

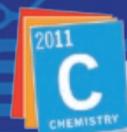


con CIENCIAS digital

Revista de divulgación científica de la Facultad de Ciencias de Zaragoza

<http://ciencias.unizar.es/web/conCIENCIASnumero7.do>

Nº 7 MAYO 2011



International Year of
CHEMISTRY
2011

**Ciencia,
pensamiento y...
MUCHA QUÍMICA**

Redacción

DIRECCIÓN:

- Ana Isabel Elduque Palomo

SUBDIRECCIÓN:

- Concepción Aldea Chagoyen

DISEÑO GRÁFICO Y MAQUETACIÓN:

- Víctor Sola Martínez

COMISIÓN DE PUBLICACIÓN:

- Jesús Anzano Lacarte
- Enrique Manuel Artal Bartolo
- Blanca Bauluz Lázaro
- Julio Bernués Pardo
- José Ignacio Canudo Sanagustín
- Ángel Francés Román
- M^º José Gimeno Serrano
- María Luisa Sarsa Sarsa
- María Antonia Zapata Abad

Edita

Facultad de Ciencias,
Universidad de Zaragoza.
Plaza San Francisco, s/n
50009 Zaragoza

e-mail: web.ciencias@unizar.es

IMPRESIÓN: Gráficas LEMA, Zaragoza.

DEPÓSITO LEGAL: Z-1942-08

ISSN: 1888-7848 (Ed. impresa)

ISSN: 1989-0559 (Ed. digital)

Imágenes: fuentes citadas en pie de foto.

Portada: www.universetoday.com, www.3djuegos.com y _daniel13 (www.flickr.com).

La revista no comparte necesariamente las opiniones de los artículos firmados y entrevistas.

<u>Editorial</u>	4
<u>¿Cómo se puede explicar el altruismo humano?</u> Manuel Soler	6
<u>Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología</u> Francisco Balas y Jesús Santamaría	16
<u>Algunas reflexiones alrededor de nuestra Química</u> José Elguero	26
<u>El hidrógeno como combustible</u> Víctor M. Orera	42
<u>Una visión de la Química desde la empresa</u> Jorge Villarroya	54
<u>Maya o Shogun</u> Felipe Pétriz	58
<u>La ética profesional de los docentes y los sistemas de evaluación</u> Ana Isabel Elduque	62
<u>La Isla Decepción: un volcán activo bajo el hielo antártico</u> Andrés Gil, Inmaculada Gil, Adolfo Maestro, Jesús Galindo y Jorge Rey	76
<u>La profesión del químico</u> Luis Comenge y Susana Palacián	88
<u>Modelización y simulación. La asignación alfabética de apellidos</u> Andrés Cruz	100
<u>Conocer, tras ver, para actuar: la componente matemática</u> Jesús Ildfonso Díaz	110
<u>Noticias y actividades</u>	122



Hoy, querido lector, ponemos a tu disposición una nueva edición de *conCIENCIAS* con el ánimo de seguir divulgando Ciencia durante un poco más de tiempo. Al menos, mientras nos duren las fuerzas y los escasos recursos económicos de los que disponemos.

En cada número, sin haber una única temática, sí surgen varios artículos relacionados. Como se puede comprender, esto no es aleatorio y, desde la dirección de la revista, intentamos que ello sea así en aras de una mayor coherencia interna del texto. En esta ocasión, lo que hemos querido desde la dirección de la revista es elevar un poco las miras de lo que llamamos divulgación científica. En las páginas que continúan, los lectores podréis encontrar varios artículos de los denominados *de pensamiento*. Es decir, tienen más de ensayos que de artículos científicos al estilo clásico. Y alguien se preguntará el por qué de este hecho. Pues, como ya he dicho, porque creo que debemos elevar las miras del concepto divulgación y extenderlo hacia el campo del pensamiento en general.

Pensar exige recabar información, estudiarla y examinarla, obtener de ella síntesis y razonamientos y, en un sentido amplio, exponerlos de forma razonada. Ya sé que se me puede decir que pensar es un proceso psicológico diferente al hablar, que es una acción física. Pero solo responderé como defensa de mi argumento que no conozco a ningún pensador mudo. Pensar es lo que realmente distingue a los humanos de las bestias. Las relaciones humanas, los valores y principios

éticos, el conocimiento, hasta el amor, son hijos del pensamiento. El pensamiento es aquello que nos permite superar nuestros instintos, cuyo único fin es la supervivencia de la especie, bien a nivel individual, bien a nivel genético. Es lo que permite que la especie humana sea el auténtico ser superior que habita este planeta; y lo haya dominado.

Por eso, la inclusión de artículos de reflexión, casi no me atrevo a llamarlos de pensamiento, nos ha parecido una más que interesante novedad. Y, en eso sí sigo siendo fiel a los principios fundacionales de esta revista, mejor si están escritos por científicos o personas muy relacionadas con la Ciencia.

La gran parte de los científicos somos personas con una formación superior muy por encima de la de nuestros conciudadanos. Estamos obligados a usar esta formación recibida para generar ideas. En los tiempos actuales, las soluciones simplistas están encontrando terreno abonado para cuestionarlo todo. Y, demasiadas veces, detrás no hay sino la impostura de unos pocos para imponer sus intereses a otros muchos. Las soluciones a problemas de máxima complejidad se discuten en las barras de los bares como si de un vulgar partido de fútbol se tratara. Avances tecnológicos como las redes sociales se muestran como la causa de rebe-

liones de comunidades enteras contra sus gobiernos, relegando la represión, la corrupción y la injusticia social de esas mismas sociedades a un papel de mero *atrezzo*. Evidentemente, si las sociedades no piensan, es fácil suponer que solo aceptaremos lo sencillo, lo que se puede resumir en unas pocas

“Debemos elevar las miras del concepto divulgación y extenderlo hacia el campo del pensamiento en general.”

“Las relaciones humanas, los valores y principios éticos, el conocimiento, hasta el amor, son hijos del pensamiento.”

imágenes, cuantas menos mejor, y que pueda ser sustituido rápidamente por otra temática nueva. Deberíamos recordar que los romanos, además de mucho desarrollo social, nos dejaron la política de *panem et circenses*, cuyas consecuencias llegaron hasta casi un milenio después del hundimiento del Imperio Romano de Occidente.

Os propongo, pues, un número para reflexionar. No hay que estar de acuerdo con los autores. Ni creo que entre nosotros lo estuviéramos. Lo importante es poder tener la oportunidad de debatir.

Ana Isabel Elduque Palomo
Directora de *conCIENCIAS*



El Pensador de Rodin.

*Foto por Wilhelm (www.flickr.com)

¿CÓMO SE PUEDE EXPLICAR EL ALTRUISMO HUMANO?

El comportamiento altruista en la especie humana es uno de los temas estrella de la biología evolutiva en la actualidad. Durante la última década se han publicado sobre este tema una multitud de artículos en las revistas más prestigiosas, más de una docena de ellos en *Nature* y *Science*.

POR MANUEL SOLER



¿Cómo se puede explicar el altruismo humano?

Este artículo está basado en el capítulo 8 de mi libro titulado "Adaptación del comportamiento: comprendiendo al animal humano" (Soler 2009a) y en una revisión que hice sobre el tema y que fue presentada en el Congreso de la Sociedad Española de Biología Evolutiva (Soler 2009b).

¿Qué es un comportamiento altruista?

Un comportamiento altruista se define como aquel que se ejecuta en beneficio de otros individuos (receptores) a la vez que supone un coste para el que lo hace (donante). Un verdadero acto altruista no debería de reportar ningún tipo de beneficio al donante. Por tanto, se trata de un comportamiento que tendría que ser penalizado por la selección natural, puesto que los individuos que invirtieran parte de sus recursos en ayudar a los demás dejarían menos descendientes que los que dedicaran todos sus recursos a sí mismos. De hecho, el propio Darwin reconoció que el comportamiento de los insectos sociales parecía un problema insuperable para su teoría (Darwin 1859).

Principales modelos que explican los comportamientos altruistas

Sin lugar a dudas, el más importante es la "selección de parentesco" (Hamilton 1964) puesto que la mayor parte de los comportamientos altruistas que se han descrito en el resto de los animales, excluyendo a nuestra especie, se dan entre parientes. Con este modelo, Hamilton consiguió explicar el enigma de la cooperación en los insectos sociales y en otras muchas especies en las que los individuos que interactúan están

estrechamente emparentados. La base de la selección de parentesco estriba en que un individuo puede aumentar su eficacia biológica no solo invirtiendo en sus hijos sino también en los parientes próximos, con los que (igual que con sus hijos) comparte genes en mayor o menor proporción (Hamilton 1964). Esto quiere decir que, cuando los actos altruistas se realizan favoreciendo a los parientes, son altruistas desde el punto de vista comportamental, puesto que es un acto que tiene un coste para el donante y supone un beneficio para el receptor pero, desde el punto de vista genético, es un acto egoísta puesto que se obtiene un beneficio, ya que el donante está contribuyendo a pasar sus genes a la siguiente generación.

En algunas ocasiones, se han descrito comportamientos altruistas en los que los individuos beneficiados no están emparentados con los donantes. Para explicar estos casos, Robert Trivers (1971) propuso lo que llamó "altruismo recíproco" que también se conoce como reciprocidad y que, como el nombre indica, se trata de un intercambio de beneficios, lo que en muchas especies de primates se podría traducir por: "si tú rascas mi espalda yo rascaré la tuya". Por tanto, desde el punto de vista de este modelo de la reciprocidad, los verdaderos actos altruistas tampoco existen puesto que, como ya hemos destacado anteriormente, por definición, para que un comportamiento sea verdaderamente altruista el donante no debería de obtener ningún tipo de beneficio.

“Un verdadero acto altruista no debería de reportar ningún tipo de beneficio al donante... se trata de un comportamiento que tendría que ser penalizado por la selección natural.”

“En otras especies de primates la cooperación solo se da entre parientes o entre unos pocos individuos que conviven en el mismo grupo”

Características distintivas del comportamiento altruista en humanos

En nuestra especie, aunque lo más frecuente es la cooperación entre parientes y entre compañeros habituales que se encuentran en multitud de ocasiones, es muy llamativo que, con mucha frecuencia, se presta ayuda a individuos extraños con los que es muy improbable que volvamos a encontrarnos (Soler 2009a). En nuestra especie es normal que se ayude a quien lo necesita, aunque sea un desconocido en una ciudad de varios millones de habitantes. Aunque no siempre, con cierta frecuencia la ayuda que se presta a otras personas puede llegar a ser bastante costosa: compartimos alimento con los necesitados, cuidamos de los enfermos, donamos sangre, hacemos donativos o colaboramos con las ONGs, nos apuntamos a voluntariados, etc. Incluso, cuando es necesario, son muchas las personas dispuestas a arriesgar su vida por salvar la de un congénere, aunque no se le conozca de nada.

Estas características del comportamiento altruista de nuestra especie llaman la atención, sobre todo teniendo en cuenta que en otras especies de primates la cooperación solo se da entre parientes o entre unos pocos indi-

viduos que conviven en el mismo grupo (Soler 2009a). Este tipo de cooperación en la que el donante paga un elevado coste constituye un enigma evolutivo (Fehr & Gächter 2002, Johnson et al. 2003) porque los modelos que explican los comportamientos altruistas en el resto de los animales (principalmente selección de parentesco y reciprocidad directa) no pueden ser aplicados en estos casos que, al menos aparentemente, parecen verdaderos comportamientos altruistas, es decir, suponen un coste y no se obtiene ningún beneficio a cambio, ni directo ni genético.

Modelos que explican el altruismo humano: reciprocidad indirecta y generalizada

Se han propuesto cuatro modelos principales para explicar el comportamiento altruista típico de nuestra especie (Fehr & Fischbacher 2003; Nowak 2006): la reciprocidad indirecta,



*<http://blogsdelagente.com/monicaforte/>

¿Cómo se puede explicar el altruismo humano?

la reciprocidad generalizada, la reciprocidad forzada y la selección de grupo. La reciprocidad indirecta sería aquella en la que A ayuda a B porque antes B había ayudado a C. Y la reciprocidad generalizada aquella en la que A ayuda a B porque antes C había ayudado a A (ver figura anexa). La base de estos dos tipos de reciprocidad, que casi nunca se encuentra en otras especies (indirecta y generalizada), es que la persona altruista, gracias a sus actos altruistas, consigue una buena reputación. Por ejemplo, en los casos de la donación de sangre, está claro que a nadie le cae mal una persona porque sea donante, más bien todo lo contrario. Hay muchos datos que apoyan el hecho de que ser donante de sangre reporta beneficios (Guillespie & Hillyer 2002). Por ejemplo, se ha encontrado que cuando los equipos de recolección de sangre se desplazan a grandes empresas, universidades y otros centros de trabajo, aumentan las donaciones. Esto seguramente es debido a que en el centro de trabajo se facilita el reconocimiento social, ya que aumentan las probabilidades de que el donante sea observado por los demás, lo que conlleva conseguir la buena reputación. Las donaciones también au-

mentan cuando se distribuye un pin o cualquier distintivo que muestra que la persona que lo porta ha donado sangre. Por otro lado, los donantes habituales tienen un carné que lo acredita y que pueden enseñar cuando les interese.

La importancia de la buena reputación también se ha demostrado en numerosos experimentos de "juegos de bienes comunales". Incluso, se ha demostrado que la buena reputación, conseguida mediante comportamientos cooperativos que benefician a los miembros de su grupo, es recompensada no solo por sus compañeros de grupo social sino que también es recompensada en el futuro por los miembros de otros grupos a los que trasciende su fama de altruista (Semmann et al. 2005).

Reciprocidad forzada

Este tercer tipo de reciprocidad denominada forzada está basada en que los humanos tenemos una predisposición a cooperar pero, además, también tenemos una predisposición a castigar a los que presentan comportamientos

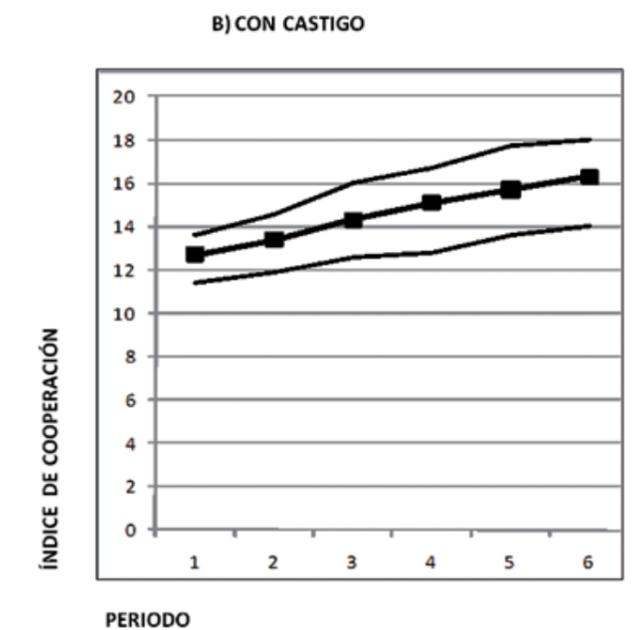
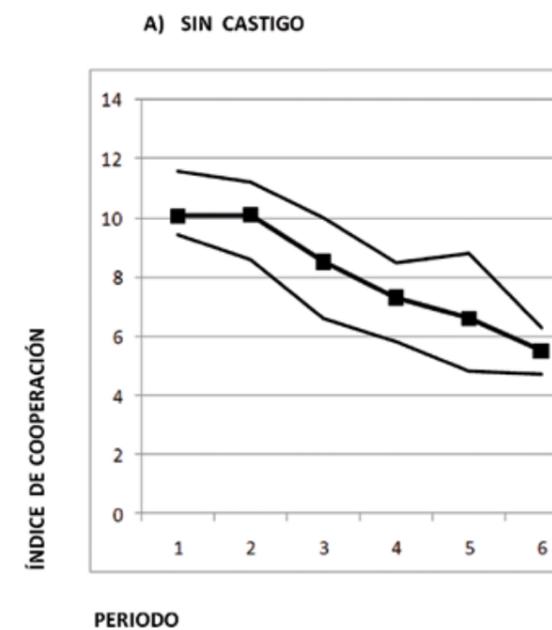
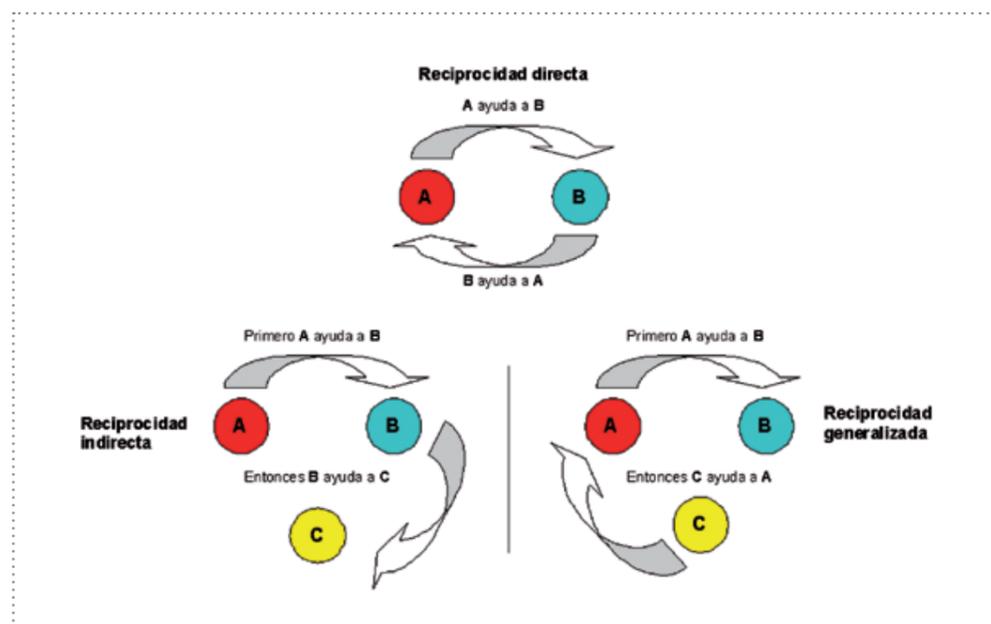
no cooperativos o que violan las normas sociales, incluso aunque suponga un coste el hacerlo (Herrmann et al. 2008). En las reuniones de todo tipo, la mayoría que busca el bien general presiona a las minorías o individuos egoístas que, de alguna manera, se oponen a ese beneficio general.

Aunque esta idea es reciente y ha sido criticada por algunos, existe abundante evidencia de que la reciprocidad forzada sería una adaptación evolucionada como consecuencia de un proceso evolutivo en el que interaccionarían tanto factores genéticos como culturales (Fehr & Rockenbach 2003, Henrich et al. 2006). En este caso, como en muchos otros, la cultura puede haber contribuido a proveer de mecanismos que aportan soluciones más rápidas y eficaces a los problemas de cooperación en los grupos sociales que los procesos de selección natural basados en cambios genéticos.



La base de esta reciprocidad reforzada es el castigo social. En los diagramas adjuntos se pueden observar los resultados obtenidos por Fehr & Gächter (2002) en un experimento de juegos de bienes comunales en el que los participantes tenían que disputar, en una primera parte, seis jugadas en las que no existía la posibilidad de castigar a los no cooperadores

Reciprocidad directa, indirecta y generalizada. Modificada de Nowak y Sigmund (2005).



Resultados de un experimento de juegos de bienes comunales en el que los participantes disputaron seis jugadas en una primera parte en la que no se permitía el castigo social y otras seis jugadas en la segunda parte en la que sí se podía castigar (ver texto). Modificada de Fehr & Gächter (2002).

¿Cómo se puede explicar el altruismo humano?

y, en la segunda parte, otras seis jugadas en las que sí existía esta posibilidad, aunque a su vez les suponía un coste. Durante las seis jugadas sin castigo, el porcentaje de recursos destinado a la cuenta comunal iba disminuyendo, mientras que, cuando se disponía de la posibilidad de castigar al que no colaborara, tras cada jugada iba aumentando ese porcentaje. Estos resultados indican que, en ausencia de castigo, se busca la forma de explotar a los demás, mientras que si el castigo funciona se “aprende” a ser cooperativo.

