La investigación en Ciencia de Materiales en España. Evolución en los últimos 30 años*

JOSÉ M. SERRATOSA

Prof. Invest. Em. CSIC

El desarrollo de la investigación en Ciencia de Materiales que ha tenido lugar en España durante los últimos 30 años, se ha debido, en gran parte, a la iniciativa del CSIC de incluir la Ciencia de Materiales como área prioritario en su programación científica en los años 1980. El CSIC creó, en 1985-1986, cuatro institutos de Ciencia de Materiales en Barcelona, Madrid, Sevilla y Zaragoza, los dos últimos como centros mixtos Universidad-CSIC. Para el desarrollo de la labor científica de estos centros, el CSIC creó un Comité Científico Asesor formado por científicos de gran prestigio internacional en esta área. La financiación de proyectos de investigación en Ciencia de Materiales quedó establecida a tres niveles: a) El Programa Marco de la Unión Europea, b) El Programa Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico, y c) El Programa Sectorial del CSIC. En los últimos 30 años se ha producido un importante aumento en la actividad científica del área, como lo prueba el número de artículos publicados en revistas internacionales. Finalmente se hace un análisis y evaluación de la situación actual de esta área en el sector público (universidades y organismos de investigación) y en el sector industrial.

Palabras claves: Ciencia, Tecnología, Materiales, Financiación, investigación, Publicaciones, impacto internacional, Evaluación, investigación, Investigación, empresa.

Materials Science on research in Spain. Evolution on thirty last years. (1980-2010).

The great development experienced by material research in Spain during the last 30 years has been, in great part, a consequence of the initiative of the National Research Council of Spain (CSIC) of including 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 1985-1986 in Barcelona, Madrid, Sevilla and Zaragoza, the last two in cooperation with the respective universities. A Scientific Advisory Committee, whose members were scientists of great prestige at the international level, was nominated by the CSIC in order to guarantee a high standard in the research activities of the new centres. Sources for funding material research projects existed at three levels: a) the Framework Programme of the European Union; b) the National Programme for Scientific Research and Technological development of the Spanish Government and c) the Institutional Research Programme of the CSIC. An important increase of the research activity has taken place during the last 30 years, as indicated by the number of papers published in international journals. Finally, an analysis of the actual situation of research activities in material research concerning the public sector (universities and research organisms) and the industrial sector, is presented.

Key words: Material, Science, Technology, Scientific, Research, Programmes; Published, Articles, Citations, Impacts, Evaluation, Analysis, Material, Research, R&D, Industry.

1. INTRODUCCIÓN

La Ciencia de Materiales tiene como objetivo el estudio de las propiedades fundamentales de estas sustancias en relación con su composición, textura y estructura atómico-molecular.

El conocimiento profundo de estas relaciones es la base que permite el diseño y preparación de aquellos materiales que satisfagan determinadas especificaciones físico-químicas necesarias en las aplicaciones. Sin duda, el desarrollo de nuevos materiales con propiedades cuidadosamente seleccionadas, es esencial para el progreso de diversos sectores claves de la tecnología.

La investigación de materiales tiene como precedente los estudios de Metalurgia, donde ya en los años 1920 comenzaron a explicarse las propiedades de los materiales metálicos en base a su composición y microestructura. Es, sin embargo, en los años 1950-60 cuando las nuevas exigencias tecnológicas

de los diversos sectores industriales hacen que los conceptos, teorías y técnicas provenientes de muy diversas ramas (Física de la Materia Condensada, Química de Estado Sólido, Cristalografía, Físico-Química de Superficies, Metalurgia, Polímeros, Cerámica, etc.) tiendan a interrelacionarse para dar una respuesta a tales exigencias, naciendo así el concepto moderno de Ciencia de Materiales necesariamente de carácter multidisciplinar e intersectorial y en cuya metodología se elimina la necesidad de considerar separadamente cada tipo de material específico sino que a partir de principios básicos estructurales se puede llegar a anticipar al menos cualitativamente y a veces cuantitativamente, las propiedades y características de nuevos materiales. Las universidades de los países más avanzados se adaptaron rápidamente a la nueva situación y así en los años 1960 muchos departamentos

(*)Reproducción del artículo publicado en "Revista Española de FÍSICA", vol. 24, num. 1, pp. 6-15, 2010.
Con autorización de la Real Sociedad Española de Física (RSEF).

de Metalurgia pasaron a denominarse "Material Science and Engineering", incluyendo estudios sobre materiales metálicos, cerámicos y polímeros. Un ejemplo de esta tendencia en las universidades americanas fue mi propia experiencia: en 1964 emigré a Estados Unidos para incorporarme a un nuevo centro 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. La vitalidad de esta área de investigación se manifiesta también en los aspectos científicos fundamentales, como se deduce del gran número de premios Nóbel de Física y Química que ha recaído en científicos dedicados a temas relacionados con la Ciencia de Materiales.

2. ACCIONES DE POLÍTICA CIENTÍFICA A NIVEL NACIONAL EN LOS AÑOS 1980

En este artículo me refiero al periodo que comienza en la transición política (1976– principio de los 80) hasta el momento actual, con especial énfasis en las medidas de Política Científica adoptadas en 1980 por el Gobierno y por el CSIC que tuvieron gran trascendencia en el desarrollo posterior de la investigación científica y técnica y en particular del área de materiales.

En los años 1980, existían en España (universidades y organismos públicos de investigación, CSIC, JEN, etc.) grupos de investigación de prestigio internacional en distintos campos de la Ciencia (incluida la Ciencia de Materiales), pero su número era escaso y por otra parte las fuentes de financiación eran muy limitadas. En el año 1981, los gastos totales en I+D eran del 0,43% del PIB y el número de artículos publicados en revistas internacionales, en los que figuraba al menos un científico con dirección en una institución española era sólo de 3.900 (Garfield, E., 1994). Es, sin embargo, en esos años 1980 cuando se dieron dos circunstancias favorables para el desarrollo de la investigación científica en España. Estas circunstancias fueron: a) la existencia de un gobierno que había apostado por este desarrollo mediante el aumento de la financiación de I+D que pasa del 0,43% (1981) al 0,85% (1990) del PIB y la aprobación de una Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica (Ley de la Ciencia) (Ley 13/1986 de 14 de Abril, BOE de 18 de Abril de 1986), y b) la incorporación de España a la Unión Europea (entonces Comunidad Europea). Estas circunstancias posibilitan en España el desarrollo de iniciativas para la promoción de ciertas áreas prioritarias de carácter multidisciplinar. Esto afectaba especialmente al CSIC por su carácter de organismo multidisciplinar a diferencia de la Universidad cuya organización es esencialmente por disciplinas. Entre las áreas científicas seleccionadas en el CSIC se incluían: Biotecnología, Microelectrónica y Ciencia de Materiales. Condición necesaria para este desarrollo era contar con los medios económicos para la financiación de las infraestructuras científicas y de los proyectos de investigación, medios que habían sido, como hemos mencionado anteriormente, muy escasos (0,43% del PIB en 1981). Para esa financiación se contaba esencialmente con los Planes de I+D a dos niveles:

a) nivel europeo a través del Programa Marco de Unión Europea y b) nivel nacional a través del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (Plan de I+D) establecido en la citada Ley de la Ciencia.

