es significativo (Tabla 5). En términos de investigadores por 10.000 habitantes, en las empresas españolas hay 8,5 frente a la media de la Unión Europea-25 de 12,9 y a los valores de Francia y Alemania que son 17,2 y 19,6 respectivamente.

Esto significa, en términos totales, que el déficit de investigadores en las empresas españolas es de unos 18.500 para



llegar a la media de la UE-25 y de alrededor de 44.000 para llegar a valores parecidos a los de Francia o Alemania (Tabla 5). En contraste, el número de investigadores (EJC) por

10.000 habitantes de las universidades españolas (12,8) está por encima de la media de la UE-25 (9,4) y también de los valores de Francia (10,6) y Alemania (8,0).

TABLA 5: NÚMERO DE INVESTIGADORES (EJC) TOTALES Y POR 10.000 HABITANTES, POR SECTORES DE EJECUCIÓN EN 2005

	Empresas		Universidad		Gobierno		Total	
	Número Investig.	Por 10.000 hab.	Número Investig.	Por 10.000 hab.	Número Investig.	Por 10.000 hab.	Número Investig.	Por 10.000 hab.
UE-25*	592.992	12,9	430.649	9,4	157.327	3,4	1.209.077	26,4
España	35.521	8,5	53.779	12,8	20.240	4,8	109.753	26,1
Francia*	106.439	17,2	65.498	10,6	24.779	4,0	200.064	32,4
Alemania	162.000	19,6	66.000	8,0	40.100	4,9	268.100	32,5
Suecia	34.055	37,8	16.792	18,7	2.844	3,2	54.041	60,0

* Datos de 2004.

Fuente: OECD, *Main Science and Technology Indicators*, December 2006.

En cuanto a la participación de las empresas en la financiación externa de organismos de investigación, el número de convenios y contratos firmados por el CSIC con empresas e instituciones en 2005 asciende a 1.143 contratos con una financiación comprometida de 41.924.710 €. Para el área de Ciencia y Tecnología de Materiales los valores son 313 contratos con una financiación comprometida de 5.292.070 € (Memoria 2005 del CSIC).

El aparente desinterés de la empresa española por la Tecnología, que indican los datos anteriores, es difícil de explicar. Probablemente tiene mucho que ver con el tamaño de la empresa y el sector de actividad. En todo caso, el tema exige una reflexión sobre el proceso de innovación y producción industrial (definición de objetivos y reparto de tareas y responsabilidades), tanto por parte de las empresas como por parte de los organismos de investigación.

Este proceso incluye tres fases: Investigación-Desarrollo tecnológico-Producción. Las responsabilidades de la primera y tercera fase están claras. Las dudas surgen en el caso del desarrollo tecnológico que es el paso intermedio

por el cual el descubrimiento científico original es llevado al punto en que es puesto en uso práctico. Es un proceso de excepcional importancia, pero tanto las estructuras de los centros como las características del personal que se requieren para hacer desarrollo son distintas de las que se requieren para hacer investigación. En la mayoría de los casos el desarrollo se realiza en las empresas aunque en algunos países se han creado organismos dedicados a la aplicación y al desarrollo tecnológico en apoyo de la Industria como es el caso del TNO en Holanda o el de la Fraunhofer Gesellschaft en Alemania con 56 institutos y 12.500 empleados.

En cuanto al futuro del desarrollo tecnológico en las empresas españolas, el pronóstico, según el informe COTEC 2006, parece ser optimista¹. En las consideraciones finales basadas en la encuesta que anualmente realiza a un grupo de expertos, el informe COTEC deduce que "el sistema español de innovación está progresando de manera positiva" y que "todo parece indicar que España ha regresado rápidamente al arduo camino de la convergencia tecnológica con Europa".

7. CONCLUSIONES

El desarrollo de la investigación en Ciencia de Materiales en España, durante los últimos 20 años, se debe en gran parte a la iniciativa que, en los años 1980, tomó el CSIC de promover esta área científica incluyéndola como prioritaria en su programación. La acción fue oportuna y necesaria pues en aquellos años de convergencia con Europa, esta área figuraba como prioritaria en todas las programaciones de los países avanzados y también en la de la Comunidad Europea.

La estrategia diseñada por el CSIC tenía las siguientes etapas: creación de cuatro institutos de Ciencia de Materiales cuyo objetivo era el estudio fundamental de materiales funcionales (basados en propiedades eléctrica, magnéticas, electrónicas o ópticas); establecimiento de medidas que garantizaran un alto nivel de las investigaciones a desarrollar mediante la creación de un Comité Científico Asesor formado por científicos de alto prestigio internacional y, por último, la aprobación de un subprograma de materiales dentro del Programa Sectorial de Investigación del CSIC, para la financiación de los proyectos del área.