El castigo social se considera tan importante que muchos autores defienden que sin este castigo

social, promovido por las emociones negativas que nos inspiran los ventajistas que no cooperan con la sociedad en la que viven, no podría mantenerse (desde el punto de vista evolutivo) la cooperación humana. La relevancia del castigo social se pone de manifiesto claramente en todas las culturas, puesto que to-

“Darwin sugirió que las tribus constituidas por individuos cooperativos, leales y agradecidos, que estuvieran siempre dispuestos a ayudar y defender a sus compañeros, saldrían victoriosas en sus enfrentamientos con las tribus vecinas.”

das ellas han promulgado leyes que imponen castigos para regular la convivencia y la cooperación (Soler 2009a).

Selección de grupo

El problema de los comportamientos altruistas en humanos está lejos de quedar resuelto. Aunque los modelos de selección de grupo quedaron muy desprestigiados a principio de la del siglo pasado, hoy día ha surgido con fuerza una propuesta de selección de grupo menos ingenua que podría funcionar.

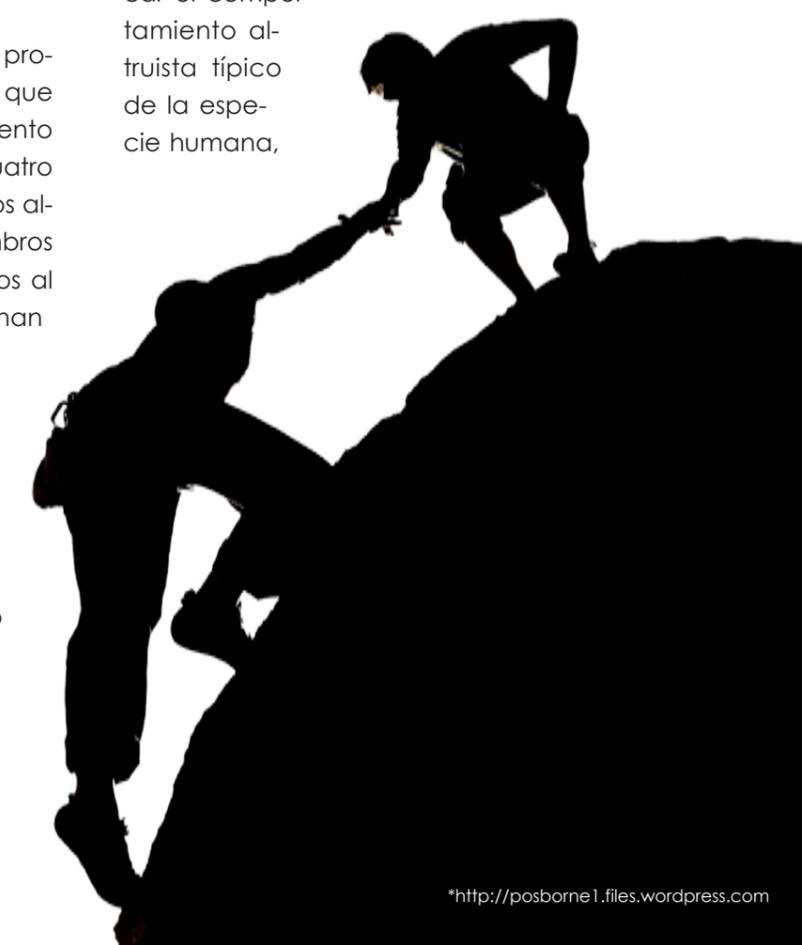
Darwin fue el primero en proponer un argumento de selección de grupo para explicar el altruismo en humanos. Sugirió que las tribus constituidas por individuos cooperativos, leales y agradecidos, que estuvieran siempre dispuestos a ayudar y defender a sus compañeros, saldrían victoriosas en sus enfrentamientos con las tribus vecinas.

Samuel Bowles (2006, 2008) defiende una propuesta basada en cuatro características que se supone que son propias del comportamiento y de la historia de nuestra especie. Esas cuatro características son: (1) los comportamientos altruistas son más frecuentes hacia los miembros del propio grupo, (2) los individuos extraños al grupo provocan reacciones hostiles, (3) se han desarrollado mecanismos sociales que disminuyen la competencia dentro del grupo (reparto de alimento, monogamia) y (4) habría una elevada competencia entre grupos. Ciertamente, estas cuatro características se cumplen y son típicas de todas las culturas humanas, por lo que este modelo de selección de grupo propuesto por Bowles podría funcionar y tener la fuerza necesaria para haber representado un papel protagonista en la evolución humana: una reducida competencia entre individuos disminuye la fuer-

za de la selección entre miembros del mismo grupo, y una elevada frecuencia de enfrentamientos entre grupos implica una fuerte presión selectiva, ya que los grupos más eficaces (con más individuos cooperativos) sobrevivirán y los menos eficaces se extinguirán. La conclusión de esta idea de Bowles es muy curiosa: el comportamiento altruista del que tanto presumimos los humanos se debe, en gran parte, a que somos una especie muy beligerante, una característica de la que no es como para sentirnos muy orgullosos.

Una visión generalizada e integradora

Durante las dos últimas décadas, se han publicado multitud de artículos en revistas especializadas que estaban basados en alguno de los cuatro modelos mencionados anteriormente o en el castigo social. Es cierto que son los únicos que pueden explicar el comportamiento altruista típico de la especie humana,



*<http://www.mountainfilm.com>

*<http://posborne1.files.wordpress.com>

¿Cómo se puede explicar el altruismo humano?

el que tiene como receptor a personas desconocidas con las que existen muy pocas posibilidades de volverse a encontrar. Sin embargo, con tantas publicaciones sobre aspectos particulares del altruismo humano, se ha perdido un poco la visión general del tema. Parece como si todos los actos altruistas en humanos se realizan con personas a las que no conocemos de nada y esto no es cierto, la mayor parte de las colaboraciones tienen lugar entre parientes y entre personas que mantienen una relación bastante estrecha (amigos o compañeros). Por esto quiero destacar que nuestro comportamiento altruista evolucionó durante cientos de miles de años, mucho antes del florecimiento de las ciudades populosas que es donde son habituales los encuentros con desconocidos a los que lo más seguro es que no se vuelva a ver. Por tanto, hay que tener en cuenta que la selección de parentesco y la reciprocidad directa también son dos modelos importantes en el altruismo humano. Un ejemplo que lo pone de manifiesto es el estudio de Shavit et al. (1994), que analizó la cooperación entre parientes y no parientes durante los ataques con misiles Scud por parte de los iraquíes a la ciudad de Haifa durante la guerra del golfo. Hicieron entrevistas a las personas, durante o poco después de la guerra, y las preguntas estaban

diseñadas para de-

terminar quién prestaba y recibía la ayuda, y de qué tipo, durante los ataques con misiles. Los resultados mostraron que, durante una situación de peligro generalizada como la que suponían los bombardeos, la preocupación (llamadas por teléfono después de los bombardeos) y la ayuda directa, como ofrecer un refugio más seguro, era más frecuente entre parientes. Por otro lado, la ayuda psicológica (información y apoyo) era prestada principalmente por los amigos y conocidos con los que era más habitual el contacto durante el periodo previo a la guerra. Es decir, en una situación de amenaza mortal, se buscaba y se recibía ayuda principalmente de los parientes, de acuerdo con las predicciones de la teoría de la selección de parentesco. Pienso que no se debe abordar el estudio de los comportamientos altruistas en humanos olvidándonos de que las relaciones entre parientes y compañeros habituales son muy importantes porque todo está relacionado. Durante los últimos 5 millones de años, nuestros antepasados homínidos y nuestra propia especie *Homo sapiens* vivió en pequeños grupos en los que muchos individuos estaban emparentados y donde todos se conocían entre sí. Es evidente que, durante este prolongado periodo, los actos altruistas se podrían explicar por selección de parentesco y reciprocidad directa, aunque la selección de grupo también podría representar un papel significativo en un escenario en el que la competencia entre grupos humanos podría ser importante. Esta misma situación es la que se vive actualmente en todas las tribus o pequeños pueblos donde las personas viven en grupos reducidos.

Fue sólo muy recientemente, hace unos 10.000 años, cuando aparecieron las grandes ciudades y sería, a partir de este momento, cuando en ellas cobrarían importancia los otros modelos de reciprocidad más complejos (indirecta, generalizada y reforzada) pero sólo aquí, en aglomeraciones humanas donde la mayor parte de las personas no se co-

“El comportamiento altruista del que tanto presumimos los humanos se debe, en gran parte, a que somos una especie muy beligerante, una característica de la que no es como para sentirnos muy orgullosos.”

nocen entre sí. Seguramente, estos modelos de reciprocidad más compleja se han desarrollado gracias a los mecanismos psicológicos, como nuestras emociones, que habían evolucionado como adaptaciones a nuestra compleja vida social. Evidentemente, la selección cultural habrá jugado un papel muy importante en la evolución de estos mecanismos de reciprocidad compleja, hasta el punto de que es muy probable que nuestro lenguaje haya sido el principal artífice de esta evolución pues, gracias a la enorme capacidad de comunicación que nos aporta, se puede conseguir y se puede transmitir la buena reputación y los actos relacionados con el castigo altruista que son las bases del altruismo humano. De todas formas, queda claro que, al igual que ocurre en otros animales, los comportamientos altruistas en humanos tampoco son realmente altruistas puesto que, como hemos visto, se obtienen beneficios a cambio. Una buena reputación es algo muy importante.

Manuel Soler

Dpto. de Biología Animal
Facultad de Ciencias
Universidad de Granada

Referencias bibliográficas

- Bowles, S. (2006) Group competition, reproductive levelling, and the evolution of human altruism. *Science* 314, 1569.
- Bowles, S. (2008) Conflict: Altruism's midwife. *Nature*, 456, 326.
- Darwin, C. (1859) *On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the preservation of Favored Races in the Struggle for Life*. John Murray, London.
- Fehr, E. & Fischbacher, U. (2003) The nature of human altruism. *Nature* 425, 785.
- Fehr, E. & Gächter, S. (2002): Altruistic punishment in humans. *Nature* 415, 137.
- Fehr, E. & Rockenbach, B. (2003). Detrimental effects of sanctions on human altruism. *Nature* 422, 137.
- Gillespie, G.E. & Hillyer C.D. (2002) Blood donors and factors impacting the blood donation decision. *Trans. Med. Rev.* 16, 115.
- Hamilton, W.D. (1964). The genetical evolution of social behaviour. *J. Theor. Biol.* 7, 1.
- Henrich, J., McElreath, R. Barr, A., Ensminger, J. & Barrett, C. (2006) Costly punishment across human societies. *Science* 312, 1767.
- Herrmann, B., Christian, T. & Gächter, S. (2008) Antisocial punishment across societies. *Science* 319, 1362.
- Johnson D.D.P., Stopka P. & Knights S. (2003) Sociology—the puzzle of human cooperation. *Nature* 421, 911.
- Nowak, M. A. (2006) Five rules for the evolution of cooperation. *Science* 314, 1560.
- Semman, D., Krambeck, H.-J. & Milinski, M. (2005) Reputation is valuable within and outside one's own social group. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 57, 611.
- Shavit, Y., Fischer, C. & Koresh, Y. (1994) Kin and nonkin under collective threat: Israeli networks during the gulf war. *Social Forces* 72, 1197.
- Soler, M. (2009a). Adaptación del comportamiento: comprendiendo al animal humano. Síntesis, Madrid.
- Soler, M. (2009b). Modelos que explican el comportamiento altruista en humanos: la selección de parentesco y la reciprocidad directa también son importantes. Congreso SESBE, Valencia.
- Trivers, R.L. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *Q. Rev. Biol.* 46, 35.

NANOSEGURIDAD: CONFRONTANDO LOS RIESGOS DE LA NANOTECNOLOGÍA

“Debemos conseguir que la nanotecnología se convierta en la próxima revolución industrial, pero que, a diferencia de revoluciones tecnológicas anteriores, lo consiga con el mayor respeto a la seguridad, la salud y el medio ambiente.”

**POR FRANCISCO BALAS
Y JESÚS SANTAMARÍA**

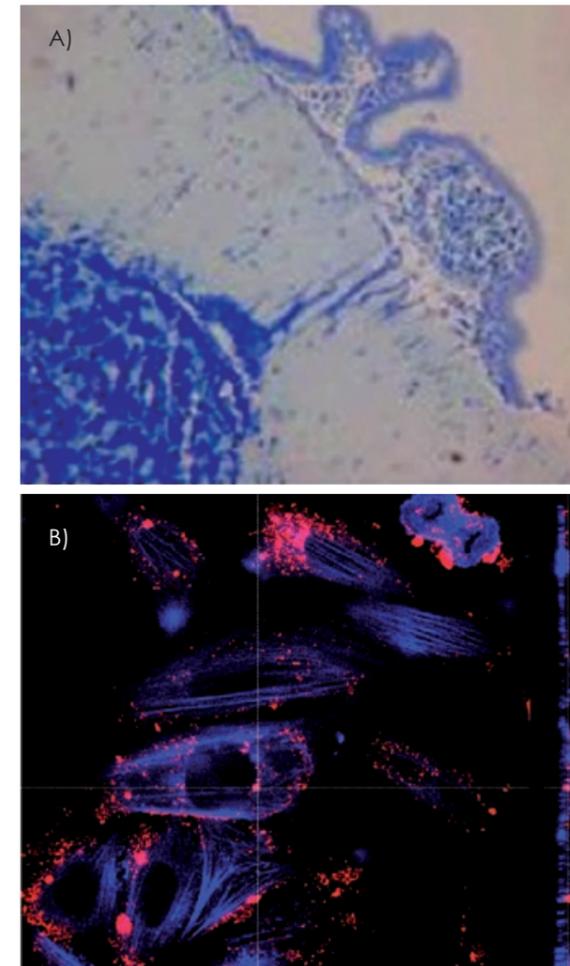
Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

La Nanociencia está sentando las bases científicas para una revolución tecnológica, con aplicaciones en áreas tan diversas como la información y la comunicación, los materiales, la energía o la medicina. Proporciona además conceptos que ya han dejado atrás el laboratorio y entrado en el terreno comercial, alcanzando casi todos los sectores industriales, con el consiguiente impacto económico. Las perspectivas de crecimiento para el mercado nanotecnológico son espectaculares, incluso en esta época de crisis. Lux Research¹ ha estimado las ventas de productos con componentes nanotecnológicos en 245.000 millones de dólares en 2009, y prevé que esta cifra se multiplique por 10 en 2015. Estos productos hacen tiempo que han alcanzado a los consumidores, formando parte de objetos de uso cotidiano.

Hace ahora cinco años, en marzo de 2006 se compiló en Estados Unidos el primer registro de productos comerciales que empleaban algún tipo de nanotecnología.² El número de productos fue entonces de 212 y contenía algunos dispositivos electrónicos, materiales de alta tecnología y cosméticos. Ese mismo listado ha llegado actualmente a 1317 productos pero no incluye, ni mucho menos, todos los disponibles que se estiman entre 2500 y 3000. Hoy en día son los artículos relacionados con la salud y el bienestar personal los que dominan en los inventarios de productos derivados de las nanotecnologías, representando más de la mitad de los artículos registrados. El grupo principal de los materiales se refiere a compuestos con nanopartículas de plata (24% del inventario del PEN³), empleado por sus capacidades antimicrobianas, frente al resto de los materiales que van desde los nanotubos de carbono, *quantum dots* de diversa composición y otros óxidos metálicos tales como el dióxido de titanio y el óxido de cinc. La mayor parte de estos productos se manufacturan en los Estados Unidos y China, seguidos muy de lejos por Canadá, Alemania e India. En España existe una actividad de investigación científica muy considerable que, afortunadamente, no desdeña las aplicaciones: en número de patentes relacionadas con la nanotecnología nos situamos por delante de países como Italia o Rusia.³

“Las perspectivas de crecimiento para el mercado nanotecnológico son espectaculares, incluso en esta época de crisis.”

Productos de consumo que incluyen nanomateriales en su composición.



Penetración de nanomateriales en sistemas biológicos.

A) Corte histológico de nanopartículas de C60 en células de pulmón (<http://www.plymouth.ac.uk/pages/view.asp?page=32415>).

B) Imagen de microscopía confocal mostrando nanopartículas de silice en el interior de células. Colaboración con el grupo de Nuria Villaboa, Hospital La Paz (Madrid).

Junto con el desbordante interés académico e industrial que la Nanotecnología despierta, han comenzado a elevarse voces que cuestionan la seguridad de los nanomateriales para la salud humana. Nanopartículas y nanohilos de variada naturaleza han demostrado repetidamente su capacidad de atravesar membranas biológicas, alcanzando no solo el citoplasma sino el núcleo de distintos tipos de células. Esta característica, al mismo tiempo que posibilita prometedoras aplicaciones biomédicas, plantea también interrogantes en cuanto a la posibilidad de que se produzca la absorción indeseada de nanomateriales en el organismo, con efectos biológicos adversos que han podido demostrarse claramente en estudios con cultivos celulares y con animales de laboratorio. Existe una preocupación creciente no solo por los riesgos reales del manejo de nanomateriales, que siempre pueden minimizarse con las medidas adecuadas, sino porque la percepción de estos riesgos por parte del público puede cambiar la imagen favorable que los sondeos de opinión reflejan en relación con la Nanotecnología.⁴

A la hora de enfocar este tema, vale la pena comenzar por reconocer que los nanomateriales siempre han estado con nosotros. Se han encontrado nanopartículas de TiO₂ en los pulmones de un cuerpo humano de más de 7.000 años de antigüedad encontrado en el Tirolo, y nanotubos de carbono atrapados en hielo de 10.000 años de antigüedad.⁵ Estamos, además,

1. Lux Research, Global Trends in Nanotech and Cleantech, 2010 (www.luxresearchinc.com).
2. Proyecto en Nanotecnologías Emergentes (PEN). The Woodrow Wilson International Center for Scholars <http://www.nanotechproject.org>.
3. Maclurcan, D. C. (2008) "Nanotechnology and Developing Countries Part 2: What Realities?" <http://www.azonano.com/Details.asp?ArticleID=1429>.
4. Satterfield, T. y cols. Nature Nanotechnology 2009, 4, 752.
5. Murr, L.E., Mater. Characteriz. 2009, 60, 261.

Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

en contacto cotidiano con nanopartículas: en cada respiración inhalamos unos 10 millones, fundamentalmente sílice y óxido de titanio, así como nanomateriales carbonosos originados por procesos de combustión, debidos en buena parte al tráfico rodado pero también al humo de nuestras cocinas. La inmensa mayoría son, por tanto, nanomateriales clásicos, a los que hemos estado expuestos desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, la actividad investigadora en Nanociencia en las últimas dos décadas ha creado una miríada de nuevos materiales sintetizados artificialmente en el laboratorio (conocidos como ENs por sus siglas en inglés: *Engineered Nanomaterials*) cuyo número y variedad aumenta constantemente. Son los ENs los que concentran la mayor parte de la preocupación ya que, debido a su novedad, sus propiedades y sus posibles efectos adversos son en gran parte desconocidos. En el año 2004, la plataforma de Internet europea sobre Nanotecnología Nanoforum.org realizó una encuesta online en colaboración con la Comisión Europea para determinar la actitud del público hacia determinados aspectos del desarrollo de

la Nanociencia y Nanotecnología. La mayor parte de los que respondieron (75%) consideró que los riesgos para la salud, la seguridad de los trabajadores y el medio ambiente debían ser incorporados cuanto antes a la investigación. También se reclamó que las instituciones europeas consideren seriamente las implicaciones sociales de la Nanotecnología fomentando una mayor comunicación y dialogo entre instituciones, tecnólogos y consumidores.⁶

¿Por qué no existe una información más clara sobre los potenciales efectos nocivos de los materiales que se van sintetizando? La principal razón es que la evaluación de la toxicidad de los nanomateriales es compleja porque depende no solo de la composición química del material sino de factores tales como su tamaño, área superficial, forma, agregación, recubrimiento superficial y solubilidad.⁷ Por otro lado, un mismo nanomaterial puede tener efectos adversos hacia unos tipos de células pero no hacia otros, e incluso diferentes indicadores de toxicidad pueden estar en desacuerdo.⁸ Esta complejidad ha originado la aparición de una

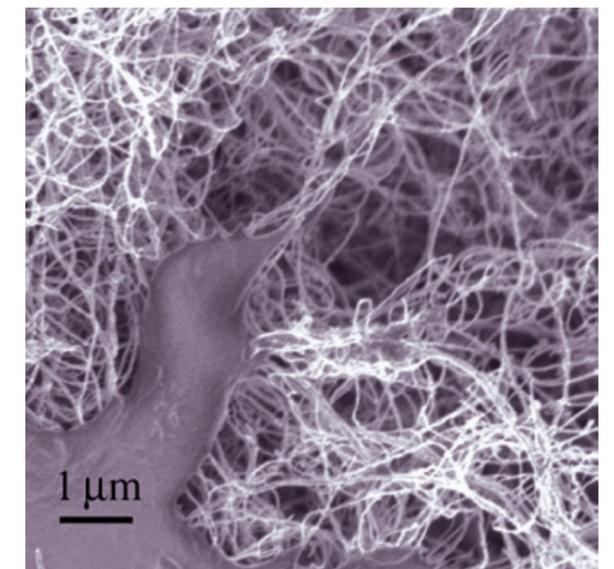
nueva disciplina, la *nanotoxicología*, que busca determinar el efecto sobre los diferentes organismos de la exposición a nanopartículas de diversa naturaleza.