2.1. Financiación de la investigación en el área de materiales

Las acciones de Política Científica se concretan en la selección de temas prioritarios y en la disponibilidad de medios económicos para llevar a cabo esa acción. En el caso concreto de la investigación en el área de materiales existían dos posibilidades, pues tanto el Programa Marco de la Unión Europea como el Plan Nacional de I+D incluían programas especiales de investigación de materiales.

2.1.1. PROGRAMA MARCO DE I+D DE LA UNIÓN EUROPEA

Cuando España se incorpora a la Unión Europea (1 de Enero de 1986) estaba vigente el I Programa Marco. En este Programa Marco se incluían varios sub-programas relacionados con el área de materiales (BRITE, ESPRIT, EUREKA) aunque el sub-programa que cubría específicamente esta área era el Programa EURAM (European Research on Advanced Materials).

El presupuesto del I Programa EURAM era de 30 millones de ecus (antiguo nombre de la moneda europea) para el periodo 1986-1989. Este programa incluía tres grandes temas:

1. Materiales metálicos que incluía aleaciones de Al, Mg o Ti; materiales eléctricos para contactos; materiales magnéticos.
2. Materiales cerámicos.
3. Materiales compuestos de matriz orgánica o matriz metálica y materiales para aplicaciones específicas.

Los temas estaban especialmente relacionados con materiales estructurales para las industrias de medios de transporte (aeroespacial, industria del automóvil, ferrocarril, etc.). Sólo en el último apartado "otros materiales para aplicaciones específicas" se consideraba la investigación en materiales "funcionales" (eléctricos, electrónicos, ópticos, etc). Esta deficiencia se corrige en el II Programa Marco (1989-1992) donde los temas relacionados con la investigación en materiales se incluyen en un programa conjunto, BRITE-EURAM, con un presupuesto de cerca de 400 millones de ecus y donde se consideran toda clase de materiales.

Del total de 84 proyectos aprobados en el I Programa Euram, 14 incluían participación de científicos españoles.

Esta participación española fue aumentando en sucesivas convocatorias y por ejemplo en los tres primeros años del VI Programa Marco (2002-2006), España obtuvo 655 millones de euros de los cuales 83,1 millones correspondían al tema Nanotecnología, Materiales y Producción. En el VII Programa Marco de I+D actualmente vigente (2007-2013), el presupuesto total asciende a 50.521 millones de euros de los que 3.505 millones corresponden al tema Nanotecnología, Materiales y Producción, lo que supone un importante incremento sobre lo presupuestado en el VI Programa Marco (2002-2006) en este tema, que fue de 1.429 millones de euros aunque para un periodo de sólo 5 años en vez de 7.

2.1.2. PLAN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Este plan (Plan Nacional de I+D) establecido en la Ley de la Ciencia de 1986, era el mecanismo que disponía el Estado para la promoción y programación de la investigación cien-

tífica 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 en la que participaban representantes de los distintos ministerios. 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 llevó a cabo por un grupo de expertos nombrados por la CICYT y el texto definitivo fue posteriormente incluido 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.
- Materiales cerámicos y vidrios.
- Materiales poliméricos avanzados.
- Materiales compuestos de matriz metálica, matriz orgánica y matriz cerámica.
- Otros materiales avanzados: semiconductores, superconductores, conductores iónicos, biomateriales, membranas de transporte selectivo, catalizadores,
- Como líneas de carácter general se establecían:
 - a) Síntesis y preparación;
 - b) Caracterización;
 - c) Comportamiento de materiales (fiabilidad, corrosión, envejecimiento).

La financiación prevista para el cuatrienio 1988-1991, del Programa Nacional de Nuevos Materiales ascendía a 29.703,9 millones de pesetas (178 millones de euros).

2.2. El CSIC: Acciones para el desarrollo de la Investigación en Materiales

El CSIC había experimentado una importante transformación como consecuencia de la aprobación de un nuevo reglamento (BOE, 23 de enero de 1978) en el que se establecían dos principios organizativos importantes: a) la simplificación de las estructuras y procedimientos administrativos y b) la instauración de una amplia participación del personal en los órganos de gestión y gobierno del organismo. Esta reforma del CSIC, unida al apoyo del Gobierno a la investigación científica y técnica, propiciaron la propuesta de iniciativas y la toma de decisiones en aquellos años clave (1980) para el desarrollo de la investigación en España. España entraba a formar parte de la Unión Europea y en el caso particular de la investigación de materiales, se habían descubierto nuevos materiales que originaron un gran revuelo en la investigación científica a nivel internacional (materiales magnéticos para imanes permanentes de Nd-Fe-B descubiertos en 1984 por la empresa Sumitomo de Japón y la General Electric de Estados Unidos y el descubrimiento en 1986 de superconductores de alta temperatura por Muller y Bednorz de la IBM).

La propuesta del CSIC fue la de considerar como prioritaria el área materiales y dentro de esta área prestar especial atención a la investigación fundamental de materiales funcionales, tema que había recibido poca atención en España.

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 de compuestos orgánicos y organometálicos así como especialistas en las diversas técnicas de caracterización de sólidos. En el CSIC, existían grupos cuyas actividades se adaptaban a las citadas características, había un Instituto de Física de Materiales y otro de Física de Estado Sólido y grupos de investigación asimilables a la Química de Estado Sólido, dedicados al estudio de minerales (de hecho, la Química del Sólido, en los aspectos estructurales, tiene sus orígenes en la Mineralogía).

La estrategia adoptada por el CSIC para el desarrollo de la investigación en materiales fue la siguiente: a) estimular y promover el interés de los científicos hacia la investigación en este campo mediante la aprobación de un Plan Movilizador de Materiales; b) analizar las posibilidades de creación de centros de materiales y sitios de su ubicación; y c) facilitar la financiación de proyectos dentro del campo de materiales a través de los presupuestos propios del CSIC, como complemento de la financiación derivada de los Planes Nacionales de I+D y del Programa Marco de la Unión Europea. A las distintas etapas de este proceso me referiré brevemente a continuación.