Al éxito de esta iniciativa contribuyeron tres hechos: 1) la aprobación de la Ley de la Ciencia por la que se establecía el Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico en el que se incluía un Programa de Materiales; 2) la incorporación de España a la Comunidad Europea lo que permitía la participación de los científicos españoles en las convocatorias del Programa Marco, y 3) el descubrimiento por Bednorz y Muller de la superconductividad a altas temperaturas que tuvo un gran impacto en la comunidad científica y despertó el interés en la investigación de los materiales funcionales.

La actividad científica del área se ha incrementado notablemente en España durante estos 20 años, como se refleja en el número de publicaciones en revistas internacionales. En el área de Ciencia de Materiales en el período 1997-2007, España ocupa el lugar 11 por el número de publicaciones (9.579) y el lugar 10 por el número de citas (46.266) de un total de 77 países. El CSIC, en el mismo período, ocupa el lugar 9 por el número de publicaciones

(2.968) y el lugar 11 por el número de citas (16.281) de un total de 536 instituciones.

Sin embargo, los datos del impacto medio (n.º de citas/n.º de artículos), 4,83 para España (lugar 24 de los 77 países) y 5,49 para el CSIC (lugar 321 entre las 536 instituciones) indican que la repercusión de estas publicaciones en la comunidad científica internacional no es de la importancia que corresponde a una investigación de excelencia. Tampoco se puede identificar una temática en que la contribución de los científicos españoles sea considerada de excepcional significación.

Estos datos exigen una reflexión de la comunidad científica. La respuesta del personal investigador al reto de convergencia internacional ha sido buena pero hay que dar un paso más hacia delante, planteándose objetivos de mayor importancia y trascendencia. Los proyectos de investigación se deben enfocar para producir conocimiento y no para publicar artículos.

Las relaciones empresa-investigación deben clarificarse con la definición de objetivos y responsabilidades. Por una parte, los investigadores deben cuidar que los contratos con la empresa no sean mera asistencia técnica y ser conscientes que los organismos de investigación no son empresas supeditadas a la venta de servicios sino que su valor radica en la generación de conocimientos. Tanto la Ciencia como la Tecnología son de ámbito internacional por lo que las relaciones empresa-investigación deben realizarse en ese ámbito y no limitarse al entorno nacional. Por otra parte, las empresas tienen que participar más activamente en el sistema de I+D.

Es difícil explicar la débil vinculación de la empresa española con la Ciencia y la Tecnología, como lo demuestra el importante déficit de personal investigador en la empresa española en relación, no sólo con los países más avanzados sino también con la media de la UE-25. Si, como dice el informe COTEC-2006, el sistema español de innovación está progresando de manera positiva, el proceso de convergencia con Europa se acelerará en los próximos años. Pero, además, hay que ser conscientes de que no existe otro camino.



Recibido: 7 de junio de 2007

Aceptado: 12 de julio de 2007

NOTAS

- 1 Hay que señalar que existen algunos sectores en los que empresas españolas son competitivas a nivel internacional. Como ejemplos podemos citar, dentro del área de materiales, el de Pavimentos y Revestimientos cerámicos y el de Tecnología de la fibra de carbono para la industria aeronáutica. En el primer caso, con la participación de asistencia técnica del Instituto de Tecnología Cerámica en la Universidad Jaime I de Castellón.

BIBLIOGRAFÍA

- Comisión of the European Communities (1989): *Community Research & Development Programme on Manufacturing Technologies and Advanced Materials (BRITE-EURAM)*, Belgium.
- COTEC (2006): *Informe Cotec 2006*, Madrid, COTEC.
- CSIC (1986-2005): *Memorias Anuales*, Madrid, CSIC.
- Galván, J. C.; Martínez-Duart, J. M. y Serratos, J. M. (2000): "Análisis bibliométrico de la producción científica española en las áreas de Materiales, Ciencias Físicas, Químicas y de la Tierra", *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, abril-junio, 21-30.
- ISI Web of Knowledge (2007): *Essential Science Indicators*.
- Materials Research Advisory Committee, National Science Foundation (NSF) (1984): *Trends and Opportunities in Materials Research*, Washington, NSF.
- Méndez, A.; Insúa, M. A.; Gómez, I.; López, G. y Refolio, C. (1993): *Dinámica de la investigación multidisciplinar sobre nuevos materiales en España. Un análisis bibliométrico*, Madrid, CINDOC, CSIC.
- OECD (2006): *Main Science and Technology Indicators*, vol. 2006/2, Paris, OECD.
- Sanz Menéndez, L. (1997): *Estado, Ciencia y Tecnología en España 1939-1997*, Madrid, Alianza Universal.
- Sebastián, J. (1985): *Programa movilizador del CSIC de Ciencia de Materiales*, Madrid, Gabinete de Estudios de la Presidencia, CSIC.
- Serratos J. M. (1988): "Ciencia y Tecnología de Materiales en el CSIC", *Química* 2000, 33, 64-69.