“Vale la pena comenzar por reconocer que los nanomateriales siempre han estado con nosotros.”

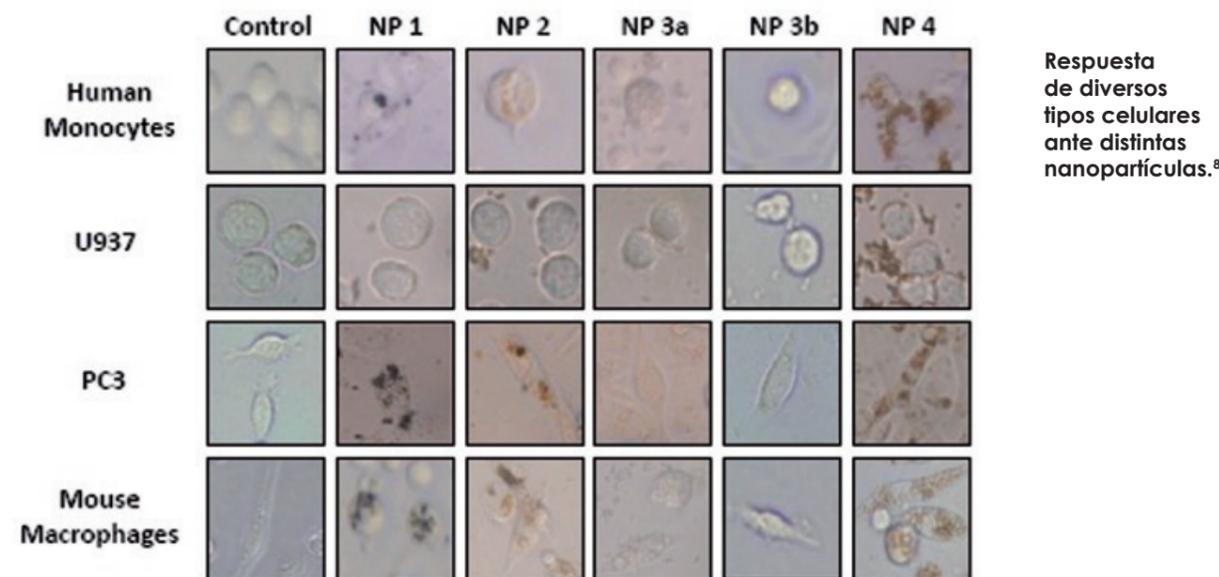
En este punto se plantea un dilema claro: por un lado se reconoce la posibilidad de que algunos nanomateriales puedan tener afectos adversos para la salud humana y se admite que, debido a la complejidad de los fenómenos involucrados, se requerirá mucho tiempo y esfuerzo hasta que estos posibles efectos puedan establecerse con precisión. Por otro, es evidente que el desarrollo de la Nanotecnología no puede detenerse, a la vista de los potenciales beneficios sociales y económicos que representa. Por ello, mientras se sigue avanzando en la investigación toxicológica se investiga en otras aproximaciones, más cercanas a la ingeniería que a la toxicología, que desarrollan métodos para gestionar los riesgos, analizan el comportamiento de aerosoles formados por nanomateriales, estudian su generación, monitorizan su presencia en el medio ambiente y desarrollan procedimientos adecuados para su retirada y desecho. Se parte de la base de que no deben aceptarse sin más las normas actuales de seguridad que se aplican a compuestos químicos,

porque el comportamiento presenta suficientes diferencias como para que los métodos habituales sean inadecuados en determinados escenarios.

Las vías de entrada de los ENs al organismo son similares a las que se consideran tradicionalmente para la exposición a productos químicos. La principal exposición a los nanomateriales resulta de la inhalación del aire en ambientes conteniendo ENs. Ciertamente, los estudios en este campo no solo han encontrado nanomateriales en los pulmones



Micrografía de nanotubos de carbono sobre células de pulmón de ratón (http://www.cdc.gov/niosh/blog/nsb052008_nano.html).



- Malsch, I., Oud, M. (2004) "Outcome of the open consultation on the European strategy for nanotechnology. Report, Nanoforum publication" <http://www.nanoforum.org/dateien/temp/nanosurvey6.pdf?24072005161134>.
- Nel, A. y cols. Science, 2006, 311, 622.
- Diaz, B. y cols. Small 2008, 4, 2025.
- Donaldson, K. y Poland, C.A., Nature Nanotechnology 2009, 4, 708.

Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

de animales de laboratorio expuestos, sino que han mostrado vías por las que algunos de estos materiales pueden conducir a la formación de tumores.⁹ La ingestión es menos frecuente, pero puede darse involuntariamente, especialmente si hay alimentos en el lugar de manipulación o si se come con ropa de trabajo, y representa una vía de contaminación a veces más peligrosa que la inhalación. La piel es una barrera débil frente a materia nanoparticulada que, en múltiples ocasiones, puede penetrar a través de los poros. Otras vías de penetración (mucosas, heridas) son menos habituales.

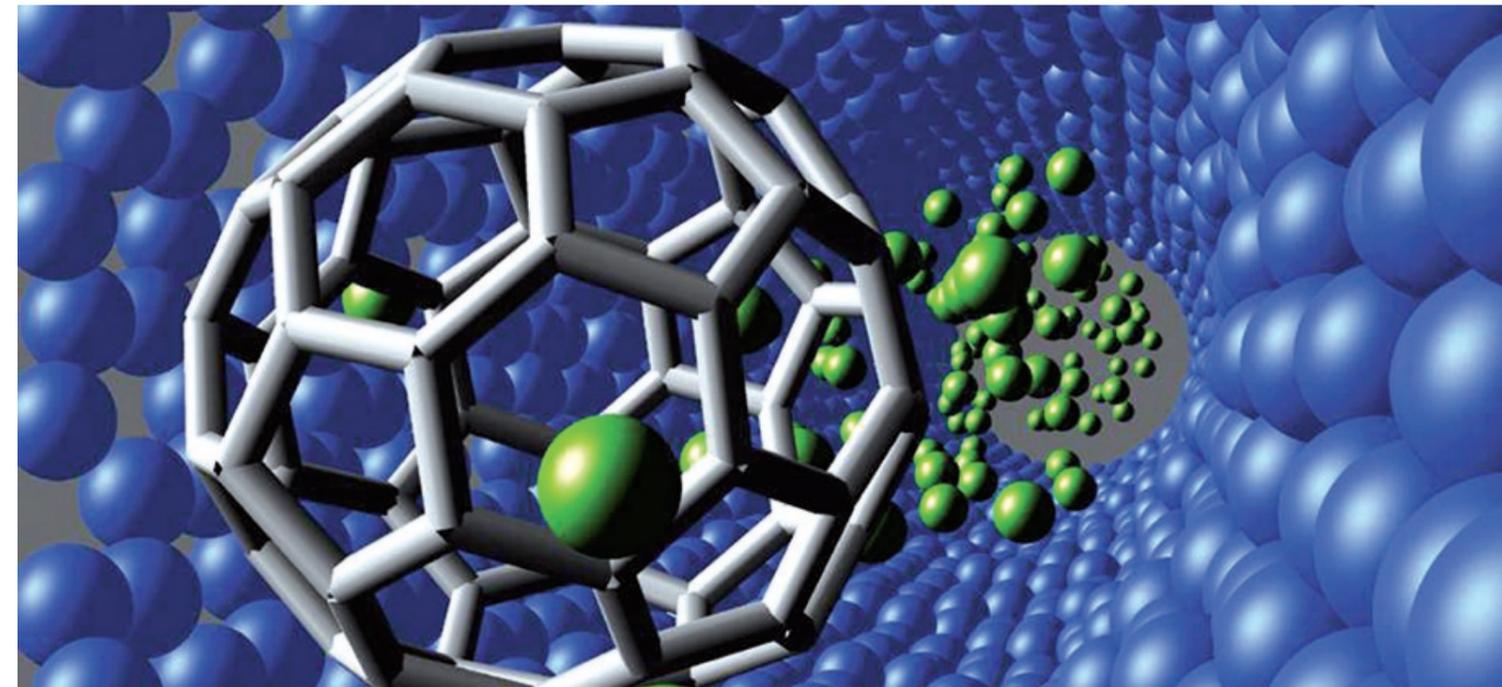
En la actualidad, la concentración de ENs en el ambiente general es baja, por lo que los lugares más expuestos a los riesgos asociados a las nanopartículas son las industrias que fabrican o procesan productos con nanomateriales y los laboratorios de investigación. En este sentido, cabría esperar que los manipuladores de nanomateriales fuesen conscientes de los riesgos potenciales y actuaran en consecuencia, pero la realidad dista mucho de esa situación ideal. En un estudio llevado a cabo entre marzo y junio de 2009 en más de 200 centros de investigación en Nanociencia en todo el mundo, se llegó a la conclusión de que la mayor parte de los investigadores en Nanotecnología no emplean el equipamiento de protección individual o general adecuado cuando trabajan con nanopartículas que pueden dispersarse en

“La evaluación de la toxicidad de los nanomateriales es compleja porque depende no solo de la composición química del material sino de factores tales como su tamaño, área superficial, forma, agregación, recubrimiento superficial y solubilidad.”

el aire.¹⁰ El mismo estudio muestra que el desecho de residuos conteniendo nanomateriales, en esos mismos laboratorios, con frecuencia se lleva a cabo de forma inapropiada, y que las prácticas de seguridad e higiene son deficitarias en algunos aspectos fundamentales. Existen varias razones para estas carencias, tales como la familiaridad de los investigadores con los nanomateriales, que puede llevar a una subestimación de los riesgos, así como el hecho de que los estudios de toxicidad se centran en la respuesta biológica ante una exposición corta de alta intensidad en lugar de considerar la exposición crónica a bajas concentraciones. Pero quizás el factor más importante sea la falta de límites de exposición válidos para nanopartículas, similares a los habitualmente utilizados para compuestos químicos convencionales (como los valores límite umbral o TLV), lo que dificulta el establecimiento de protocolos de seguridad para ambientes de trabajo. En relación con este punto, en 2006 se enunciaron cinco grandes retos para establecer una Nanotecnología segura.¹¹ Uno de ellos, que aún permanece como un objetivo inalcanzado, se refiere al desarrollo de instrumentos para determinar la exposición a nanomateriales, aunque se han realizado grandes avances en este terreno y ya existen instrumentos comerciales que miden la concentración de nanopartículas en aire. Sin embargo, lo que interesa no es el número total de nanopartículas a las que estamos expuestos, sino el número de ENs con unas características determinadas. La tarea en este sentido es difícil dado que las nanopartículas producidas en los centros de investigación o en la industria a menudo resultan difíciles de distinguir de las ya presentes en el medio ambiente.

A los riesgos para la salud ya señalados hay que añadir el de incendios

y explosiones causados por la alta reactividad de muchos materiales cuando sus dimensiones se reducen a escala nanométrica. A este respecto, el comportamiento más notable es el carácter pirofórico de muchos materiales metálicos, provocando su ignición espontánea en aire cuando sus dimensiones se reducen por debajo de un cierto tamaño. Afortunadamente, en la mayor parte de los casos las cantidades de nanomateriales que se manejan son todavía de pequeña escala, lo que limita las posibles consecuencias de un accidente. Esta situación, sin embargo, está cambiando rápidamente, y ya hay empresas que fabrican nanomateriales



en cantidades de toneladas por año,¹² por lo que las consideraciones de seguridad deberán adaptarse rápidamente a un escenario con un inventario reactivo/explosivo mayor.

Todo lo anterior pone de manifiesto la necesidad de un conocimiento más profundo de los riesgos a los que nos enfrentamos en el manejo de nanomateriales. En ese sentido, el esfuerzo investigador para lograr una Nanotecnología segura ha ido aumentando significativamente. En los EE.UU., a partir del establecimiento de la Iniciativa Nacional en Nanotecnología (NNI) en el año 2000, se han puesto en marcha pro-

10. Balas, F. y cols., *Nature Nanotechnology* 2010, 5, 93.

11. Maynard, A. D. y cols., *Nature* 2006, 444, 267.

12. Schmid, K. y cols. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 2253.

13. Sargent Jr., J. F. "Nanotechnology and Environmental, Health, and Safety: Issues for Consideration" Servicio de Investigación del Congreso. http://assets.opencrs.com/rpts/RL34614_20110120.pdf.

14. http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/ec-nanotechnology-research-mapping_en.pdf

Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

yectos en materia de seguridad, salud y medio ambiente relacionados con la Nanotecnología que, para el año 2011, se estiman en 117 MM\$, lo que supondrá cerca del 7% del presupuesto para ese año de la NNI.¹³ Por su parte, la Comisión Europea ha financiado más de treinta proyectos a diferente escala en los programas marco FP6 y FP7, dedicados a salud, seguridad y medio ambiente, relacionados con la Nanotecnología.¹⁴ La inversión propuesta para este año 2011 en este campo ronda los 150 MM€.

En la Universidad de Zaragoza, dentro del Instituto de Nanociencia de Aragón y el CIBER-BBN, investigamos en el desarrollo de métodos para la monitorización y control de nanomateriales en el ambiente siguiendo dos líneas de trabajo principales: por un lado, se estudia el marcaje de ENs, para distinguirlos de las nanopartículas presentes en el ambiente, un problema que se ve complicado por el hecho de que

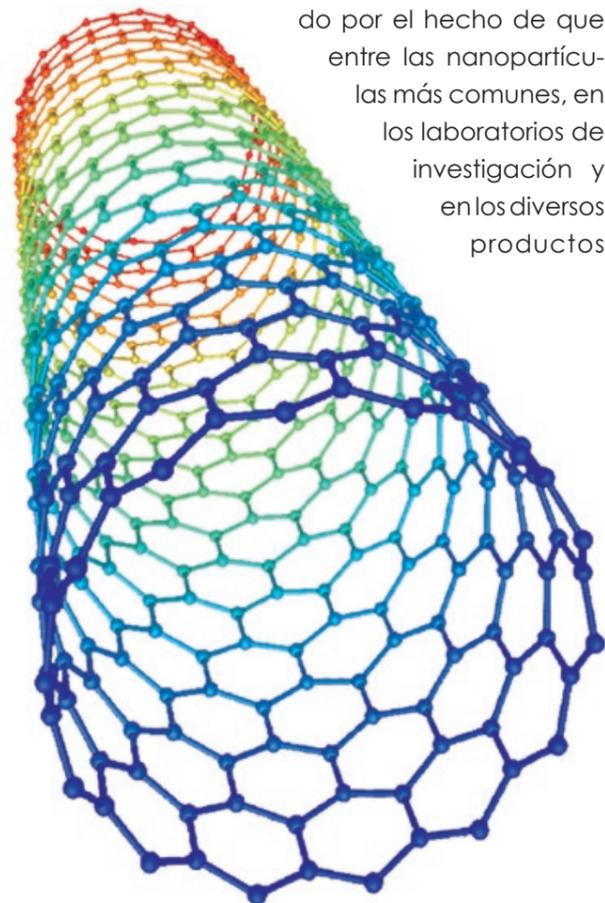
entre las nanopartículas más comunes, en los laboratorios de investigación y en los diversos productos

nanotecnológicos que se comercializan, están algunas de las más frecuentes en el medio ambiente, tales como el óxido de titanio o el óxido de silicio. Por otro lado, estudiamos los procesos de formación de aerosoles nanoparticulados y el comportamiento en cuanto a su dispersión en recintos cerrados. Para investigar estos aerosoles, se han puesto a punto instalaciones específicas que permiten realizar la dispersión de nanopartículas de forma segura, y facilitan la captura y eliminación posterior de los aerosoles formados.

En resumen, el esfuerzo investigador en nanoseguridad es clave para el desarrollo de la nanotecnología. Lejos de impedir el progreso de las tecnologías asociadas a los nanomateriales, pretende establecer métodos para que este progreso se lleve a cabo con respeto a la salud y la seguridad de los trabajadores, el público y el medio ambiente. Mientras no exista información específica sobre las características de peligrosidad de un determinado tipo de nanomateriales debe aplicarse el principio de precaución (es decir, considerarlo como si fuese un material peligroso), minimizando su manejo en seco y evitando su dispersión mediante el encerramiento de las operaciones, de acuerdo con lo que recomiendan las principales instituciones en este campo.^{15,16} Debemos conseguir que, tal y como se vaticina, la Nanotecnología se convierta en la próxima revolución industrial pero que, a diferencia de revoluciones tecnológicas anteriores, lo consiga con el mayor respeto a la seguridad, la salud y el medio ambiente.

Francisco Balas y Jesús Santamaría
Instituto de Nanociencia de Aragón
Universidad de Zaragoza

Centro de Investigación Biomédica en Red
en Bioingeniería, Biomateriales y
Nanomedicina.



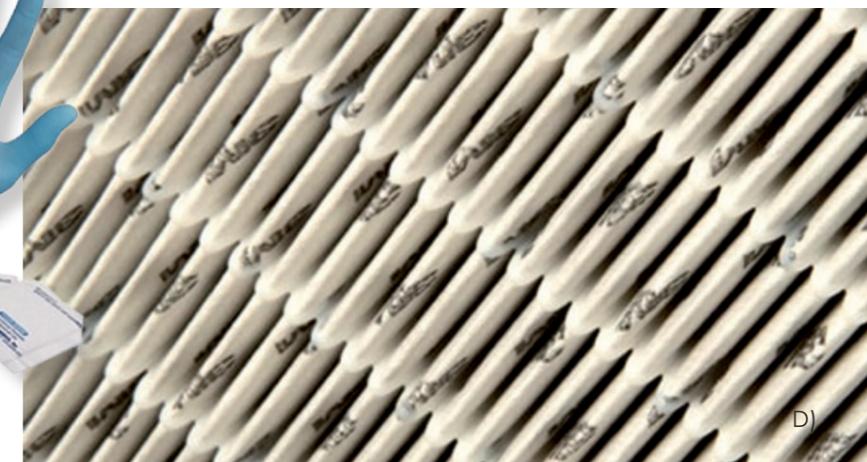
Una de las líneas de trabajo en el INA se centra en investigaciones sobre el manejo seguro de nanomateriales, incluyendo estudios de dispersión de aerosoles nanoparticulados.

A) cámara de dispersión de nanopartículas, la caracterización de los nanomateriales.

B) microscopio UHRTEM, o la idoneidad de elementos de protección personal y general para su uso con nanomateriales.

C) máscaras y guantes para trabajo con nanopartículas.

D) estructura de un filtro HEPA para una campana de laboratorio.



15. Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks "The Appropriateness of the Risk Assessment Methodology in Accordance with the Technical Guidance Documents for New and Existing Substances for Assessing the Risks of Nanomaterials" (European Commission, 2007).
16. National Institute of Occupational Safety and Health "Approaches to Safe Nanotechnology" (NIOSH, 2009).