2.2.1. PROGRAMA MOVILIZADOR DE MATERIALES DEL CSIC

Por iniciativa del vicepresidente Jesús Sebastián, el CSIC crea en 1985, la figura de los programas movilizados 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 movilizados se realizó tras la evaluación de diversos parámetros incluyendo el criterio científico, el carácter multidisciplinar e intersectorial, el nivel de implementación en el organismo 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 así como de realizar propuestas a los órganos de gobierno del CSIC. El Comité del Programa Movilizador de Materiales fue nombrado por la Junta de Gobierno del CSIC en su reunión del 22 de febrero de 1985.

El Programa Movilizador de Materiales tuvo una vigencia de tres años durante los cuales se realizaron una serie de actividades, ciclo de conferencias, cursos, workshops, etc., aunque 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 que surgieron como una actividad del Programa Movilizador de Materiales del CSIC. Un antecedente de estas reuniones fue el simposio sobre materiales celebrado en la Universidad de Barcelona en 1984 organizado por Javier Tejada, profesor de la Facultad de Física de esa universidad.

La Primera Reunión Nacional de Materiales de España se celebró en Barcelona los días 7 y 8 de octubre de 1985. La conferencia inaugural de esta reunión fue impartida por el Dr. Von Klitzing del "Max Planck Institut für Festkörperforschung" y versó sobre el efecto Hall cuántico. Unos días después se otorgó el Premio Nobel de Física 1985 al Dr. Von Klitzing. El número de asistentes fue de alrededor de 100 científicos. La II Reunión de Materiales se celebró en Zaragoza y la III Reunión

en Sevilla en la que el número de asistentes fue ya de alrededor de 300 científicos. Sucesivas reuniones se han celebrado en Oviedo (1993), Cádiz (1996), San Sebastián (1999), Madrid (2002), Valencia (2004), Vigo (2006), San Sebastián (2008).

Como referencia internacional a las reuniones nacionales de materiales, hay que citar a la "Material Research Society" "MRS" de EE.UU., fundada en 1973 y con más de 15.000 miembros actualmente, que organiza, desde su fundación, dos grandes reuniones anuales ("Spring and Fall Meetings"). Una sociedad similar se fundó en Europa en 1983, la "European Material Research Society" "E-MRS", con sede en Estrasburgo, con más de 3.000 miembros en la actualidad y que también organiza cada año una importante reunión. Asimismo, hay que señalar las reuniones científicas de ámbito europeo, organizadas a requerimiento de la Comisión de la Unión Europea, como fue la reunión de la "Concerted European Action on Magnets" celebrada en Madrid en abril de 1988 y que en aquel momento representó un reconocimiento al esfuerzo que España realizaba en investigación y desarrollo.

2.2.2. CREACIÓN DE INSTITUTOS DE CIENCIA DE MATERIALES EN EL CSIC (1986-1987)

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 Ciencias de Materiales cuyo objetivo general sería el estudio fundamental de materiales funcionales (materiales con propiedades electrónicas, eléctricas, 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 (Sevilla y Zaragoza). Esta resolución de la Junta de Gobierno respondía también a los requerimientos de científicos españoles que en varias ocasiones habían expresado la necesidad de realizar un mayor esfuerzo en la investigación en materiales, requerimientos que coincidían con las recomendaciones de organismos internacionales (informe OECD, 1969). Concretamente, en junio de 1980 se presentó un informe sobre creación de un Centro de Ciencia de Materiales en el CSIC al entonces Presidente del CSIC Carlos Sánchez del Río. Firmaban este informe: S. de Aza (ICV-CSIC), F. Agulló (UAM), J.M. López Sancho (Inst.Fis.Mat.-CSIC), J. Pajares (Inst.Catal.-CSIC) y J.M. Serratosa (Fis.Quim.Miner.-CSIC).

El primer centro de materiales que se aprobó, 1985, fue el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), centro mixto Universidad de Zaragoza-CSIC. Los departamentos de Física de esta Universidad eran reconocidos por sus investigaciones en Magnetismo, Óptica y fenómenos a bajas temperaturas y los departamentos de Química por importantes contribuciones en el campo de los compuestos organometálicos.

Los otros centros fueron aprobados 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" dedicados a la caracterización estructural de minerales y otros compuestos mediante técnicas de difracción de rayos X. Posteriormente, se incorporaron científicos del Instituto de Química del CSIC y de la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona.

El Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM) se constituyó por la unión de tres institutos del CSIC: Física de Materiales, Física de Estado Sólido y Físico-Química Mineral, integrándose posteriormente, 1987, el Instituto de Química Inorgánica.

El Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMSE) se formó a partir del Departamento de investigaciones físicas y químicas, centro coordinado ya existente entre la Universidad de Sevilla y el CSIC. Por parte química se incorporaron los grupos de superficie y catálisis, reactividad de sólidos y compuestos organometálicos y por parte física, los grupos de propiedades mecánicas, magnetismo y compuestos ferroeléctricos.

Una vez creados los cuatro nuevos institutos, el personal científico necesitaba hacer un análisis y reflexión sobre sus posibilidades y tratar de reorientar sus investigaciones y concentrar sus esfuerzos en temas de interés científico de acuerdo con las tendencias existentes a nivel internacional.

Para esta labor fue de gran ayuda el informe del "Material Research Advisory Committee" de la "National Science Foundation" (NSF), titulado "Trends and Opportunities in Material Research" (NSF, 1984), cuya lectura, a pesar de los años transcurridos, es todavía de interés para establecer los conceptos y contenidos de la Ciencia de Materiales.

Asimismo, el Programa Movilizador de Materiales del CSIC consideró que para el proceso de reorientación de la actividad investigadora, era necesario contar con el asesoramiento de científicos expertos en los distintos campos de la investigación en materiales y a este fin propuso a la Junta de Gobierno del CSIC la creación de un Comité Científico Asesor cuyos miembros fueran científicos de gran prestigio internacional. Una vez aprobada esta propuesta, me puse en contacto con Manuel Cardona, uno de los directores del "Max Planck Institut für Festkörperforschung" buen conocedor de la situación de la Ciencia en España, para que aceptara ser presidente del citado comité. Su respuesta fue positiva 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 constante apoyo y ayuda ha sido persona clave para el desarrollo de la Ciencia de Materiales en España.