**ALGUNAS REFLEXIONES
ALREDEDOR DE
NUESTRA QUÍMICA**

2011 es el Año Internacional de la Química, la celebración a nivel mundial de los importantes logros de la Química en nuestra sociedad a lo largo de su historia, así como de su decisiva contribución al bienestar de la Humanidad.

POR JOSÉ ELGUERO

Splash, Expo Zaragoza 2008.

**Foto por Gianluca Giaccone (www.flickr.com)*

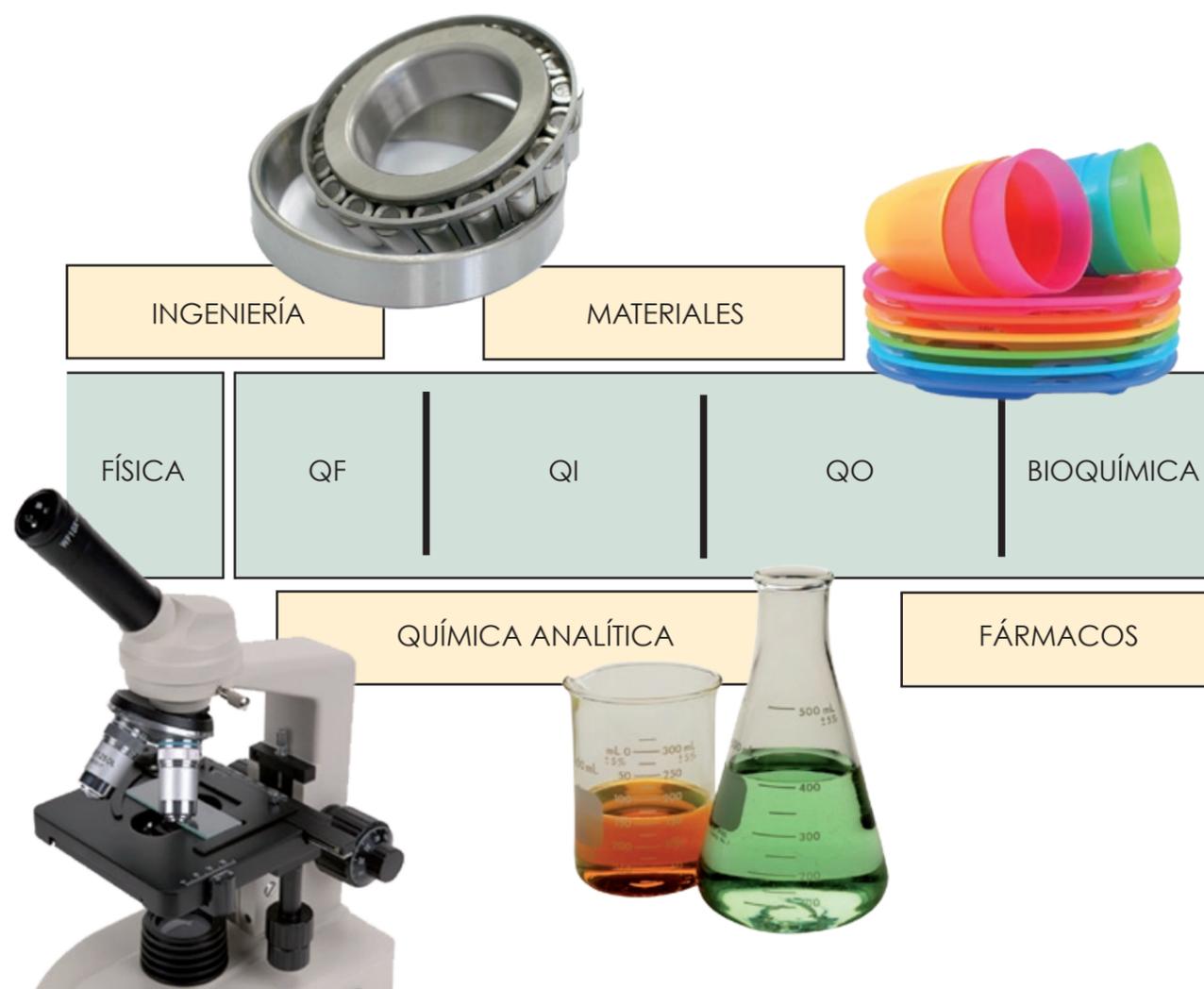
Algunas reflexiones alrededor de nuestra Química

La declaración de 2011 como Año Internacional de la Química es una iniciativa de la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) y la UNESCO, y fue decretada por la Asamblea General de Naciones Unidas el 30 de diciembre de 2008. Bajo el Lema "Chemistry: our life, our future", los objetivos de esta conmemoración son: incrementar la apreciación pública de la Química como herramienta fundamental para satisfacer las necesidades de la sociedad, promover el interés por la Química entre los jóvenes y generar entusiasmo por el futuro creativo de la Química. El año 2011 coincide con el centenario del Premio Nobel de Química otorgado a Marie Curie y de la fundación de la Asociación Internacional de Sociedades Químicas. La conmemoración

resaltará la contribución de la Química como ciencia creativa esencial para mejorar la sostenibilidad de nuestros modos de vida y para resolver los problemas globales y esenciales de la Humanidad, como la alimentación, el agua, la salud, la energía o el transporte.

Con dicho motivo voy a exponer algunas reflexiones entorno a la Química usando como ejemplos nuestros trabajos.

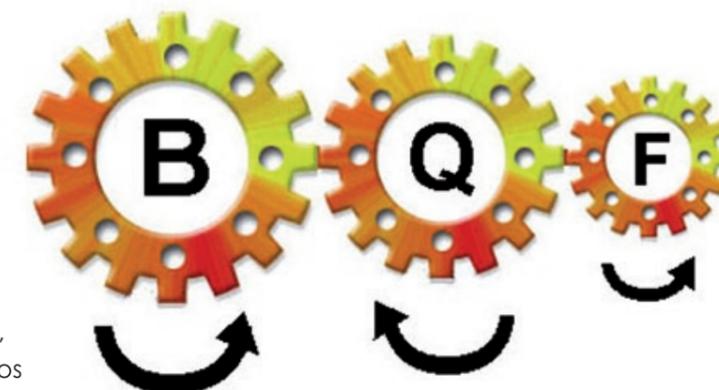
Cuando se examina la posición de la Química en el conjunto de la Ciencia, la situación es demasiado complicada para ser representada en dos dimensiones. Si, al precio de muchas simplificaciones, intentamos hacerlo llegamos a algo como lo representado en el gráfico (QF, QI y QO: Química Física, Química Inorgánica y Química Orgánica).



¿A QUÉ SE DEBE LA CRISIS QUE ATRAVIESA LA QUÍMICA?

La posición de la Química entre la Física y la Biología se puede representar como tres ruedas engranadas.

Para que el mecanismo funcione bien, el tamaño y la velocidad angular de los engranajes deben ser los adecuados dado que no son independientes. La rueda de la Biología es grande y gira muy despacio. La de la Física es pequeña y gira deprisa pero es muy sólida, de acero. La de la Química es grande pero lenta y blanda, de latón. ¿Qué pasa? ¿Que se está rompiendo.



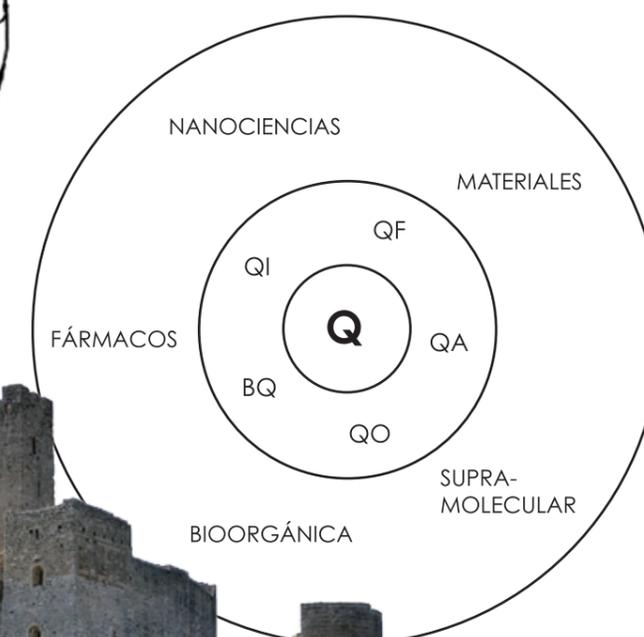
Nuestro trabajo se sitúa en el corazón de la Química. Hemos hecho incursiones a sus fronteras para conocerlas, pero ahora nos encontramos algo alejados de las aplicaciones que son como las murallas exteriores del castillo.

Es curioso, pero las fortificaciones exteriores son más sólidas que la "torre del homenaje". Pero ¿qué pasaría si la Química se quedara sin su corazón? ¿si el fruto se pudiese desde el interior?

La poderosa "American Chemical Society" está evaluando la propuesta radical de reemplazar la palabra "chemical" por otras, como "molecu-



"I'm on the verge of a major breakthrough, but I'm also at that point where chemistry leaves off and physics begins, so I'll have to drop the whole thing."



La Química, una fortaleza.

*Foto por Gianluca ashitakka (www.flickr.com)

Algunas reflexiones alrededor de nuestra Química

lar sciences", al constatar que muchos de sus miembros, cuando se les pregunta por su profesión, no contestan: *químicos* (eso ha ocurrido con muchos premios Nobel de ¡Química!).

¿Por qué? Es obvio que es mucho más fácil conseguir recursos, becas, publicar en buenas revistas, trabajando en la periferia de la Química que en su centro.

Si comparamos una publicación actual a una de las que se escribían hace cincuenta años, una cosa es evidente: **las aplicaciones como justificación del trabajo**. Los trabajos científicos, al menos los de Química, siguen unas pautas bien definidas, en cierta medida se parecen todos. Antiguamente, en la parte inicial de la publicación (**introducción**) se justificaba el trabajo realizado por su novedad, por corregir un error, por completar un aspecto olvidado, por lo sorprendente del resultado obtenido (eso aún ocurre en Química de Coordinación). Hoy, al menos en su rama más consolidada, la Química Orgánica, eso ya no es así.

Hoy, la inmensa mayoría de los trabajos empiezan explicando lo interesantes que son **por sus posibles aplicaciones** (medicamentos y materiales). Yo creo que es un error grave (aunque yo haga a veces lo mismo, qué remedio). Se trata de un ejemplo de alienación (RAE: "Proceso mediante el cual el individuo o una *colectividad* transforman su conciencia hasta hacerla contradictoria con lo que debía esperarse de su condición").

"Hoy, la inmensa mayoría de los trabajos empiezan explicando lo interesantes que son por sus posibles aplicaciones. Yo creo que es un error grave. Se trata de un ejemplo de alienación."

Cuando leo (como censor) una publicación, o cuando escucho una conferencia, me sorprende que cada autor diga que el campo en el que trabaja es el más importante y que representa más de un tercio del total de su disciplina. En Marsella, donde trabajé unos años, transcurre una película muy célebre, Mario de Marcel Pagnol. He aquí un corto diálogo entre César, el dueño del bar, y Mario su joven empleado (y enamorado de su hija):

- César: *Y bien, por décima vez te voy a explicar el Picón-limón-curaçao. ¡Acércate! Pones primero un tercio de curaçao. Pero ten cuidado: un tercio pequeñito. Bueno. Ahora un tercio de limón. Un poco más grande. Bueno. Luego un BUEN tercio de Amer Picón. Mira el color. Fíjate qué bonito es. Y al final, un GRAN tercio de agua. Ya está.*

- Mario: *Eso hace cuatro tercios.*

- Cesar: *Exactamente. Espero que esta vez lo hayas comprendido.*

- Mario: *En un vaso, no hay más que tres tercios.*

- César: *Pero imbécil, ¿eso depende del tamaño de los tercios!*

- Mario: *Pues no, no depende de eso. Incluso en una regadera solo se pueden poner tres tercios.*

- César (triumfante): *Entonces, ¿explícame como he puesto cuatro en este vaso!*

- Mario: *Eso es Aritmética.*

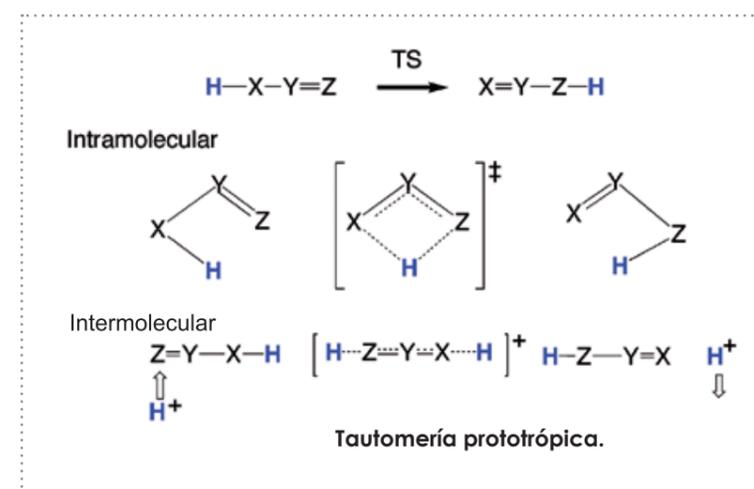
Tratemos de ser más modestos y, a la vez, más realistas. ¿Es tan importante lo que hacemos? En parte, la culpa es de las revistas y de sus censores que exigen introducciones grandilocuentes.

NUESTRAS INVESTIGACIONES

La tautomería: un ensayo de racionalidad.

En 1976 escribimos entre cuatro autores un libro que es nuestra publicación más citada. Ello me va a dar pie a una reflexión sobre la metodología de la Química. Poincaré ha escrito en *La ciencia y la hipótesis* (Austral, 1945) lo siguiente: "Gracias a la generalización, cada hecho observado nos permite prever un gran número; únicamente no debemos olvidar que solo el primero es cierto y que todos los demás son solo probables. ... Pero la probabilidad es a menudo bastante grande para que prácticamente podamos contentarnos con ello. **Vale más prever sin certeza que no prever nada**".

La tautomería prototrópica es una reacción química sencilla que puede transcurrir por un proceso intra- o intermolecular.



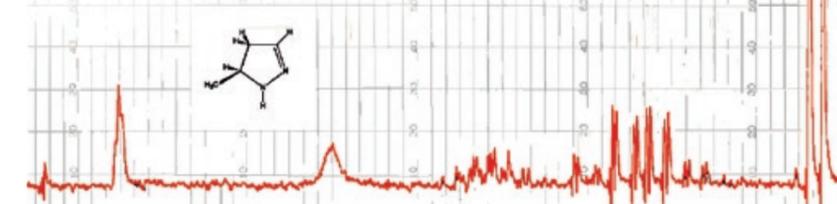
Si nosotros pudimos hacer una contribución significativa a la tautomería de los heterociclos aromáticos se debe a que nuestros trabajos coincidieron con la llegada a Montpellier de un espectrómetro de Resonancia Magnética Nuclear (RMN), y con el hecho afortunado de que la "ventana" de la RMN clásica, aún siendo muy estrecha, corresponde a unas energías de activación para los procesos prototrópicos que son "visibles" desde esa ventana.

Recordemos que la RMN fue descubierta por Felix Bloch y Edward Mills Purcell en **1946** por lo cual les fué concedido el Premio Nobel de Física en **1952** (¡solo 6 años después!). El primer espectro de un compuesto orgánico, el etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$, naturalmente de ^1H) fue obtenido por Jim Arnold, Martin Packard y Shrinivas Sharmati en **1951**.

Los primeros espectrómetros comerciales (Varian HR-30, 30 MHz) salieron al mercado en **1952** gracias a Russell Varian y, a continuación, en **1955** se comercializó el Varian HR-40 (40 MHz). El primer libro apareció en **1959** *Applications of NMR Spectroscopy in Organic Chemistry* (Lloyd M. Jackman). En fin, el año **1961** llegó a Montpellier el Varian V-4311 (^1H 56,4 MHz). Podemos observar un espectro de aquella época (como se puede ver la resolución es francamente buena).



Primer espectro de RMN de Etanol.

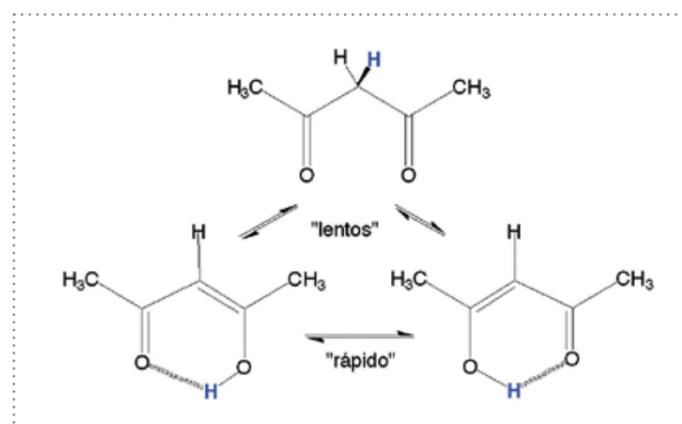


Un espectro de RMN del año 1961.

Algunas reflexiones alrededor de nuestra Química

La segunda gran revolución fue la introducción de la transformada de Fourier gracias a los trabajos de Richard R. Ernst⁸ en **1969** (Premio Nobel de Química, **1991**) que hizo posible el estudio de núcleos poco abundantes como el ¹³C y el ¹⁵N. El primer ejemplo (**1953**) de aplicación de la RMN de ¹H a la tautomería se debe a James N. Shoolery de la casa Varian y concierne a la acetilacetona. Nuestro primer trabajo de RMN y tautomería es el "Etude des diazoles par les spectres de Resonance Magnétique Nucleaire - Résultats préliminaires. E. Arnal, J. Elguero, R. Jacquier, *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **1961**, 1710".

Solo los aspectos lentos son fáciles de estudiar por RMN de ¹H a temperatura ambiente. Como regla sencilla, son lentos los procesos que implican ruptura o creación de enlaces C-H y rápidos los que implican ruptura o creación de enlaces X-H, siendo X un heteroátomo,



Estudio de tautomería de la Acetilacetona.

generalmente O ó N. En el caso de la acetilacetona, el equilibrio entre la forma diceto y la forma cetoenol se puede determinar por simple integración de las señales de RMN de ¹H. Por el contrario, el proceso de interconversión entre los dos cetoenoles (es igual que sean idénticos como en este caso) es muy rápido. Solo pudimos estudiarlo en **2005**.¹

En la tabla se muestran algunos datos relevantes para el uso de la RMN en estudios de tautomería.

Para muchos historiadores de la Ciencia, los progresos no se deben tanto a los científicos y a sus ideas sino a la introducción de nuevos instrumentos. Sin caer en el error de los cuatro tercios, sí que me parece que las técnicas instrumentales han jugado un enorme y no siempre reconocido papel en el avance de la Ciencia: imaginemos las consecuencias que sobre nuestro trabajo actual tendría la no-existencia

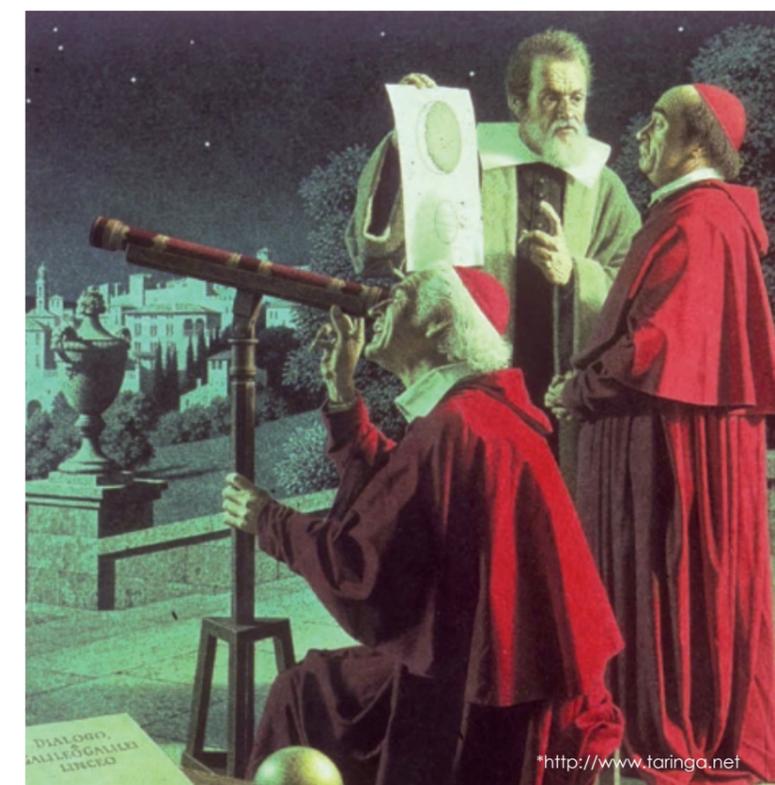
“Las técnicas instrumentales han jugado un enorme y no siempre reconocido papel en el avance de la Ciencia”

Separación de isómeros	Equilibrio en solución	Fenómeno	ΔG^\ddagger kJ mol ⁻¹	k s ⁻¹	t s	Ejemplos
Se pueden separar	No	1. Isomería	> 170	< 10 ⁷	> 10 ⁷	Cis-trans
	Lento	2. Equilibrio	85-170	10-10 ⁻⁷	10 ⁻¹ -10 ⁷	Syn-anti
No se pueden separar	Rápido $\Delta G^\ddagger < 125$ kJ mol ⁻¹	3. Señales finas en RMN a 500 K	> 85	< 10	> 10 ⁻¹	Ceto-enol
		4. Coalescencia	40-105	10 ⁴ -10	10 ⁻⁴ -10 ⁻¹	Inversión del nitrógeno
		5. Señales finas promedio en RMN a 150 K	< 40	> 10 ⁴	< 10 ⁻⁴	Enol-enol

de la RMN. Impensable ¿verdad? Y ¿sin espectrometría de masas, HPLC, cristalografía de rayos X, STM, AFM, ...? ¿Qué tendría consecuencias más negativas, que Galileo no hubiese nacido o que no se hubiera descubierto el telescopio? Para nosotros, estudiosos de la tautomería, la llegada del primer aparato de RMN, aunque fuese un modesto 56,4 MHz y no un 1000 MHz como los que ya existen, fue una verdadera revolución.

El 3,5-dimetilpirazol (dmpz) y la transferencia de protones en estado cristalino (SSPT)

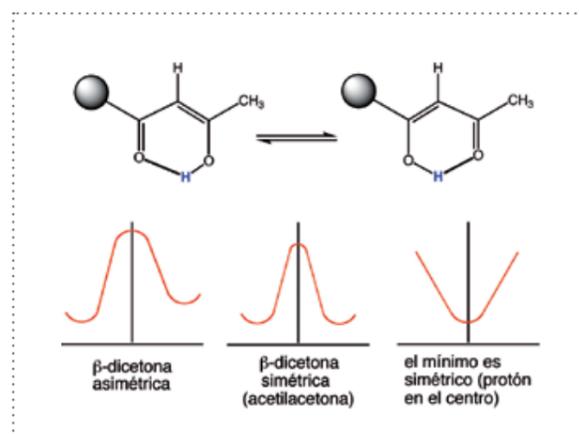
¿Qué ocurre cuando un compuesto que existe en dos o más formas tautómeras cristaliza? Hay dos casos que considerar según que la transferencia del protón (el



1. Solid-State NMR Study of the Tautomerism of Acetylacetone Included in a Host Matrix. Dedicated to Professor Rolf Huisgen on the occasion of his 85th birthday. Claramunt R. M., López C., Lott S., Santa María M. D., Alkorta I., Elguero J., *Helv. Chim. Acta* 2005, 88, 1931.

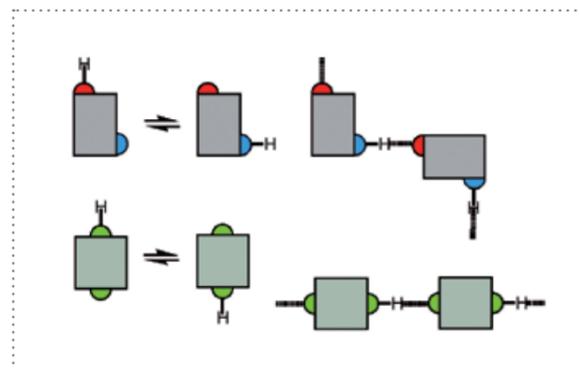
Algunas reflexiones alrededor de nuestra Química

camino que conecta los dos tautómeros) tenga lugar por vía intra- o intermolecular. Un ejemplo de situación intramolecular es el de una β -dicetona asimétrica.



Perfil energético del equilibrio ceto-enol.

El problema no es solo qué tautómero cristaliza sino dónde se encuentra el protón. La curva de potencial correspondiente puede tener tres tipos de perfil: a) doble pozo asimétrico (caso de la benzilacetona-1-fenil-1,3-butanodiona -); b) doble pozo simétrico (caso de la acetilacetona - 2,4-pentanodiona -); c) pozo único (caso del dibenzilmetano-1,3-difenil-1,3-propanodiona -). En los dos primeros casos, además de la barrera "clásica" (Arrhenius) existe efecto túnel ("cuántico").



Propuesta de mecanismos del transporte.

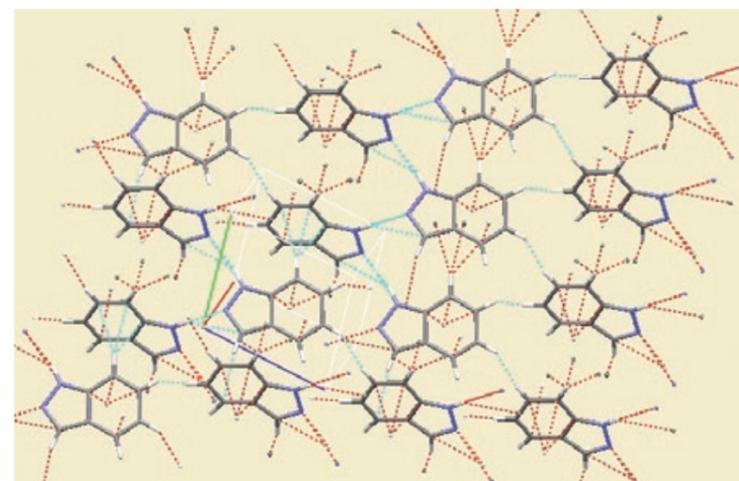
Si el sitio de donde parte el protón está alejado del sitio al que llega, el transporte necesita un vehículo, generalmente el disolvente u otra molécula (proceso intermolecular).

Los compuestos tautómeros, como los demás compuestos, pueden presentar **polimorfismo** (un compuesto puro y su solvato son **pseudo-polimorfos**) pero además **desmotropía**. Este término, de origen alemán, indica un compuesto que cristaliza en dos tautómeros diferentes (no se conoce ningún ejemplo de un compuesto que cristalice en tres o más tautómeros). No debe usarse desmotropía para describir cristales que contengan dos tautómeros, generalmente en una proporción 1:1. La transformación de un tautómero en otro en estado sólido es un ejemplo de **desmotropía dinámica**. Aunque lo más frecuente es que cada compuesto cristalice en una forma única, los demás fenómenos son cada vez más abundantes, sobre todo si el compuesto es importante, como un fármaco, ya que se estudia con sumo cuidado su cristalización.

Cuenta Jack D. Dunitz (con Georges M. Whitesides, una de las personas que se merecen más el Premio Nobel que muchos laureados) que, una vez, el gran Leopold Ruzicka (Premio Nobel de Química, 1939) le dijo "un cristal es un cementerio químico". Sabemos que entendía por ello largas columnas de moléculas, interrelacionadas en una disposición rígidamente geométrica, sin vida comparadas con las

"La transferencia de un protón entre dos moléculas es una reacción química, aunque muy elemental."

Difractograma de Rayos-X.



mazurcas moleculares que bailan las moléculas en solución. Es un punto de vista que probablemente comparten muchos químicos y quizás algún cristalógrafo. No debería ser así, ya que, en 1913, solo unos pocos meses después del descubrimiento de la difracción de rayos X, Peter Debye (Premio Nobel de Química 1936) demostró que al aumentar la temperatura aumenta la vibración de los átomos alrededor de sus posiciones promedias.

En lo que se refiere a aspectos dinámicos en general, los movimientos moleculares en cristales corresponden a cambios confor-

macionales, raramente a reacciones químicas reversibles. La transferencia de un protón entre dos moléculas **es una reacción química**, aunque muy elemental. Es decir, se producen rupturas y creaciones de enlaces.

¿Pueden ocurrir reacciones sin destruir la red cristalina? En 1985 descubrimos un ejemplo de reacción química en un cristal de **dmpz**.² En 1982, Ernst había estudiado por RMN en estado sólido

un proceso similar en los dímeros del ácido benzoico.³

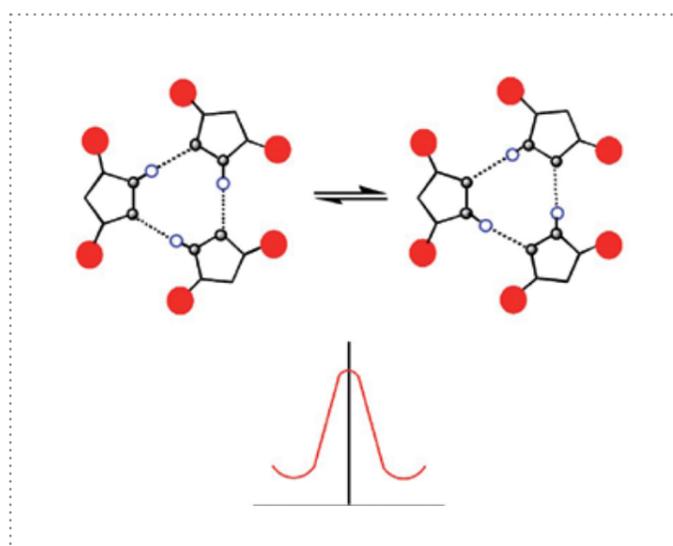
2. Dynamic intermolecular tautomerism of 3,5-dimethylpyrazole in the solid state by ^{13}C CP/MAS NMR Spectroscopy and X-Ray crystallography. Baldy A., Elguero J., Faure R., Pierrot M. and Vincent E.-J., J. Am. Chem. Soc. 1985, 107, 5290.
3. Structure and dynamics of intramolecular hydrogen bonds in carboxylic acid dimers: A solid state NMR study. Meier B. H., Graf F., Ernst R.R., J. Chem. Phys. 1982, 76, 767.



Algunas reflexiones alrededor de nuestra Química

El 3,5-dimetilpirazol, **dmpz**, cristaliza formando trímeros con los tres protones de los grupos N-H (N: círculo gris, H: círculo azul) intercambiándose entre los seis átomos de nitrógeno.

Es un proceso oscilante que se parece al mecanismo de un antiguo reloj de bolsillo: el volante es el equivalente del péndulo y, en un reloj de bolsillo, oscila con una frecuencia de 21,5 Hz o 18.000 medios ciclos por hora, es decir 5 s^{-1} . El **dmpz** intercambia sus tres protones 1000 veces por segundo, es decir, 200 veces más deprisa. El volante de un reloj está hecho de una aleación (invar, inventada por Charles Edouard Guillaume, Premio Nobel de Física, 1920) con un coeficiente de dilatación muy pequeño, por lo que su movimiento es muy poco sensible a la temperatura. En cambio el "reloj" del **dmpz** es muy sensible a la temperatura: cuanto más caliente más rápido (por lo tanto, no es un buen reloj ni un buen termómetro). Un



Perfil energético del dmpz.

reloj suizo funcionando 50 años ha experimentado 4.000.000.000 oscilaciones. El cristal de **dmpz** de 1984: 320.000.000.000 de reacciones químicas: ¡80 veces más!

Modelos empíricos y cálculos teóricos: la predicción de las propiedades.

Dado que hay muchísimas más moléculas posibles que partículas elementales en el Universo, la Humanidad, **antes de extinguirse**, solo podrá sintetizar un número ínfimo de todas las posibles. La elección de las moléculas a sintetizar es, pues, un problema fundamental para la Humanidad (¿qué **secretos esconderán para siempre aquellas que nunca lleguemos a preparar?**). Las nuevas moléculas deben tener propiedades físicas, biológicas o estéticas (si no, ¿cómo explicar los esfuerzos realizados para sintetizar el bello pero inútil dodecaedro?) que nos sirvan o nos plazcan.

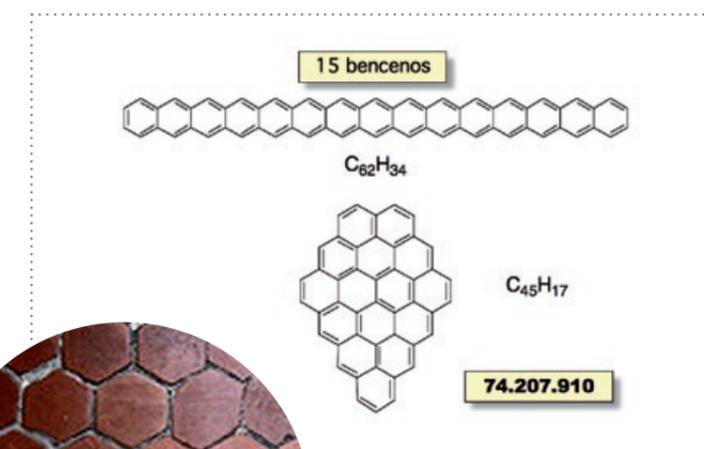
Pero, ¿cuántas moléculas parecidas existen? Un ejemplo sencillo ilustrará la magnitud del problema. ¿Cuántas moléculas

formadas por 15 bencenos existen? Pueden recortar 15 hexágonos y empezar a ordenarlos de diferentes maneras e ir contando cuántas ordenaciones diferentes les salen, desde ponerlos en línea hasta ponerlos como si fuera el suelo de su casa. Si construyen una cada segundo (¡ya es ir rápido!), necesitarán entre 2 y tres años trabajando día y noche, pues hay 74.207.910 posibilidades (que no isómeros).

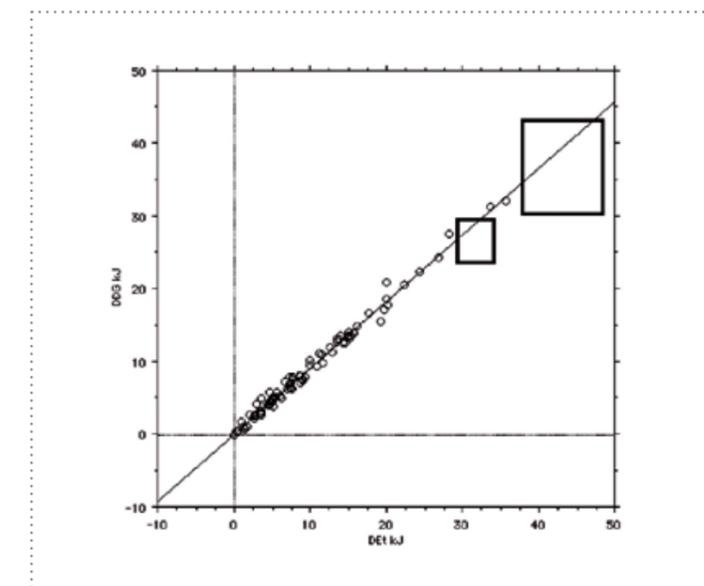
Necesitamos imperiosamente desarrollar métodos de predicción de propiedades moleculares de cualquier tipo que sean. Hoy en día, disponemos de dos métodos que se pueden combinar. El clásico, que usa modelos de energía libre (LFER, QSAR,...), y el cuántico.

El primero, que ha gozado de una enorme popularidad (Hammett, Taft, Charton, Kamlet, Hansch, ...), funciona muy bien para la interpolación (cuadrado interior) y bastante peor para la extrapolación (cuadrado exterior). Sigue siendo importante en problemas complejos, como la caracterización de explosivos (velocidad y presión de detonación) donde el uso de la ecuación de Kamlet-Jacobs es de gran utilidad.

El segundo, que se ha beneficiado del extraordinario progreso de los métodos DFT, está por su propia naturaleza destinado a caracterizar una molécula aislada o un "cluster" de moléculas, no a predecir cómo varía una propiedad si se modifica ligeramente la



Moléculas de bencenos (arriba).
Detalle de un suelo real basado en baldosas hexagonales.

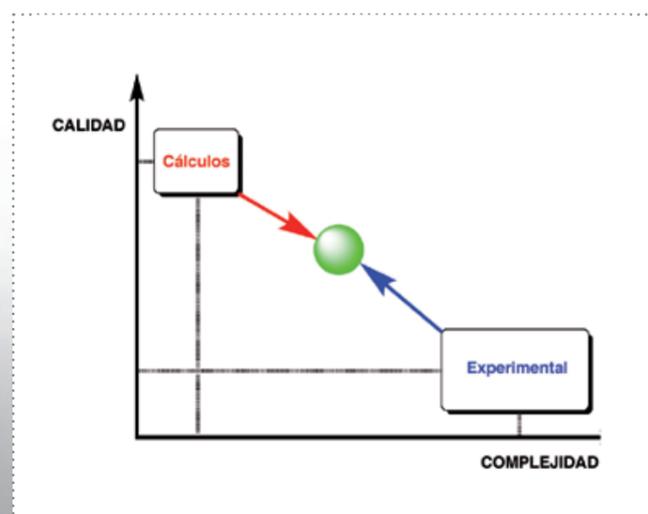


"Interpolación es más fácil que extrapolación."

"La elección de las moléculas a sintetizar es, pues, un problema fundamental para la Humanidad."



Algunas reflexiones alrededor de nuestra Química



"Calidad frente a complejidad".

molécula. Aún hoy, hay que hacer compromisos entre tamaño de la molécula y calidad del cálculo: hay que acercar lo calculable a lo experimental.

Es indudable que los cálculos teóricos crecen y los modelos empíricos decrecen, pero en 2011 aún son de gran utilidad para predecir aproximadamente las propiedades de una gran cantidad de moléculas.

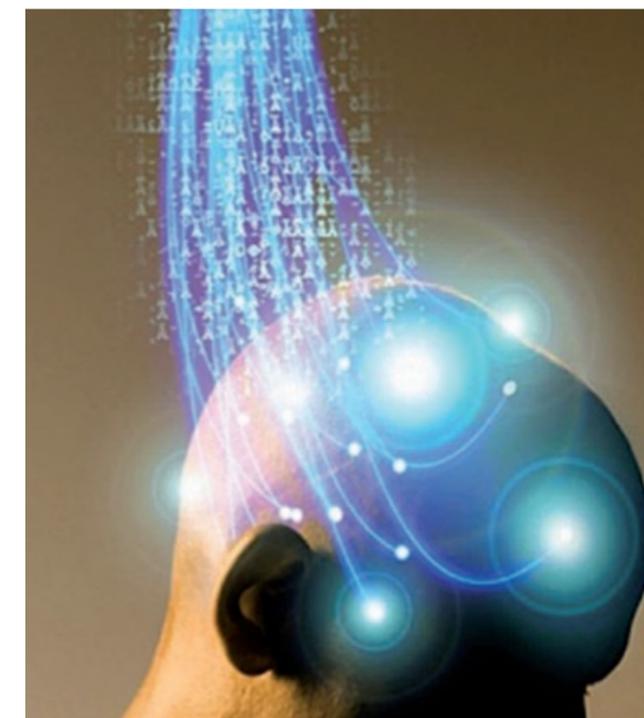
CONCLUSIÓN

La historiadora francesa de la Ciencia, Bernardette Bensaude-Vincent, ha escrito que no es cierto que la "Edad de Oro" de la Química pertenezca a un pasado lejano. Estamos viviendo una nueva fase de la eter-

na lucha de la Química con sus ciencias vecinas, especialmente Física y Ciencias de la Vida. Tenemos nuevas ambiciones, queremos emular la naturaleza, no como en el siglo XIX preparando productos naturales en el laboratorio, sino realmente reproduciendo los procesos naturales. George Whitesides ha escrito "La naturaleza de la célula es totalmente un problema molecular. No tiene nada que ver con la Biología". Queremos y podremos crear organismos mixtos, tales como cerebros, en parte biológicos, en parte basados en componentes electrónicos de silicio. Lo que nos espera a los químicos es un mundo apasionante basado en la comprensión molecular de la vida y del pensamiento pero con la capacidad de ir más allá.