La composición del primer Comité Asesor 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; Bordeaux), T.E. Madey (Rutgers, The State University, New Jersey), Emilio Méndez (Thomas Watson Research Center, IBM, Yorktown, N.Y.), Fernando Pradal (Université Paul Sabattier, Toulouse), Sir John M. Thomas (The Royal Institution of Great Britain, London). En 1991 se nombró miembro del Comité Asesor al Dr. K. Alex Muller (IBM) premio Nóbel de Física en 1987 por su descubrimiento de la superconductividad a altas temperatura en óxidos de Y-Ba-Cu. Otros destacados miembros del Comité Asesor en los años 1990 fueron: John B. Goodenough (University of Texas at Austin) y Egon Matijevic (Clarkson University). Sin duda, la existencia del Comité Científico Asesor y sus recomendaciones han sido de gran ayuda para el desarrollo de estos centros y, en general, de la Ciencia de Materiales en España.

2.2.3. PROGRAMA SECTORIAL DE MATERIALES DEL CSIC

Como complemento a la financiación del Plan Nacional de I+D y del Programa Marco de la Unión Europea, mencionados anteriormente, el CSIC estableció un Programa Sectorial de investigación para el quinquenio 1988-1992 de acuerdo con el artículo 6.2b de la Ley de la Ciencia de 1986. Este Programa Sectorial estaba estructurado en 22 ejes de actividad que se formulaban como subprogramas.

El Subprograma de Ciencia y Tecnología de Materiales incluía los siguientes objetivos:

- 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.
- Materiales magnéticos blandos, materiales para imanes permanentes (a base de Fe-Nd-B o Co-tierras raras), 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.

El presupuesto del subprograma de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC para el quinquenio 1988-1992 fue de 4.060 millones de pesetas (aprox. 24,4 millones de euros).

3. EVOLUCIÓN POSTERIOR DEL ÁREA DE MATERIALES

Como consecuencia de las iniciativas tomadas por el Gobierno y por el CSIC en los años 1980, la investigación de materiales en España experimentó una rápida evolución que se tradujo en un aumento de personal del área y en la creación de nuevos centros de investigación.

La evolución del personal científico se manifiesta en cifras concretas, en el caso del CSIC, a través de las memorias anuales, ya que entre los ámbitos científicos establecidos en el CSIC (8 en total), uno era Ciencia y Tecnología de Materiales. En la Tabla 1 se da la evolución del personal científico investigador (profesores de investigación, investigadores y científicos titulares) y del personal en formación (becarios predoctorales) en el ámbito de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC en el periodo 1988-2005.

TABLA 1. EVOLUCIÓN DEL PERSONAL CIENTÍFICO Y PERSONAL EN FORMACIÓN EN EL ÁMBITO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES DEL CSIC EN EL PERIODO 1988-2005.

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

Fuente: Memorias del CSIC. *En centros mixtos universidad-CSIC.

Por otra parte, la 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. Entre las acciones tomadas en el sector académico fue especialmente significativa la creación, en 1989, de un Instituto de Ciencia de Materiales en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) al que se dio el nombre de Nicolás Cabrera, ilustre científico y persona clave en el desarrollo de la Física en España en la segunda mitad del siglo XX. La creación del Instituto "Nicolás Cabrera" fue la mejor prueba del acierto del CSIC en su iniciativa de promoción del área de Ciencia de Materiales. El ejemplo de la UAM fue seguido por otras universidades con la creación de institutos universitarios de materiales (p. ej. ICMUV creado en 1995 en la Universidad de Valencia y el CINQUIMA de la Universidad de Valladolid). Esta creación de nuevos centros relacionados con la investigación en materiales ha tenido una continuidad hasta el presente.

Actualmente en el área de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC se integran 12 institutos (6 centros propios y 6 centros mixtos con universidades) y 24 unidades asociadas. Los últimos centros mixtos adscritos al CSIC han sido: el Centro de Física de Materiales (CFM), Universidad del País Vasco-CSIC; Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (CIN2), Universidad Autónoma de Barcelona-Inst.Catalá de.Nanotec.-Generalitat Cataluña-CSIC; Centro de Investigación de Nanomateriales y Nanotecnología (CINN), Universidad de Oviedo-Principado Asturias-CSIC. Otros centros del CSIC relacionados con la investigación en materiales se encuentran en el área de Ciencia y Tecnologías Químicas entre ellos cabe citar al Instituto de Tecnología Química (ITQ) con sede en Valencia, al Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (ICP) y al Instituto de Química Avanzada de Cataluña (IQAC).

Otros organismos públicos interesados en la investigación de materiales son: el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) dependiente del Ministerio de Defensa, donde se investiga en materiales avanzados para la industria aeroespacial y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación con investigaciones sobre materiales para reactores de fusión, superconductores y envejecimiento de materiales por efecto de radiaciones.

Es interesante señalar la participación de las Comunidades Autónomas en la creación de nuevos centros generalmente en colaboración con universidades, organismos estatales (CSIC, CIEMAT) o fundaciones así como el interés creciente en el área de Nanociencia y Nanotecnología, íntimamente ligada al área de Materiales. Entre estos últimos, aparte de los incluidos como centros mixtos del CSIC antes mencionados, destacamos: el Laboratorio Ibérico Internacional de Nanotecnología (INL, Iberian Nanotechnology Laboratory) centro hispano-luso construido en Braga (Portugal), aprobado en noviembre de 2006 e inaugurado en julio de 2009 y cuyo director es J. Rivas (recientemente se ha firmado un programa de colaboración entre el INL y el MIT de EE.UU.); el Instituto de Nanociencia de Aragón (INA), instituto universitario creado en abril de 2003; el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Nanociencia (IMDEA Nanociencia) creado en febrero de 2007 por la Comunidad

de Madrid y cuyo director es R. Miranda. Otro centro del área de materiales, creado recientemente por la Comunidad de Madrid es el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados de Materiales (IMDEA Materiales), cuyo director es J. Llorca.

Centros relacionados con la investigación de materiales se han creado especialmente en Cataluña y en el País Vasco. Entre ellos mencionamos, en Cataluña: Institut de Bioenginyeria de Catalunya (biomateriales), creado a finales del 2005 y cuyo director es J. Planell; Institut de Recerca en Energia de Catalunya (materiales para la energía), creado en 2008 y cuyo director es A. Martínez; Institut de Nanociencia de la UB (IN2UB con colaboración del CSIC), y en el País Vasco: el Donostia International Physics Center (DIPC) inaugurado en abril de 2000, donde se realizan investigaciones básicas de propiedades electrónicas y ópticas de sólidos, superficies y sistemas de baja dimensionalidad (nanomateriales) y movimientos moleculares y procesos de relajación en materiales poliméricos, el director es J. Colmenero y el presidente P.M. Etxenike (el Centro de Física de Materiales, CFM, centro mixto UPV-CSIC esta íntimamente relacionado con el DIPC); el CICbiomaGune, centro de investigaciones cooperativas en biomateriales, ubicado en San Sebastián, inaugurado en Diciembre de 2006, cuyo director general es José M. Matos y el director científico, M. Martín Lomas; el CICnanoGUNE centro de investigaciones cooperativas en nanociencia y nanotecnología, inaugurado en Enero de 2009, también ubicado en San Sebastián y cuyo director es J.M. Pitarke y el presidente P.M. Etxenike; el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas (CEIT) de la Universidad de Navarra en Guipúzcoa donde se han desarrollado microsensores para aplicaciones industriales. Centros tecnológicos relacionados con materiales en el País Vasco son: CIDITEC donde se investiga en nanorecubrimientos de superficies para prevención de la corrosión y en nuevos materiales para aplicación en electrónica y como sensores; INASMET con interés en el desarrollo de materiales para la industria automovilística y aeroespacial; LABEIN que lidera el proyecto NANOC para la aplicación de la Nanotecnología en la construcción.

4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN

4.1. Actividad Científica

Los indicadores más aceptados para evaluar la actividad científica de los países, instituciones o individuos son los referentes a las publicaciones (número de publicaciones y citas). Esto es especialmente cierto cuando se trata de instituciones, de grupos de investigación, del conjunto de la actividad en una determinada área científica o de un país.

Actualmente existen bases de datos que permiten obtener esa información y entre ellas destaca la del "Institute for Scientific Information" (ISI). En esta base de datos, la definición de las áreas (Física, Química, Ciencia de Materiales, Ingeniería, Biología Molecular & Genética, etc.) se basa en las revistas que el ISI clasifica como pertenecientes a cada una de estas áreas. Ahora bien, como la Ciencia de Materiales es un ámbito multidisciplinar, los artículos relacionados con ese ámbito aparecen no sólo en las revistas clasificadas como Ciencia de Materiales sino también en las clasificadas en otras áreas, en particular, en las áreas de Física y Química.

Por ello, la producción científica de un centro dedicado a la investigación en materiales puede ser superior a la que se deduce del análisis de las publicaciones de esa área (Ciencia de Materiales) en la base de datos del ISI.

Un primer estudio sobre la producción científica de España en el área de Ciencia de Materiales fue realizado por el CINDOC (A. Méndez et al. 1993). En ese estudio se toma como muestra las publicaciones de científicos españoles que, de acuerdo con el criterio de asesores expertos en el área, investigaban en Ciencia de Materiales y se compara el número de artículos publicados en el periodo 1985-1986, cuando todavía no existía una promoción y una financiación específica de esta área, con los artículos publicados en el periodo 1989-1990, producción que representaba una respuesta a esos incentivos. Se seleccionaron las revistas incluidas en la base de datos del ISI que cubrían no solo el área específica de materiales (Metalurgia, Cerámica y Polímeros) sino también otras áreas relacionadas con esa investigación (Física de la Materia Condensada, Química-Física, Física Aplicada, Química Inorgánica, etc.).

TABLA 2. ARTÍCULOS PUBLICADOS POR CIENTÍFICOS ESPAÑOLES DEL ÁREA DE MATERIALES EN LOS PERIODOS 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

Los datos de la Tabla 2 muestran claramente el efecto que las acciones tomadas en los años 1980 (Plan Nacional de I+D, incorporación de España a la Unión Europea, acciones específicas del CSIC) tuvieron en el desarrollo del área de materiales.

En esos dos periodos 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 en el periodo 1985-1986 y de unas 20.000 en el periodo 1989-1990 con un incremento del 37,9%, muy parecido al indicado para España en el análisis bibliométrico de A. Méndez et al., aunque significativamente inferior al del CSIC.

En los años 1990, a pesar de que el gasto en I+D, en términos del % del PIB, permaneció prácticamente constante, el número de las publicaciones de científicos españoles siguió aumentando y en 1992 este número era de alrededor de 14.000 publicaciones en todas las áreas. Aunque el impacto medio (número de citas dividido por el total de artículos publicados) estaban muy por debajo de los valores de la Comunidad Europea. Así, en el periodo 1981-1992 los artículos españoles fueron citados un 30% menos que el promedio de los artículos europeos (E. Garfield, 1994).

El 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 8,19), de un número especial (nº 2, Febrero de 1995) a la Ciencia de Materiales en España.

Tabla 3. PUBLICACIONES Y CITAS DE CIENTÍFICOS ESPAÑOLES EN EL ÁREA DE CIENCIA MATERIALES Y EN EL TOTAL DE ÁREAS CIENTÍFICAS EN PERIODOS DE 5 AÑOS (1999-2009).

Periodos (5 años)	1999-2003	2001-2005	2003-2007	2005-2009
Ciencia de Materiales				
Publicaciones	4.622	5.226	5.677	6.088
Citas	9.910	13.120	17.372	23.513
Todas las áreas científicas				
Publicaciones	119.307	133.206	151.978	170.635
Citas	460.229	549.350	688.070	886.767

Fuente: ISI Web of Knowledge.

Los últimos datos del ISI para el periodo comprendido entre el 01/01/1999 y el 30/06/2009 (10 años y 6 meses) confirman el aumento continuado del número de publicaciones tanto en el área de Ciencia de Materiales como en el total de áreas científicas, por parte de científicos que trabajan en instituciones españolas (Tabla 3).

Todos los datos anteriores evidencian el significativo aumento de la actividad investigadora en España. Sin embargo, el número de publicaciones en revistas ISI, con ser importante, no garantiza la calidad y trascendencia de las mismas, factores que están relacionados con el impacto medio (nº de citas/nº de artículos).

El análisis de los datos de la ISI Web of Knowledge correspondientes al periodo 1999-2009 (10 años y 6 meses) indica que de las 21 áreas científicas consideradas, España sólo supera la media mundial en 7 casos (Chemistry, Physics, Material Science, Engineering, Plant & Animal Science, Agricultural Sciences, Space Science).

En la Tabla 4 se incluyen los datos de publicaciones, citas y citas por artículo de España, para las áreas relacionadas con Ciencia de Materiales comparadas con áreas de Biología que son las de mayor actividad científica actualmente a escala mundial. En la tabla se incluyen la media mundial de n°

de citas/nº de artículos. Llama la atención que en las áreas claves de la investigación biológica, los valores del impacto medio (índice relacionado con la calidad) de las publicaciones españolas son sensiblemente inferiores a los de la media mundial.