No quiero concluir este texto sin elevar su nivel. Para ello he elegido unas frases de D. Santiago escritas hace unos cien años.

"¿Esto que yo hago, a quién importa aquí? ¿A quién contaré el gozo que mi pequeño descubrimiento me produce, que no se ría desdeñosamente o no se mueva a compasión irritante? Si triunfo ¿quién aplaudirá en torno mío?, y si me equivoco ¿quién me corregirá y me dará alientos para proseguir? ... Consideremos además que todo hombre puede ser, si se lo propone, el escultor de su propio cerebro".



"Por encima de la abeja está el enjambre. Poco importa mi persona. Tengo plena convicción de mi caducidad. Con todo esto quisiera tener el consuelo de caer en el surco recién abierto, no cual piedra inerte, sino cual semilla viva".

Queridos lectores de conCIENCIAS: que la Facultad de Ciencias de Zaragoza sea el enjambre donde tu labor se engrandezca, donde tus trabajos perduren más allá de toda caducidad.

José Elguero

Instituto de Química Médica
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

qambe17@iqm.csic.es

Construyendo...

*...el Espacio Europeo
de Educación Superior*



¡matricúlate!

Grado en Biotecnología

Grado en Física

Grado en Geología

Grado en Matemáticas

Grado en Óptica y Optometría

Grado en Química

GRADOS



Máster en Biología Molecular y Celular

Máster en Física y Tecnologías Físicas

Máster en Iniciación a la Investigación en Geología

**Máster en Iniciación a la Investigación
en Matemáticas**

Máster en Investigación Química

**Máster en Materiales Nanoestructurados para
Aplicaciones Nanotecnológicas**

**Máster en Modelización Matemática, Estadística
y Computación**

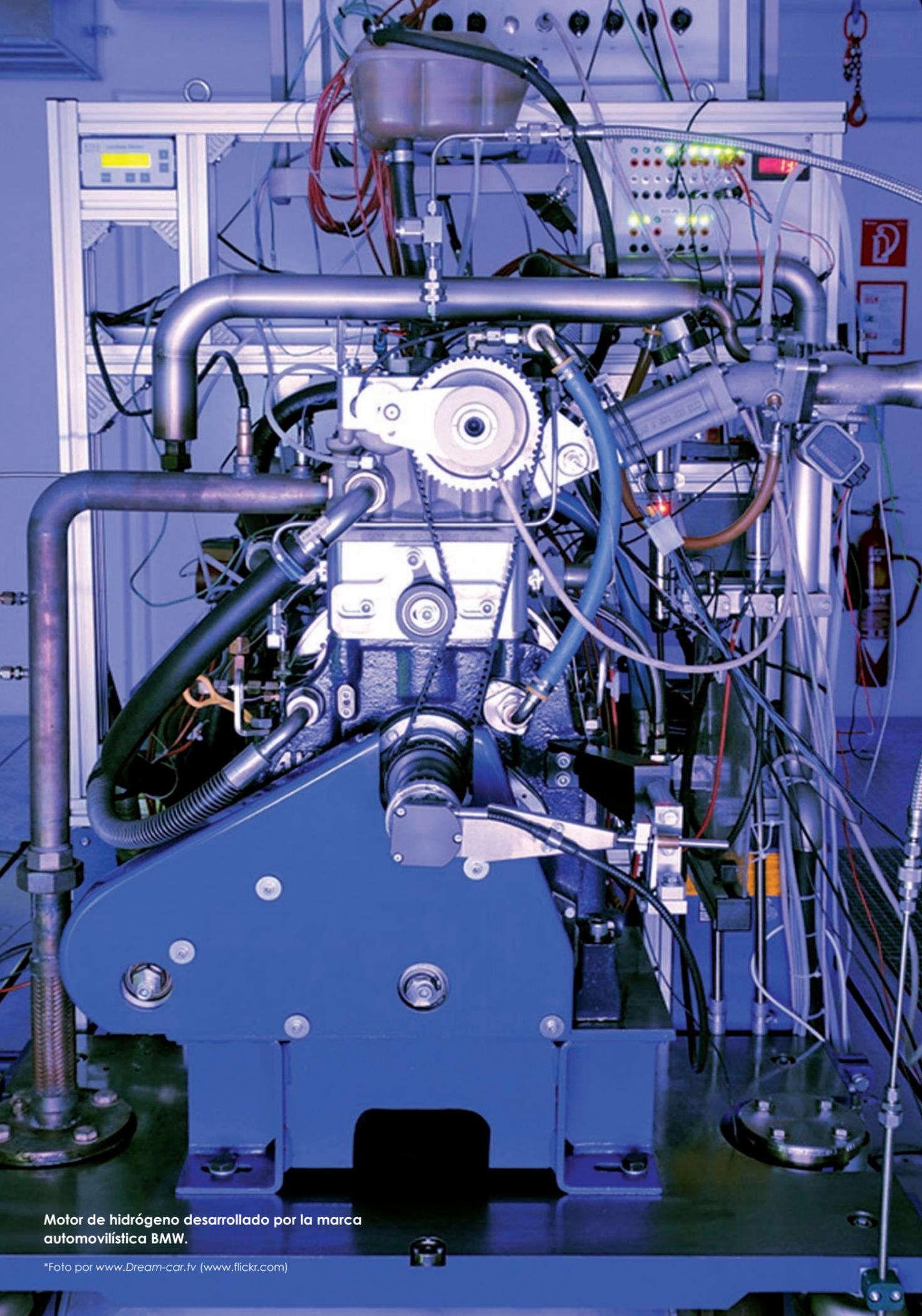
Máster en Química Sostenible

MÁSTERES



<http://ciencias.unizar.es/web/>





EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

“El hidrógeno se postula como un combustible sintético que puede reemplazar al petróleo debido, en gran parte, a que su combustión no comporta emisión de óxidos carbonosos o nitrosos que afecten al medio ambiente.”

POR VÍCTOR M. ORERA

Motor de hidrógeno desarrollado por la marca automovilística BMW.

*Foto por www.Dream-car.tv (www.flickr.com)

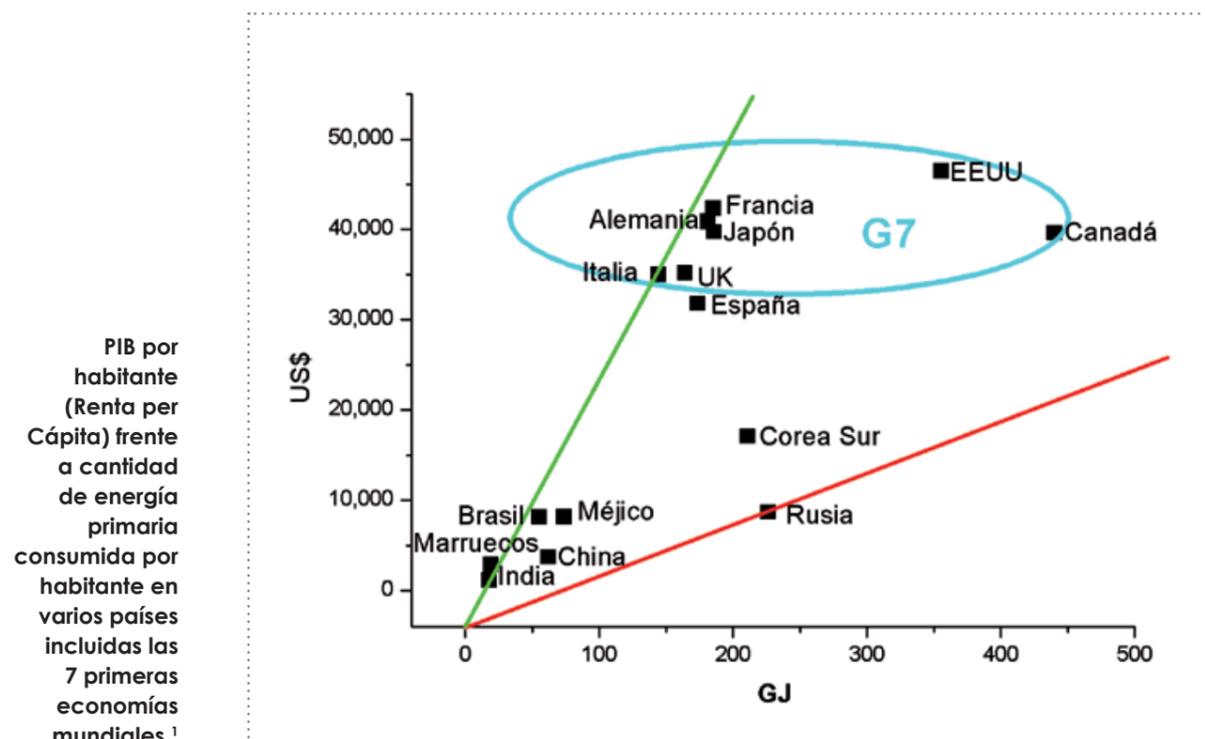
El hidrógeno como combustible

El hidrógeno se postula como un combustible sintético que puede reemplazar al petróleo debido, en gran parte, a que su combustión, ya sea térmica en una caldera o en un motor de combustión interna o mediante oxidación electroquímica en una Pila de Combustible, no comporta emisión de óxidos carbonosos o nitrosos que afecten al medio ambiente. Por otra parte, este combustible puede ser producido mediante procedimientos "limpios" a partir de electricidad procedente de sistemas renovables, o incluso de la energía nuclear. A pesar de que persisten graves problemas asociados a la producción y almacenamiento del hidrógeno aún no resueltos de forma satisfactoria, la mayor parte de las compañías automovilísticas han fabricado prototipos de automóviles movidos con hidrógeno de cara a su próxima comercialización. Siempre manteniendo en perspectiva la opción de los vehículos totalmente eléctricos e híbridos, que constituyen una fortísima competencia al vehículo de hidrógeno debido, en parte, a los

espectaculares avances recientes en la tecnología de las baterías de litio. A continuación, se discuten algunos aspectos relacionados con la utilización del hidrógeno como combustible.

EL PROBLEMA DE LA ENERGÍA

Desde que el hombre aprende a dominar el fuego, la utilización de los recursos energéticos ha estado íntimamente ligada al incremento de su calidad de vida y al de su desarrollo tecnológico. De hecho se puede establecer, tal como se presenta en la figura, una correlación entre el Producto Interior Bruto, PIB, y el consumo de energía primaria por habitante. Aunque con una dispar "eficiencia energética" entre las diversas regiones del planeta, de los datos de la figura se deduce una proporcionalidad entre riqueza y consumo de energía. La máxima intensidad energética, definida como la energía utilizada en la creación de riqueza y obtenida como el cociente entre energía consumida y unidad de PIB generados en cada país, está en torno a los



4-5.5 MJ/\$ en la Unión Europea y en los países con economías emergentes. Las sociedades menos eficientes energéticamente son Rusia (26MJ/\$), seguida de Canadá, Corea y China, quedando EEUU en un término intermedio en cuanto a eficiencia energética se refiere.

En concreto, los 6.614 millones de seres humanos que vivíamos en este planeta en el año 2007 consumimos unos 510 x 10⁹ GJ, es decir, unos 12.000 millones de toneladas equivalentes de petróleo, de energía primaria, lo que equivale a unos 77 GJ de energía por persona y año.

El mayor problema de este ingente consumo radica en el hecho de que el 87.5% de la energía utilizada tiene origen fósil, es decir, procede del petróleo, carbón y gas natural. Además, el incremento anual de la población mundial en unos 80 millones de personas y el crecimiento económico de los países en desarrollo generan un incremento de más del 2.5% anual en las necesidades energéticas. Nuestra avidez de combustibles fósiles es tal que, a pesar de que el precio del petróleo se ha incrementado en casi un factor 10 desde 11 \$/barril en 1998 a 100\$/barril en 2008, el consumo sigue creciendo a una tasa interanual del 1%. Este crecimiento es aún mayor en el caso del gas natural, 3.1% por año, y de casi un 5% anual en el del carbón.²

Dicho incremento produce una creciente presión sobre las reservas de combustibles fósiles, que se traduce en tensiones políticas e inestabilidad económica. Por otro lado, la quema masiva de combustibles fósiles y la emisión de contaminantes asociada a su consumo también producen efectos dañinos en el medio ambiente que, al parecer, pueden dar lugar a rápidos cambios en el clima a nivel global. A pesar de la mayor eficiencia de los sistemas energéticos modernos seguimos incrementando las emisiones a un ritmo que, en el caso del CO₂, se estima casi del 3% anual, con tendencia creciente en todo el mundo excepto en Europa y la antigua URSS.

“Desde que el hombre aprende a dominar el fuego, la utilización de los recursos energéticos ha estado íntimamente ligada al incremento de su calidad de vida y al de su desarrollo tecnológico.”

¿CUÁL ES NUESTRO HORIZONTE ENERGÉTICO?

Se estima que la producción de petróleo barato está actualmente en su máximo y, salvo fluctuaciones coyunturales en el binomio oferta-demanda, la extracción comenzará a decrecer y su precio a subir en un futuro inmediato. Algo parecido pasará con el gas natural aunque con más retraso, ya que el nivel de reservas de gas permiten mantener la tasa de extracción en los niveles actuales durante más tiempo. En España, este cambio de tendencia coincidirá con el fin de la vida útil de las centrales nucleares actuales, que sumi-

1. Los valores de PIB se refieren al año 2009 y han sido obtenidos a partir de los datos del Banco Mundial sobre el Producto Interior Bruto por países (<http://sitesources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/GDP.pdf>) y la población para ese mismo año (<http://sitesources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/POP.pdf>). Los valores del consumo de energía primaria corresponden a estimaciones para el año 2007 hechas por el Department of Energy de EEUU (<http://eia.doe.gov>).

2. Datos obtenidos del BP Statistical Review of World Energy, 2008 (<http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>).

El hidrógeno como combustible

nistran el 20 % de la energía eléctrica, que a su vez constituye el 20% del consumo de energía final en nuestro país.³

Además, nuestro modelo de sociedad se basa en la persistencia del crecimiento económico continuo y hemos visto que éste, si bien con distintos valores de intensidad energética, se correlaciona con el consumo de productos energéticos y con la emisión de CO₂. El informe Stern⁴ establece que, con el actual sistema económico, la concentración de CO₂ en la atmósfera alcanzará valores de unas 550 ppm en 2050 y por encima de 650 ppm al final de siglo, y que, además, estas estimaciones son bastante robustas frente a ligeros cambios en el modelo actual de crecimiento. Existe un casi total consenso científico en que el ecosistema terrestre admite, como mucho, unos 500 ppm de CO₂ sin incurrir en graves riesgos de que se produzcan fuertes y rápidos cambios climáticos.

En consecuencia, hemos de asumir que la escasez a corto-medio plazo en los recursos energéticos y el elevado impacto medioambiental, que su utilización produce, constituyen uno de los principales, si no el primer problema, con el que la Humanidad se enfrenta. Hemos de ser conscientes de que los recursos energéticos que estamos utilizando son finitos y que además tenemos que buscar alternativas energéticas menos contaminantes.

¿CUÁLES SON LAS POSIBLES SOLUCIONES?

Una posible solución del problema pasaría por un cambio del actual sistema económico que hiciera compatible un cierto grado de bien-

estar con una disminución del ritmo de crecimiento. De hecho, existen estudios socioeconómicos que apuntan a que pudiera existir un máximo en el índice de desarrollo humano que estaría entorno a sus valores actuales en los países europeos y Japón de forma que un incremento en el PIB y/o en el consumo energético por habitante (casos de Canadá, USA o Rusia) no comportaría una mejora en dicho índice.⁵ No obstante, seamos conscientes de que esta situación de bienestar habría sido alcanzada solamente por una pequeña parte de la Humanidad con lo que, de acuerdo con el modelo económico actual, una mejora de esta situación pasaría necesariamente por un elevado incremento del consumo energético global.

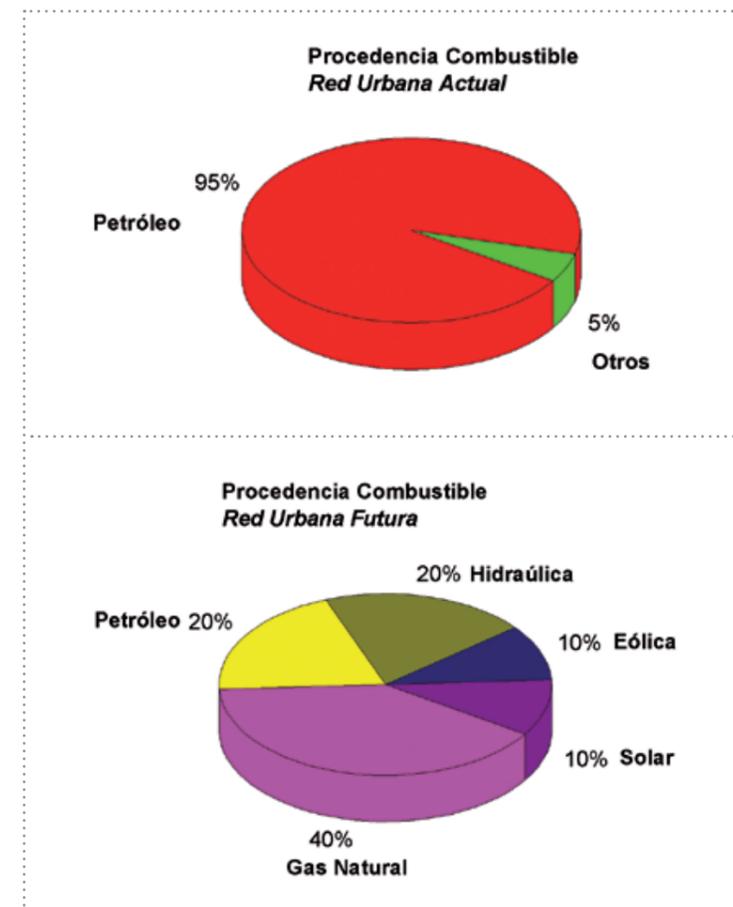
La apuesta más realista en estos momentos está en buscar soluciones tecnológicas que permitan sustituir a corto plazo los combustibles fósiles por otras fuentes de energía renovables, a la par que incrementar el rendimiento energético de nuestros sistemas actuales.⁶

En lo que respecta a la generación estacionaria de electricidad, todos conocemos los nuevos sistemas de producción de energía renovable. La eólica, de la que hay unos 14 GW de potencia instalada en España, viene a cubrir en torno al 12% de la producción lo que nos convierte en un país puntero en esta tecnología. La energía solar, tanto en la modalidad de producción fotovoltaica como en la

menos conocida de la solar térmica, tiene un potencial realmente ilimitado. Sin embargo, todas estas fuentes renovables presentan dificultades para su implantación a corto plazo como sustitutivas de los combustibles fósiles, tales como su carácter discontinuo o el que su puesta en marcha necesite de amplios espacios y grandes inversiones. La energía nuclear, que es una excelente alternativa que no incrementa la concentración de gases de efecto invernadero, tiene el inconveniente del rechazo social aparte de las enormes inversiones necesarias para su implantación máxime si se tiene en cuenta el coste asociado a la gestión de residuos y reciclaje de las instalaciones una vez acabada la vida útil de estas centrales.

¿Y EL TRANSPORTE?

El transporte utiliza aproximadamente el 40% de la energía primaria y en un 95% utiliza derivados del petróleo. Ello convierte a este sector en la fuente más intensa de emisión de CO₂ y otros gases nocivos, de ahí que se esté realizando un enorme esfuerzo para tratar de sustituir el uso actual de la gasolina y el gasoil por otros combustibles menos contaminantes. En la figura presentamos los diagramas que muestran



Distribución del combustible utilizado actualmente en transporte urbano y los objetivos del plan CUTE para el 2020.

el reparto de combustibles dedicados al transporte urbano en la U.E. actualmente y el futuro previsto en el plan CUTE (Clean Urban Transport for Europe). Observamos que se pretende pasar de una utilización actual del 95% de derivados del petróleo a otra más diversificada que reduzca esta dependencia al 20%.