En el conjunto de todas las áreas, España figura, de un total de 149 países, en el lugar 9 por el número de artículos (300.136), en el lugar 11 por el número de citas (2.820.394) y en el lugar 37 por citas/artículos (9,40). Este último valor es algo inferior al valor medio de toda la producción científica mundial (9,84). En Ciencia de Materiales, España figura en el lugar 10 por número de publicaciones (11.263), en el lugar 10 por número de citas (72.871) y en el lugar 25 por citas/artículos (6,47) de un total de 78 países. El valor del impacto medio es superior a la media mundial (5,89).

En la relación de instituciones, para el mismo periodo de años y para el área de Ciencia de Materiales, el organismo español con mayor número de trabajos en el área, es el CSIC que figura en el lugar 11 con 3.312 artículos, en el lugar 12 por el número de citas (23.982) y en el lugar 336 por el impacto medio (7,24), de un total de 613 instituciones.

Como en los casos de la Tabla 4, el valor del impacto medio hace bajar muchos lugares al CSIC. Las universidades españolas con valores del impacto medio en Ciencia Materiales, superiores a la media mundial (5,89) son:

Univ. de Vigo, 11,24 de impacto medio con 215 artículos y lugar 112; Univ. de Valencia, 9,30 de impacto medio con 200 artículos y lugar 215; Univ. Auton. de Barcelona, 8,60 de impacto medio con 218 artículos y lugar 244; Univ. Complutense, 8,36 de impacto medio con 690 artículos y lugar 259; Univ. de Valladolid, 8,12 de impacto medio con 189 artículos y lugar 275; Univ. Auton. de Madrid, 7,99 de impacto medio con 419 artículos y lugar 283; Univ. de Zaragoza, 7,95 de impacto medio con 293 artículos y lugar 286; Univ. de Barcelona, 7,16 de impacto medio con 666 artículos y lugar 343; Univ. Politécnica de Valencia, 6,80 de impacto medio con 313 artículos y lugar 371; Univ. País Vasco, 6,02 de impacto medio con 260 artículos y lugar 438.

Es interesante señalar el lugar avanzado que ocupa la Universidad de Vigo (112 de un total de 613 instituciones) con un impacto medio de 11,24. Sin embargo, los lugares ocupados por el resto de los organismos españoles en las relaciones de

Tabla 4. ARTÍCULOS PUBLICADOS, CITAS E IMPACTO MEDIO (Nº CITAS/Nº ARTÍCULOS) POR CIENTÍFICOS ESPAÑOLES EN CIENCIA DE MATERIALES Y ÁREAS RELACIONADAS, COMPARADOS CON LOS VALORES DE ALGUNAS ÁREAS DE BIOLOGÍA, PARA EL PERIODO 1999-2009. SE INCLUYEN EN CADA ÁREA LOS VALORES DEL IMPACTO MEDIO A ESCALA MUNDIAL.

Área científica	Artículos	Citas	Citas/artículos	
			España	Media mundial
Ciencia Mater.	11.263 [10]*	72.871 [10]*	6,47 [25]*	5,89
Química	44.797 [9]*	477.055 [7]*	10,65 [20]*	9,83
Física	28.003 [10]*	288.186 [10]*	10,29 [16]*	8,24
Ingeniería	21.287 [13]*	93.245 [11]*	4,38 [28]*	4,05
Biol.& Bioquím.	15.797 [9]*	204.420 [12]*	12,94 [29]*	16,04
Biol. Mol. & Genet.	7.757 [9]*	153.516 [11]*	19,79 [35]*	24,27
Microbiología	7.206 [6]*	87.463 [8]*	12,04 [45]*	14,70

* Los números entre corchetes [] indican el lugar que ocupa España entre el total de países en cada área y en relación con los conceptos señalados (nº de artículos, citas e impacto medio). Fuente: ISI Web of Knowledge

índice medio de impacto están por encima del 200. Valores del impacto medio en Ciencia de Materiales de instituciones que deben ser referentes para los organismos españoles son: Univ. California en Berkeley, 20,93 con 1.319 artículos; M.I.T., 19,26 con 1.606 artículos; Inst. Weizmann, 19,13 con 267 artículos; Standford Univ., 18,00 con 699 artículos; CALTECH, 17,74 con 482 artículos; Max Planck Gesselschaft, 14,57 con 3.411 artículos.

De todos estos datos se deduce que el número de las publicaciones científicas españolas en el área de Ciencia de Materiales ha aumentado significativamente en los últimos años, alcanzando actualmente valores que colocan a España y a instituciones españolas en los primeros lugares del ranking internacional (España en el lugar 10 de 78 países y el CSIC en el lugar 11 de 613 instituciones). Sin embargo, el impacto que estas publicaciones producen en la comunidad científica internacional no es, en general, de la importancia y trascendencia que corresponde a una investigación de excelencia. Estos datos merecen una reflexión pues, en definitiva, lo que parece deducirse de ellos es que la actividad investigadora se centra más en proyectos de poco riesgo que garanticen publicaciones rápidas, que en proyectos de gran 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 con frecuencia.

4.2. Contribución de científicos españoles a la Ciencia y Tecnología de Materiales

Los temas objetos de estudio por científicos españoles, dentro del área de materiales han sido y son muy variados y cubren un amplio espectro de la problemática del área. Un hecho a destacar es la rapidez con que los investigadores españoles han respondido ante fenómenos o propiedades inesperadas de nuevos materiales. Un caso evidente fue la reacción de los científicos españoles ante el descubrimiento de la superconductividad a alta temperatura por Muller y Bednorz en 1986, reacción que se vio favorecida por la implementación del Programa MIDAS establecido en 1988 por la CICYT y financiado por compañías eléctricas (OCIDE, REE, UNESA). 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). Un caso parecido al de los superconductores de alta temperatura es el estudio del grafeno que actualmente despierta una gran actividad científica en grupo españoles de las universidades y del CSIC.

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 si existen aportaciones en aspectos parciales que son de interés y tienen el reconocimiento de la comunidad científica internacional. Entre ella y sin tratar de ser exhaustivo, mencionaré las siguientes:

- Superconductividad a alta temperatura. Desarrollo de la Física de los sistemas fuertemente correlacionados a

partir de los estudios teóricos de la superconductividad. En las aplicaciones, desarrollo de micoestructuras y de procesos para evitar que las fronteras de grano limiten el paso de la corriente eléctrica. Desarrollo de cintas superconductoras.

- Magnetoresistencia colosal de las manganitas. Tema relacionado con el 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. El desarrollo del programa se inició en la UAM y en él han colaborado científicos de los institutos de materiales del CSIC.
- Materiales moleculares. Estas investigaciones se realizan en varios departamentos universitarios y en Institutos del CSIC. Merecen destacarse las investigaciones sobre materiales moleculares magnéticos que se realizan en el Instituto de Ciencia Molecular de la Universidad de Valencia.
- Grafeno. En la actualidad hay una gran actividad investigadora sobre el grafeno que recuerda la que se produjo tras el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura. Recientemente se ha realizado, con participación española, un interesante trabajo en el que se muestra que la aplicación de fuerzas en ciertas direcciones sobre grafeno, produce deformaciones en la red cristalina del material que van acompañadas por cambios significativos de las propiedades electrónicas, lo cual abre nuevas posibilidades de aplicación de este interesante material. Grupos de científicos españoles activos en la investigación del grafeno pertenecen al CSIC (ICMM, CIN2), UAM, UPV y Univ. de Alicante.
- Nanomateriales magnéticos con aplicaciones como sensores y en Biotecnología. Nanomateriales híbridos para sensores y dispositivos electroquímicos.
- Cristales fotónicos. Cristales líquidos para almacenamiento óptico.
- Materiales intermetálicos. Aleaciones ligeras de grano ultrafino.
- Materiales poliméricos para tecnologías avanzadas (bioactivos, fotosensitivos y membranas semipermeables).
- Desarrollo de la teoría de la sinterización para la obtención de materiales cerámicos. Materiales eutécticos cerámicos. Cerámicas tenaces
- Materiales compuestos.
- Biomateriales, con grupos activos en Universidad Politécnica de Barcelona, Universidad Complutense (Facultad de Farmacia) y CSIC (ICV, ICTP).

Investigaciones de fuerte impacto en el sector industrial se realizan en varios centros del CSIC y departamentos universitarios. Entre estos merecen destacarse el Instituto de Tecnología Química (ITQ) del CSIC por los trabajos sobre búsqueda y obtención de nuevos catalizadores para procesos de petroquímica y refino, y el Instituto de Magnetismo Aplicado “Salvador Velayos” de la Universidad Complutense (Unidad asociada del CSIC).

TABLA 5. NÚMERO DE INVESTIGADORES (EJC) TOTALES Y POR 10.000 HABITANTES POR SECTORES DE EJECUCIÓN (DATOS DE 2007).

	Empresa		Universidad		Gobierno		Total	
	Num. Invest.	Por 10.000h	Num. Invest.	Por 10.000h	Num. Invest.	Por 10.000h	Num. Invest.	Por 10.000h
EU-27	666.816 (49,0%)*	13,7	487.550	10,0	185.766	3,8	1.360.332	28,0
España	42.101 (34,3%)*	9,4	58.813	13,1	21.412	4,8	122.624	27,3
Francia**	114.059 (54,0%)*	18,1	67.935	10,8	25.641	4,1	211.129	33,4
Aleman.	172.744 (60,8%)*	21,0	68.000	8,3	43.561	5,3	284.305	34,6
Suecia	30.928 (64,8%)*	33,8	14.840	16,2	1.941	2,1	47.762	52,2
Finland.	22.005 (56,4%)*	41,6	12.153	23,0	4.482	8,5	39.000	73,7

* Porcentajes de investigadores que trabajan en empresas. ** Datos de 2006.
Fuente: OECD, "Main Science and Technology Indicators": vol. 2009/1.

En aspectos fundamentales hay que destacar los trabajos sobre Física de la Materia Condensada que se realizan en departamentos universitarios y en institutos del CSIC. Física es el área científica que, en términos de impacto de las publicaciones, ha estado desde el periodo 1993-1997, por encima del valor medio mundial (25% por encima en el periodo 1999-2009, Tabla 4). Asimismo, hay que destacar las investigaciones sobre Química de Estado Sólido y sobre compuestos organometálicos que se llevan a cabo en departamentos universitarios.

4.3. Relaciones investigación-empresas

El esfuerzo realizado para la promoción de la investigación en materiales por parte de las universidades y centros públicos de investigación españoles no ha sido correspondido con la misma intensidad por parte de las empresas¹. 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 con el resto de Europa (informe COTEC, 2006).

En el año 2007, el gasto en I+D de las empresas españolas, en términos del PIB, fue del 0,71 % frente a una media europea (EU-27) del 1,12%. En cuanto al número de investigadores que trabajan en empresas, el déficit es significativo e importante. En las empresas españolas (año 2007) trabajaban 42.101 investigadores (jornada completa, EJC) lo que representa el 34,3% del total de personal investigador y, en relación con la población, 9,4 investigadores por cada 10.000 habitantes (Tabla 5). En la Unión Europea EU-27, los investigadores en la empresa representan el 49,0% del total y el número de investigadores por 10.000 habitantes es 13,7. Los valores para Francia (año 2006) son 54,0% del total de investigadores y 18,1 investigadores por 10.000 habitantes y en el caso de Alemania los números son 60,8% y 21,0 respectivamente. Esto significa, en términos de puestos de trabajo, que hay un déficit en la

empresa española de 19.000 puestos de investigadores para alcanzar la media de la EU-27, de unos 39.000 investigadores para alcanzar el nivel de Francia y de unos 52.000 investigadores para igualar la situación de Alemania. En los otros dos sectores (universidades y sector público) España está bien situada y es de destacar que en el sector universidad (13,1 investigadores por 10.000 habitantes) está por encima de la EU-27 (10,0), de Francia (10,8) y de Alemania (8,3).

En cuanto a la situación de las patentes en España, aunque el número total de solicitudes de patentes con efectos, ha aumentado en un 51% en el periodo 2000-2007, el número de solicitudes sigue representando un porcentaje muy bajo del total de solicitudes de los países de la EU-27 y de la OCDE. Las patentes triádicas (aquellas con efectos conjuntos en las oficinas europea, estadounidense y japonesa) registradas en 2006 por empresas o centros de investigación españoles representan sólo el 1,60% del total de las solicitudes de los países de la EU-27 y el 0,47% del total de los países de la OCDE. Es el indicador donde mayor distancia registra España respecto a los ámbitos de referencia utilizados (Informe Cotec-2009).