Avión propulsado por un sistema híbrido de hidrógeno y combustible.

*<http://airsoftinformations.blogspot.com>

3. Consultar: <http://www.foronuclear.org>.

4. El "Stern Review on the Economics of Climate Change" de 700 páginas de extensión fué encargado por el Gobierno Británico a Sir Nicolas Stern y publicado el 30 de octubre del 2006. Se puede encontrar en <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk>.

5. El índice de desarrollo humano, HDI, se calcula a partir de la esperanza de vida, niveles de educación y PIB. En 2009 España ocupaba el puesto 15 con un valor de 0.955 sobre 1. http://www.nationmaster.com/graph/eco_hum_dev_ind-economy-human-development-index.

El hidrógeno como combustible

El proyecto CUTE terminó en 2006 y fue reemplazado por el más ambicioso plan cuatrienal HyFLEET:CUTE en el que 33 autobuses movidos con H₂ y Pilas de Combustible (FC) y 14 con motor de combustión interna han sido fabricados y puestos en circulación por el consorcio Daimler-EvoBus en diversas ciudades europeas, entre ellas Madrid y Barcelona.⁷ Además de los autobuses, se han montado plantas de producción y suministro de hidrógeno, procedente de electrolisis, reformado de gas natural, etc. Al finalizar este proyecto se han transportado 8.5 millones de pasajeros y recorrido 2.160.000 Km, sin ningún accidente, habiéndose consumido 555 t de H₂ mediante más de 13.000 operaciones de repostaje.

Recién terminado el proyecto, las conclusiones a las que se ha llegado por parte del panel de expertos de la Comisión Europea, patrocinadora del proyecto, es que el hidrógeno puede efectivamente ser un combustible limpio para el transporte, y que las Pilas de Combustible ac-

“La energía solar tiene un potencial realmente ilimitado. Sin embargo, todas esas fuentes renovables presentan dificultades para su implantación a corto plazo como sustitutivas de los combustibles fósiles.”

tuales, FC (Fuel Cells), son un sistema práctico y fiable para la propulsión de vehículos. También se ha constatado que los actuales motores de combustión interna pueden adaptarse de forma fácil y barata a la utilización de hidrógeno como combustible. Asimismo se ha demostrado la fiabilidad, eficiencia y seguridad de los sistemas de producción de hidrógeno. Sin embargo quedan aún por solucionar importantes temas tales como el excesivamente elevado precio de los autobuses movidos con motor de FC así como el que la actual tecnología debe mejorar y ser más robusta para que se minimice la excesiva demanda de mantenimiento que actualmente necesitan tanto los autobuses de FC como los electrolizadores.

¿POR QUÉ HIDRÓGENO?

Hemos visto que los vehículos alimentados con hidrógeno se perfilan como una de las opciones más interesantes para intentar resolver el problema del transporte.⁸ Ello es debido a que el hidrógeno es el elemento químico más ligero de la naturaleza y a que su molécula tiene la energía de enlace por masa más elevada de entre todos los compuestos químicos. Posee, por lo tanto, la mayor densidad energética másica. Además, es un combustible cuya combustión solo produce energía y

	Hidrógeno	Gasolina	Metano
Poder calorífico (kJ/g)	145	43	50
Densidad gas (kg/Nm ³)	0.090		0.72
Densidad líquido kg/l	0.071	0.73	
Densidad energética (MJ/m ³ o l)	10.8	31.5 (l)	35.8 (l)
Emisiones CO ₂ (mg CO ₂ /kJ)	0	80	55

Propiedades del H₂ en comparación con la gasolina y el metano.

agua y que se encuentra en forma prácticamente inagotable en el planeta, en forma de agua. En la tabla damos algunas propiedades del hidrógeno en comparación con otros combustibles de uso común.

El elevado poder calorífico y elevada densidad energética másica del hidrógeno, unido a la elevada eficiencia de las Pilas de Combustible, lo hacen óptimo para el transporte. En concreto, un automóvil estándar de 5 plazas, con un peso de 1.2 t carga unos 40 kg de combustible convencional para hacer 500 km. El mismo automóvil necesitará solo 5 Kg de hidrógeno si utiliza una Pila de Combustible y motor eléctrico o unos 10 kg si se alimenta con hidrógeno un motor de combustión interna. El problema es que esa masa de hidrógeno ocupa unos 56.000 l en condiciones normales y para reducirlo a un volumen manejable en un automóvil, es decir a unos 100 l, se necesita una presión de más de 100 MPa (unas 1000 atmósferas). Estos datos nos descubren uno de los principales inconvenientes del hidrógeno que es el de su difícil almacenamiento debido, en parte, a su pequeña densidad energética por unidad de volumen.

Uno de los microbuses de la Expo Zaragoza 2008, propulsado por un motor de hidrógeno.

*<http://blogdecarlos123456.blogspot.com>



¿CÓMO PRODUCIR EL HIDRÓGENO?

Actualmente disponemos de varias formas de producir H₂ cuyas ventajas e inconvenientes se resumen en la tabla de la página 50. En particular, la forma más económica de producir hidrógeno es a partir del reformado de los hidrocarburos, que además se puede hacer “in situ” en el caso del transporte con lo que evitaríamos parcialmente el problema del almacenamiento del combustible. El reformado no impide, sin embargo, la emisión de gases dañinos. El método más limpio, y de una gran eficiencia para producir hidrógeno a partir de agua, es la electrolisis utilizando electricidad producida a partir de fuentes renovables, si bien el coste de la producción de hidrógeno mediante electrolisis⁹ de

- El automóvil estándar europeo EURO4 emite 12.8kg de CO₂ por cada 100km mientras que ZEV (zero emission vehicle) con una pila PEMFC alimentada con hidrógeno comprimido emite 8.3g/100km. El rendimiento mecánico en el transporte de superficie es <25%. Del combustible consumido, menos de la cuarta parte se emplea en movimiento.
- Consultar: <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com>.
- Schlapbach, L. "Hydrogen-fuelled vehicles" Nature, 460, 809 (2009).
- Laguna-Bercero, M.A., Campana, R., Larrea, A., Kilner, J.A., Orera, V.M., Performance and Aging of Microtubular YSZ-based Solid Oxide Regenerative Fuel Cells" Fuel Cells, DOI: 10.1002/fuce.201000069.

El hidrógeno como combustible

agua refleja, directamente, el de la electricidad que depende mucho del método de producción, impuestos, etc. Actualmente, se está investigando muy activamente en la electrolisis a alta temperatura para aprovechar fuentes de calor superfluo con objeto de decrecer el consumo eléctrico de la electrolisis. En el otro lado de la moneda, tenemos el caso de la producción fotobiológica de hidrógeno mediante

“Desde el punto de vista de la investigación en Ciencia de Materiales, la fotocatalisis y la termólisis son las tecnologías que presentan un futuro más prometedor.”

cianobacterias, algas u otros microorganismos, cuyo recorrido es aún incierto ya que se trata de una tecnología en estado muy incipiente de investigación.

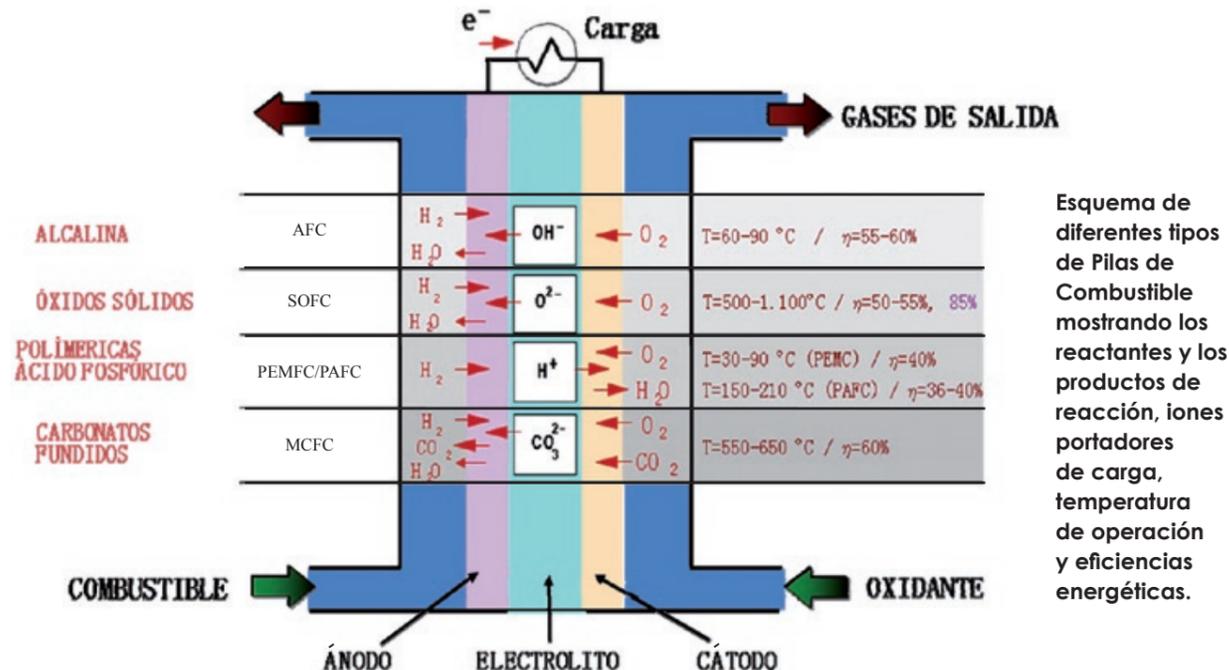
Desde el punto de vista de la investigación en Ciencia de Materiales, la fotocatalisis y la termólisis son las tecnologías que presentan un futuro más prometedor, si se avanza suficientemente en el descubrimiento de nuevos materiales aplicables a estas tecnologías (ver tabla).

¿Y CÓMO ALMACENARLO?

Ya hemos apuntado que uno de los principales inconvenientes del hidrógeno es su carácter gaseoso en condiciones nor-

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Electrólisis	Tecnología conocida, eficiente y limpia. Genera H ₂ de alta pureza utilizable en FC poliméricas y motores de combustión interna.	Precio según factura eléctrica. En la UE cara. Más barata a alta temperatura.
Reformado de hidrocarburos	Tecnología bien conocida y eficiente. Bajo coste con gas natural.	Para evitar la contaminación hay que recoger el CO ₂
Gasificación de carbón o de biomasa	Puesta en valor del carbón y de los hidrocarburos pesados.	H ₂ muy sucio solo utilizable en SOFC. Recoger el SO _x y el CO ₂
Termólisis usando energía solar o energía nuclear	Potencialmente es un sistema de producción masiva y limpia que en el caso de la nuclear es suficientemente barata como para competir con el reformado.	Tecnología compleja que necesita de materiales de alta temperatura.
Fotocatalisis	Utiliza el efecto catalítico del TiO ₂ y otros semiconductores y la energía solar. Tecnología limpia.	Desarrollo a nivel de investigación. Sistema aún muy poco eficiente.
Fotobiología: algas, bacterias...	Potencial uso masivo y tecnología limpia.	Muy poco eficiente y en fase incipiente de estudio.

Ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías de producción de H₂.



males lo que unido a su elevada volatilidad y elevada inflamabilidad hace que su almacenamiento y transporte sea problemático. En la tabla de la página 52 resumimos los inconvenientes y ventajas de algunos de los sistemas de almacenaje de hidrógeno.

En la actualidad, casi todos los usuarios optan por el almacenaje en balas de presión o en depósitos de hidruros metálicos. Aunque el almacenamiento a alta presión está técnicamente resuelto, presenta algunos problemas de difícil solución ya que los contenedores son pesados y además el hidrógeno solo se comporta como un gas ideal hasta unos 10MPa de presión. Por encima de este valor, la relación presión-volumen deja de ser lineal y se necesita aún más presión para lograr una reducción equivalente de volumen. El futuro en el almacenaje del hidrógeno está en la adsorción de la molécula de hidrógeno en materiales altamente porosos. La adsorción se realiza habitualmente a LNT (temperatura del nitrógeno líquido, 77K) y para desprender el hidrógeno se eleva la temperatura del material. Con la técnica de adsorción-desorción se logra almacenar en torno a un 8%

en masa de hidrógeno. Para incrementar este porcentaje tan bajo se está investigando en nuevos sistemas más ligeros, alanatos, borohidruros, etc y en sistemas porosos tales como los materiales carbonosos o las zeolitas (aluminosilicatos) en los que la superficie de los poros haya sido recubierta con complejos organometálicos o moléculas orgánicas que atraigan los átomos de hidrógeno.¹⁰

¿CÓMO UTILIZAR EL HIDRÓGENO?

El hidrógeno puede utilizarse directamente o mezclado con otros hidrocarburos en un motor de combustión interna convencional. Sin embargo, su mayor potencialidad como combustible con alto valor energético y limpio se desarrolla cuando se utiliza para alimentar una Pila de Combustible. Una FC es un sistema de transformación de energía que produce electricidad a partir de la energía química de un combustible que se suministra de forma continua, mediante un proceso electroquímico (ver Figura). Consiste en una membrana, conductora iónica y estanca a los gases reactantes (elec-

El hidrógeno como combustible

trolito) recubierta por dos electrodos conductores eléctricos e iónicos. Los electrodos pueden ser conductores mixtos o materiales porosos y en ellos se sitúan los catalizadores de las reacciones de oxidación, ánodo, y reducción, cátodo. Los distintos tipos de FC corresponden a los de los electrolitos empleados así como su temperatura de operación. Las de electrolito polimérico, PEM, se cuentan por centenares de miles y se utilizan en transporte. Las alcalinas, AFC, o de ácido fosfórico, PAF, tienen aplicaciones aeroespaciales y militares. Todas ellas trabajan a temperaturas menores que 210°C y utilizan como catalizadores nanopartículas de Pt o sus aleaciones con Rh y Ru. Son bastante eficientes, desde el punto de vista energético, pero requieren como combustible hidrógeno de elevada pureza, <1ppm de CO.

Sin embargo, las Pilas de alta temperatura, de óxido sólido, SOFC, o de carbonatos fundidos, MCFC, presentan una eficiencia energética inigualable, > 80% con cogeneración, catalizadores baratos de Ni, Co o incluso Fe y flexibilidad, al uso, de diversos combustibles incluso hidrocarburos.¹¹ La alta temperatura de operación introduce dificultades en la duración y coste de los materiales que las forman.

RESUMEN

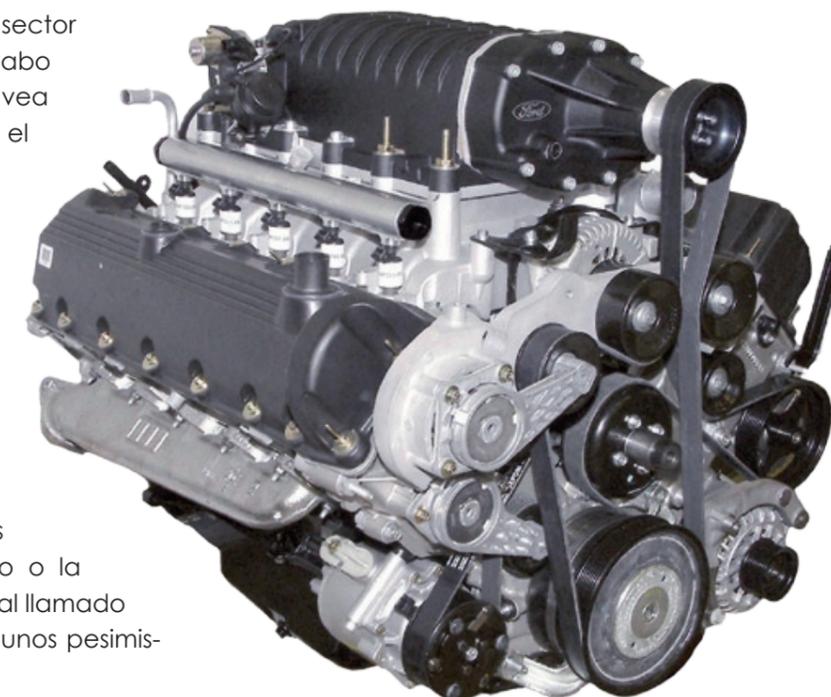
Seguramente, y a pesar de su perfecta implantación en el sistema económico actual, el uso de combustibles fósiles tiene sus días contados. No obstante, la alternativa a la gasolina y al diesel no está del todo clara. Los nuevos tipos de baterías recargables de litio o de hidruros metá-

licos han abierto el mercado al automóvil totalmente eléctrico o híbrido, pero volvemos a encontrarnos con la escasez en las materias primas necesarias para fabricar estas baterías, y con el hecho de que al pasar al automóvil eléctrico tendríamos, al menos, que duplicar nuestros sistemas actuales de producción y distribución de electricidad. Lo mismo ocurriría si optáramos por el hidrógeno. Solamente en España necesitaríamos unas 10.000 hidrogeneras y unos 30 GW eléctricos extras para producir y distribuir el hidrógeno que consumiría nuestro parque de transporte. Estas ingentes inversiones trascienden las capacidades económicas del sector público y solo se llevarán a cabo cuando la iniciativa privada vea claro el negocio o vea negro el futuro económico inmediato. Mientras tanto, los técnicos y científicos tenemos mucho trabajo que hacer para descubrir nuevos materiales más eficientes, baratos y resistentes que puedan ser utilizados en la producción, transporte y almacenamiento de energía. La pregunta es si ganaremos esta carrera contra el tiempo o la Humanidad se verá abocada al llamado "apagón energético" que algunos pesimistas vaticinan.

“Seguramente, y a pesar de su perfecta implantación en el sistema económico actual, el uso de combustibles fósiles tiene sus días contados.”

Motor de hidrógeno Ford V-10.

*www.drivingenthusiast.net



TECNOLOGÍA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Almacenamiento a alta presión >250 bares	Tecnología conocida.	Elevado peso de los contenedores, válvulas y conductos. Problema de seguridad debido a la presión.
Hidrógeno líquido	Elevada densidad energética y corto tiempo de recarga.	El proceso de licuación consume un 30% de la energía almacenada. Problemas de seguridad frente a rotura del contenedor.
Reformado "in situ" de hidrocarburos para producir H ₂ que alimenta una FC	Densidad comparable a la del sistema convencional. El sistema reformado + Pila es más eficiente.	Hay que recoger el CO ₂
Quimisorción: Hidruros metálicos	Potencialmente es el mejor sistema de almacenaje. Los hidruros de LaNi ₅ y Mg ₂ Ni son muy prometedores a temperatura ambiente.	Baja capacidad de almacenamiento y cinética lenta. Falta de estabilidad.
Fisorción: Materiales carbonosos, C-activo, fullerenos, nanotubos, zeolitas.	Son materiales muy ligeros y estables.	Rendimientos de almacenaje muy bajos.

Análisis comparativo de algunos de los sistemas de almacenaje de hidrógeno más simples.

Víctor M. Orera

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

10. Harris, I.R., Book, D., Anderson, P.A., Edwards, P.P. "Hydrogen Storage: the grand challenge. Fuel Cell Rev. 1, 17 (2004).

11. Handbook of Fuel Cells, Fundamentals, Technology and Applications" Ed. By Vielstich, W., Lamm, A. and Gasteiger, H.A. John Wiley & Sons Ltd., England, 2003. ISBN: 0-471-49926-9.

“La industria química en España está compuesta por 3.300 empresas, con una cifra de negocio de más de 50.000 millones de Euros. Ocupa a más de 172.000 personas de forma directa y a más de 500.000 personas inducidas.”