Es difícil explicar la poca atención de las empresas españolas a actividades de I+D, como lo demuestra el importante déficit de investigadores en las empresas en relación, no sólo con los países más avanzados sino también con la media de la EU-27. No obstante, se constata que durante los últimos años se ha producido un cierto esfuerzo por parte de las empresas en actividades de I+D. Así, en el periodo 2002-2007, el gasto interno total de las empresas españolas ha pasado del 0,54 al 0,71 en términos de porcentaje del PIB y el número de investigadores (EJC) ha pasado de 24.632 en 2002 a 42.101 en 2007. Estos datos justifican un cierto optimismo, existente hasta el año 2007, respecto al proceso de convergencia del sistema español de innovación con Europa, optimismo que queda reflejado en los Informes Cotec de aquellos años. En estos informes se hace un análisis muy detallado de la evolución del sistema español de innovación que se complementa con el cálculo de un índice (Índice Cotec) elaborado a partir de las consultas a un panel de expertos. Estas percepciones positivas se quiebran en 2008, coincidiendo con la crisis financiera, cuando la opinión de los expertos consultados por COTEC es ciertamente pesimista: El Informe Cotec 2009 termina así sus consideraciones finales: "El índice Cotec para 2008 ha experimentado la caída más pronunciada de toda su historia,

¹ Hay que señalar que existen algunos sectores en los que las empresas españolas son competitivas a nivel internacional. En el área de materiales podemos citar como ejemplos, 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 colaboración del Instituto de Tecnología Cerámica de la Universidad Jaime I de Castellón.

situándose en su valor más bajo desde 2003. Esto viene a confirmar que puede estar en peligro la supervivencia del núcleo de un sistema de innovación que comenzaba a liderar un apreciable cambio en la capacidad tecnológica española como hacen patente los datos estadísticos hasta 2007”.

Con la misma preocupación terminaba el Presidente de COTEC en la presentación del Informe 2009: “lo que es verdaderamente urgente e ineludible es conservar lo hasta ahora logrado; porque si no mantenemos el núcleo que hemos conseguido crear dentro de nuestro sistema, tendremos que volver a empezar, tal vez desde el mismo punto de partida de hace diez años. Entre las muchas medidas que se están aplicando para salir de la crisis, una de ellas debe, sin duda, estar orientada a preservar este núcleo, que tantos esfuerzos nos ha costado conseguir”.

Esta situación que tiene una incidencia clara sobre el desarrollo económico de España, exige una reflexión sobre el proceso de innovación y producción industrial, tanto por parte de las empresas como por parte de los organismos de investigación.

Este proceso incluye las siguientes fases: Investigación-Desarrollo tecnológico-Producción. Las responsabilidades de la primera y tercera fase están claras; ciertas dudas surgen en el caso del desarrollo tecnológico que es el paso intermedio por el cual el descubrimiento científico es llevado al punto en que es puesto en uso práctico. Es un proceso de gran importancia, pero tanto las estructuras de los centros como las características del personal que se requieren para el desarrollo tecnológico son distintas de las que se requieren para la 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 de la sociedad “Fraunhofer Gesellschaft” en Alemania con 60 institutos y 17.000 empleados.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de la investigación en Ciencia de Materiales en España, durante los últimos 30 años, se debió en 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 los de la Unión Europea.

Al éxito de esta iniciativa contribuyeron los siguientes hechos: a) la aprobación de la Ley de la Ciencia por el Gobierno español en la que se establecía el Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico en el que se incluía un Programa de Materiales; b) la incorporación de España a la Unión Europea (entonces Comunidad Europea) lo que permitía la participación de los científicos españoles en las convocatorias de los Programas Marco de la UE. También fue un acicate, el descubrimiento por Muller y Bednorz de la superconductividad a altas temperaturas. Este descubrimiento tuvo un gran impacto en la comunidad científica y despertó el interés en la investigación de los materiales funcionales, actividad poco desarrollada hasta entonces en España.

La actividad científica en el área de materiales se ha incrementado notablemente en España durante los últimos 30 años, como se refleja en el número de publicaciones en revistas internacionales. En Ciencia de Materiales, en el periodo 1999-2009, España ocupa el lugar 10 por el número de publicaciones (11.263) y el lugar 10 por el número de citas (72.871) de un total de 78 países. El CSIC, en el mismo periodo, ocupa el lugar 11 por el número de publicaciones (3.312) y el lugar 12 por el número de citas (23.982) de un total de 613 instituciones. Sin embargo los datos del impacto medio (nº de citas/nº de artículos), 6,47 para España (lugar 25 de los 78 países) y 7,24 para el CSIC (lugar 336 de las 613 instituciones) indican que, en general, la repercusión de estas publicaciones en la comunidad científica internacional no es de la importancia que corresponde a una investigación de excelencia. Tampoco se identifica una temática en que la contribución de los científicos españoles sea considerada de excepcional significación.

Estos datos exigen una reflexión por parte de la comunidad científica española. Si bien la respuesta de los científicos españoles al reto de la convergencia internacional, respecto a la actividad investigadora reflejada en el número de publicaciones, ha sido buena, es necesario dar un paso adelante planteándose objetivos de mayor importancia y trascendencia. Los proyectos se deben enfocar para producir conocimiento y desarrollo de nuevas tecnologías y no para aumentar el número de publicaciones.

En cuanto a la situación de la industria, los datos indican que la inversión en I+D de las empresas españolas y la contratación de personal investigador están todavía muy lejos, no sólo de los valores de los países avanzados sino también de la media de la EU-27. Ciertamente ha habido un periodo, 2002-2007, en que estas diferencias se estaban corrigiendo pero esta tendencia positiva se quiebra con la llegada de la crisis económica y nos deja para el futuro una preocupante interrogación (Informe Cotec 2009). Sin embargo, sobrepasado ya nuestro secular aislamiento, la pertenencia a la Unión Europea permite mirar al futuro con un punto de optimismo pues, antes o después, España seguirá el desarrollo de los países del ámbito europeo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Garfield, E, La ciencia en España desde la perspectiva de las citas: 1981-1992, *Arbor* CXLVII (577-578), p.111-133 (1994).
- [2] Informes Cotec Tecnología e Innovación en España. Informes Cotec 2006-2009, Fundación COTEC, Madrid.
- [3] Isi web of knowledge, Essential Science Indicators, Thomson Reuters, 2009.
- [4] Méndez, A., Insua, M.A., Gómez, I., López, G. y Refolio, C. Dinámica de la investigación multidisciplinar sobre nuevos materiales en España. Un análisis bibliométrico. *Cindoc-Csic*, 1993.
- [5] Oecd, Main Science and Technology Indicators, vol. 2009/1. OECD, Paris.
- [6] E. Criado, J. Glez-Ayuso, A. Durán. Programa Nacional de Materiales: 1988-92. Una Primera Evaluación. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, (33), 3, 193-210 (1993). *Art. Rev.*

Nota. El presente artículo es un resumen actualizado del publicado por el mismo autor en la revista: *Arbor* CLXXXIII (727, sept-oct), p. 687-704, 2007.

Recibido: 02/02/2010
Aceptado: 23/03/2010