UNA VISIÓN DE LA QUÍMICA DESDE LA EMPRESA

POR JORGE VILLARROYA

Fue para mí un gran placer asistir, el pasado día 8 de febrero en Madrid, a la inauguración oficial del Año Internacional de la Química. Allí se escucharon los mensajes de una extensa representación gubernamental y de grandes científicos españoles. Rectores, decanos, profesores y cientos de invitados abarrotaban el hemisiciclo y las salas contiguas del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Aquí, en la inauguración que tuvo lugar el pasado 28 de febrero en Aragón, pude sentirme en parte protagonista, aunque quizás el más pequeño de los allí presentes, rodeado de ilustres compañeros y autoridades para apoyar la presentación de un ciclo de conferencias y de actos programados para conmemorar este año tan marcado, todo ello en mi condición de representante de la industria química y del plástico de Aragón. Todos estuvimos allí por la Química, ya que a todos nos ocupa y nos preocupa de una u otra forma, desde su visión académica, profesional, científica, de su proyección y desde la práctica industrial. Todos convivimos con la Química, la amamos y la necesitamos.

Una visión de la Química desde la empresa

Mi voz aquí en este foro solo se quiere alzar para poner en valor el esfuerzo de miles de empresas de nuestro país por poner a disposición de los ciudadanos, de la Sociedad en general y, sobre todo, a disposición de otras actividades industriales los productos químicos adecuados para que, a su vez, puedan transformarlos e integrarlos en sus cadenas productivas. Estos productos que nos hacen la vida más llevadera y más agradable. Estoy aquí para decirle a la Sociedad que la industria química es necesaria y forma parte del porvenir. Confluyen en la empresa los deseos de emprender, de innovar, de progresar, de poner en práctica lo aprendido, lo investigado y de sacar al mercado miles de productos para cientos de sectores y de aplicaciones.

La industria química es ejemplo fehaciente de la estrecha comunicación que existe entre el ámbito científico e investigador de la Universidad y centros tecnológicos con la propia industria química, de la preocupación por alentar su estudio y por darle la proyección que merece esta ciencia, y hacerlo también con la colaboración de todos los estamentos, foros, instituciones y entidades implicados.

En esta simbiosis confluyen y concluyen grandes y pequeños programas de investigación y de innovación. La Química y la industria química son presente y futuro del desarrollo de la Humanidad,

y este camino en paralelo de Ciencia e Industria es cada vez más cercano, manteniendo un contacto más estrecho y provechoso.

Qué agradable es observar cómo nos rodea la Química por todos los lados de nuestra vida, tocando texturas de miles de objetos y materiales, para cualquier uso y aplicación imaginable. Todos estos millones de productos de nuestra vida diaria son Química, y están allí gracias a la Química. Y todos estos productos hay que fabricarlos, no surgen por generación espontánea. ¿Quién creen ustedes que resolverá en el futuro los problemas y retos de la Humanidad en sus necesidades diarias? No les quepa duda, la Química.

Lo demás serán nuevos prototipos, nuevas ideas arquitectónicas, nuevos diseños, etc., pero la evolución de nuestro mundo material, esa gran tarea, estará en gran parte destinada y en manos de la Química.

Por eso hace bien la Unesco y la ONU en proclamar el 2011 como el Año Internacional de la Química, así le está dando el valor determinante que tiene y tendrá en el futuro en la evolución de nuestro planeta y para el hombre.

Como industriales químicos nuestra responsabilidad es hacer que la Sociedad disponga de los avances científicos, hacerlo de la mejor manera posible, innovando, haciéndolo con rigor, con esmero y cuidado, siendo, por supuesto, respetuosos con el medioambiente, con nuestro entorno. Ya va siendo hora de que la

“Qué agradable es observar cómo nos rodea la Química por todos los lados de nuestra vida, tocando texturas de miles de objetos y materiales, para cualquier uso y aplicación imaginable.”

industria química, siempre tan denostada, tan incomprendida, se ponga en el pedestal que se merece, que ya no haga falta estar justificándose constantemente. La Sociedad, el planeta, ha entendido que es una necesidad estar con prejuicios porque los logros son evidentes. La necesidad está ahí, el brillante porvenir de la Química y de la industria química están ahí. La industria química en España está compuesta por 3.300 empresas, con una cifra de negocio de más de 50.000 millones de Euros. Supone casi el 11% de PIB; ocupa el primer puesto en cuanto a gasto de I+D+I; el primer puesto en investigadores contratados; el primer puesto en gasto en protección del medio ambiente; el primer puesto en personal dedicado a I+D+I, el 2º puesto español en términos absolutos en exportación, siendo las exportaciones alrededor del 50 por ciento de la producción. Ocupa a más de 172.000 personas de forma directa y a más de 500.000 personas inducidas.

“Mi voz aquí en este foro solo se quiere alzar para poner en valor el esfuerzo de miles de empresas de nuestro país por poner a disposición de otras actividades industriales los productos químicos adecuados para que puedan integrarlos en sus cadenas productivas.”

Estoy seguro de que a partir de ahora se nos tomará más en serio y a buen seguro que cuando les aborden y les pregunten **¿Química?** contestarán **Sí, gracias.**

Jorge Villarroya

Presidente de la Federación de Empresas Químicas y Plásticos de Aragón

Consejero Delegado de Industrias Químicas del Ebro



Inauguración del Año Internacional de la Química en Zaragoza.

*Fotografía proporcionada por Ibercaja Zentrum

MAYA o SHOGUN

“La solución a los grandes retos que nuestra civilización tendrá que afrontar durante las próximas décadas se debe buscar, en gran medida, a través de la Ciencia y la Tecnología.”

POR FELIPE PÉTRIZ



Pirámide de Chichen-Itza (México)
y entrada al Templo Kiyomizu
(Japón).

*Foto por Grand Velas Riviera Maya
(www.flickr.com)

*<http://cavin2009.com>

La Historia nos enseña que pocas sociedades que van derechas al abismo son capaces de verlo con antelación. En su libro Colapso, el científico estadounidense Jared Diamond nos ilustra con varios ejemplos de esta falta de visión que me gusta recordar como ejemplos de qué evitar. La casta dirigente de los Mayas, por ejemplo, no supo prever que la deforestación y el deterioro del suelo, provocados por una explotación descontrolada de la naturaleza, serían su perdición. Aislados de los primeros efectos del deterioro ecológico, los gobernantes de aquella avanzada civilización no fueron capaces de detenerlo a tiempo para cambiar su destino.

Varios siglos después, Diamond encuentra el ejemplo inverso. Los Shogun, en Japón, tuvieron la perspicacia necesaria para detener una política forestal, asociada a su desarrollo urbanístico, que les habría deparado la misma suerte que a los Mayas. Estos dirigentes del siglo XVII, impusieron regulaciones en la tala, desarrollaron un conocimiento científico de la silvicultura y la gestión forestal e impulsaron una técnica de construcción más ligera, eficiente y que, en definitiva, requería menos madera. Hoy, pese a que Japón es uno de los países más poblados del mundo, tiene el 70% de su territorio cubierto por bosques y es la segunda economía mundial. En los próximos años, en España, en Europa y en todo el mundo, vamos a decidir si queremos ser como los Mayas o como los Shogun. La elección nos parece a todos evidente, pero es posible que haya alguna duda más sobre cómo tomar esa dirección.

“No se trata de desdeñar sin más los miedos de la población sino de lograr que los ciudadanos cuenten con la información suficiente para poder formarse un juicio sobre los asuntos científicos.”

Si comparamos nuestra situación con la de los pueblos a los que me acabo de referir, creo que tenemos alguna ventaja y algún reto que ellos no tenían que afrontar. Hoy, por suerte, la decisión sobre el uso de los recursos no es exclusiva de una casta dirigente. La ceguera o el egoísmo de unos pocos es así más fácil de evitar que en el caso de los Mayas. Sin embargo, unos tecnócratas con ideas brillantes tampoco podrían obtener el resultado de los Shogun sin contar con la aquiescencia de la ciudadanía.

Creo que la solución a los grandes retos que nuestra civilización tendrá que afrontar durante las próximas décadas, como el problema energético, el cambio climático o el envejecimiento de la población, se debe buscar, en gran medida, a través de la Ciencia y la Tecnología y espero que esta opinión la compartan cada vez más personas. Pese a que en nuestro país la Ciencia puede tener una percepción general positiva, cuando se desciende al detalle puede aparecer el conflicto: las antenas de telecomunicaciones, la energía nuclear o el uso de células madre embrionaria podrían ser tres ejemplos de desarrollos científicos o tecnológicos que generan controversia. No se trata de desdeñar sin más los miedos de la población sino de lograr que los ciudadanos cuenten con la información suficiente para poder formarse un juicio sobre los asuntos científicos. Con ella podrán determinar qué es realmente beneficioso o perjudicial para ellos y para la comunidad y actuar en consecuencia. Por eso es tan importante la labor de divulgación de medios como esta revista, de los museos de ciencias y de todos los que dedican su esfuerzo a difundir la cultura científica entre los ciudadanos.

En el tiempo que he trabajado en el Ministerio de Ciencia e Innovación, en la elaboración de la Ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación siempre hemos tenido presente que construir la nueva socie-

dad del conocimiento que todos deseamos no va a ser labor exclusiva de una élite sino un trabajo de toda la comunidad en el que debe contar la opinión de todos. Y para que esa opinión sea significativa no puede basarse en afinidades sentimentales; al menos, no más de lo imprescindible.

En la norma se recoge de manera explícita que “las Administraciones Públicas fomentarán las actividades conducentes a la mejora de la cultura científica y tecnológica de la sociedad a través de la educación, la formación y la divulgación”. Además, queremos fomentar la labor divulgadora por parte de los científicos, una tarea que ahora no tiene el reconocimiento que merece. Es importante que quienes de verdad conocen el significado de la Ciencia puedan transmitírselo a una sociedad que, aunque aún de manera minoritaria, demanda cada vez más este tipo de información.

Quiero recordar sobre este punto que la última encuesta de la FECYT muestra que entre 2008 y 2010 el interés por la Ciencia ha pasado del 9,6 al 13,1 por ciento, lo que representa un incremento del 36 por ciento. La cifra refleja una tendencia esperanzadora, pero aún debe mejorar.

En el pasado, cuando los Shogun salvaron los bosques japoneses o Rodolfo II llevó a la corte de Praga a Brahe y Kepler, las decisiones que permitieron transformar el mundo apostando por el conocimiento se produjeron gracias a los dirigentes ilustrados que en ese momento se encontraban en el poder.

Para lograr el cambio que nosotros deseamos es quizá mejor recordar la experiencia de Mary Lasker, la activista estadounidense que logró multiplicar la inversión del gobierno de Estados Unidos en investigación biomédica para combatir el cáncer. Su capacidad para transmitir a la sociedad de aquel país la importancia de la investigación como arma contra uno de los principales males de aquella sociedad (y de la nuestra) es un ejemplo que nos puede servir como inspiración.

Felipe Pétriz

Secretario de Estado de Investigación
Ministerio de Ciencia e Innovación





LA ÉTICA PROFESIONAL DE LOS DOCENTES Y LOS SISTEMAS DE EVALUACIÓN

POR ANA ISABEL ELDUQUE

La ética profesional de los docentes y los sistemas de evaluación

En los últimos tiempos estamos inmersos en lo que se está denominando una dinámica "reformista" de muchos aspectos fundamentales de las relaciones sociales. Las reformas están afectando a las relaciones laborales, a los sistemas de protección social y de pensiones, al sistema financiero y es de esperar que a más cuestiones en los años venideros. ¿Estará la educación superior exenta de estos movimientos tan convulsos? ¿Seremos los docentes un colectivo ajeno a los cambios, excluyendo la reforma de nuestras retribuciones que se llevó a cabo el pasado año? Me temo que no. No puedo afirmar con claridad cuáles serán los cambios pero que, como las meigas, haberlos los habrá. Por eso he reflexionado so-

bre qué está ocurriendo con otros colectivos sociales para intentar vislumbrar qué somos y qué es lo que se nos puede exigir en tiempos próximos. Y dado que el mundo está tomando un cariz cada vez más economicista, es allí hacia donde he dirigido la mirada.

Lo que está claro es que en el mundo económico las tendencias dominantes son aquellas que llevan hacia una globalización total. Esto implica que los sistemas de evaluación tienden a homogeneizarse en todas las sociedades: la información debe ser comparable. Esta tendencia universalizadora también implica que las formas de gestionar los colectivos sean, a su vez, similares y con un mayor grado de transparencia que permita deducir las con-

secuencias de las decisiones tomadas. Esto último se está traduciendo en un auge de la llamada **Responsabilidad Social** y su traducción a la gestión diaria de cualquier colectivo en los llamados **Códigos de Buen Gobierno**. Y esto ¿cómo nos afecta en la Universidad? No creo que ni la aparición de agencias de evaluación, nacionales y autonómicas, ni la evaluación continua sean ajenas a este movimiento general, que pretende ofrecer a la sociedad una mayor sensación de responsabilidad en la gestión de nuestra organización.

Esta tendencia a la globalización de todos los aspectos sociales podemos sentirla en nuestra propia actividad. Cada vez más se están llevando a cabo estudios comparativos entre centros de educación superior de todo el mundo. Cada vez con más frecuencia se comenta la posición o *ranking* de las universidades españolas. Y ello está trayendo consecuencias como la aparición de diversos tipos de campus con notables consecuencias presupuestarias. La lógica lleva a pensar que las actuaciones de los docentes deberían encaminarse a la obtención de máxima puntuación en los factores evaluados. Pero la realidad es mucho más compleja y no tan fácil de aplicar. A ello hay que añadir que la propia carrera profesional de cada docente lleva aparejada la consecución de unos objetivos personales, no siempre concordantes con los anteriores. No es que se trate de una situación de esquizofrenia, pero sí supone, en mi opinión, que los mensajes acerca de qué es la educación superior, qué valores son los principales directores de la misma y su implicación

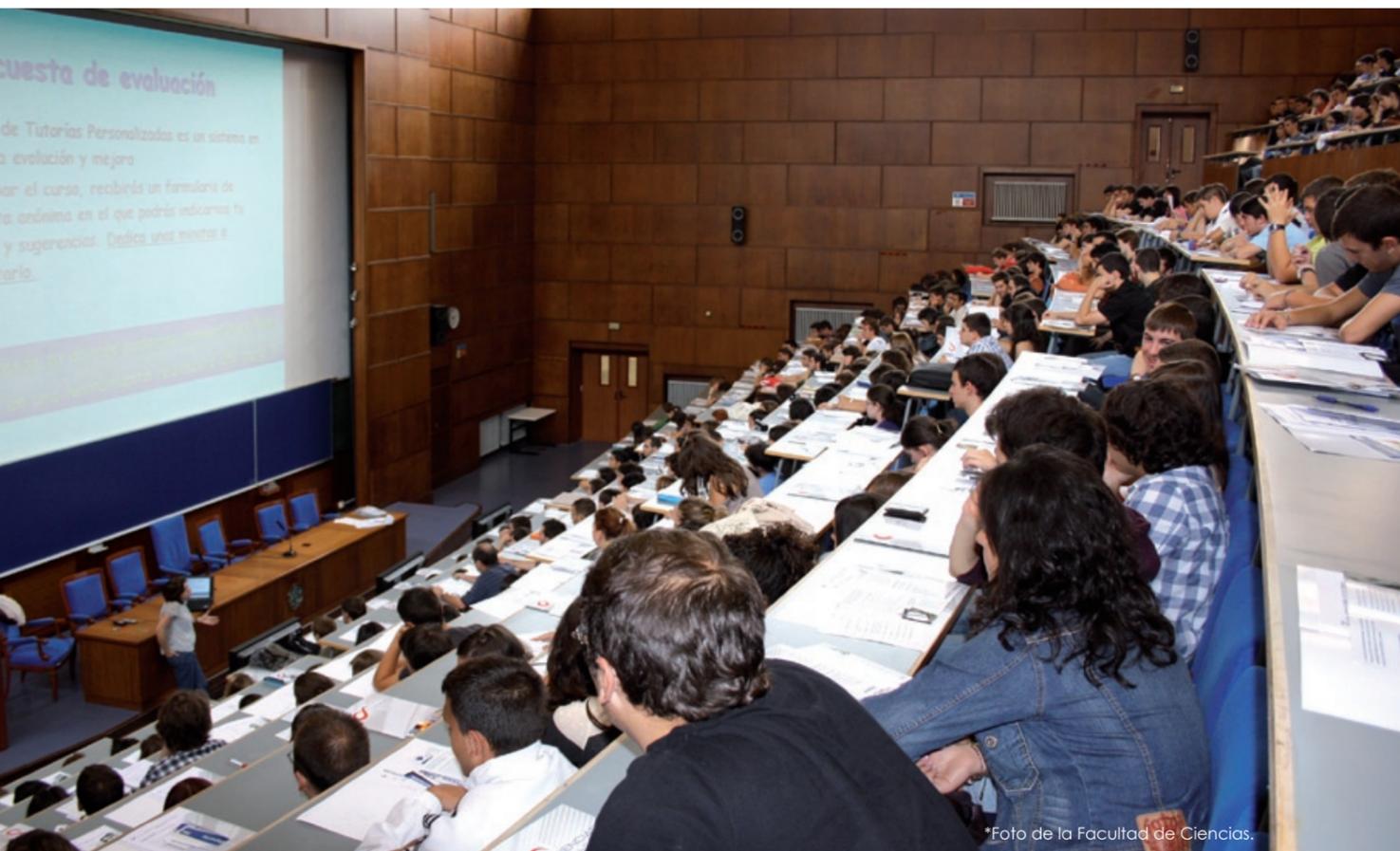
a los docentes no tienen una única traducción. Diversas fuentes solicitan diversos valores. La Universidad absorbe grandes recursos públicos, luego es absolutamente necesario que los gestores de los mismos, los docentes y los investigadores aceptemos que tenemos una responsabilidad social elevada sobre los mismos y que la clarificación de los valores, lo que se llama códigos de buen gobierno, solo puede ser una ayuda.

Si analizamos qué y cuáles son las prácticas de Responsabilidad Social que se proponen en

las organizaciones privadas, fundamentalmente de carácter económico y con ánimo de lucro, veremos que existen grandes diferencias con las instituciones públicas en general, y con las dedicadas a la enseñanza en particular. Diferencias tales que una mera traducción de los principios puede suponer la generación de unos déficits gravísimos. Especialmente delicado puede ser la falta de carácter democrático del gobierno de las organizaciones mercantiles. Pero también lo es la dedicación prioritaria del sistema educativo a la formación de profesionales dedicados a

satisfacer necesidades inmediatas. Cualquier plan formativo debe ser diseñado para que los receptores, los estudiantes, estén dedicados al mismo durante unos veinte años de su vida en su etapa formativa y otro tanto durante la primera parte de su desarrollo profesional. Por lo tanto, las enseñanzas establecidas por la autoridades académicas deben tener muy presente que se precisan útiles para unas dos generaciones, no solo para satisfacer las necesidades de los agentes económicos de los próximos años.

“La Universidad absorbe grandes recursos públicos, luego es necesario que los docentes y los investigadores aceptemos que tenemos una responsabilidad social elevada sobre los mismos.”



*Foto de la Facultad de Ciencias.

La ética profesional de los docentes y los sistemas de evaluación

ÉTICA DE LA EDUCACIÓN UNIVERSITARIA

¿Qué hace que la ciencia y la educación superior no sean susceptibles de ser tratadas como otras muchas actividades humanas? ¿Por qué debemos analizar de forma propia la actividad docente? No creo que sea una cuestión exclusiva de la educación superior, pero sí existen razones suficientes para no aplicar criterios generales a los códigos éticos del mundo educativo, motivos que considero se pueden agrupar en tres grandes clases:

- **Razones de índole utilitarista.** No siempre es útil o sencillo aplicar soluciones o recetas simples a situaciones tan complejas como el proceso educativo. ¿Qué mueve a los individuos a elegir una u otra forma de enseñanza? ¿Qué motiva a muchos ciudadanos a dedicarse a una carrera profesional larga y quizá alejada del éxito económico al uso? ¿Qué es lo que dice a la sociedad qué materias deben ser apoyadas con recursos humanos y financieros, en detrimento de otras? Estas preguntas son muy complejas y su respuesta no es única. Pretender, entonces, disponer de unas recetas sencillas y universales es, en mi opinión, imposible. Por lo tanto, ¿qué vamos a poder establecer como normas de buen gobierno que sean

“La actividad del docente solo podrá ser desempeñada de forma correcta si los encargados de llevarla a cabo poseen la cualidad de la lealtad al sistema al que se presta el servicio, de la cualificación suficiente para poder desempeñar la tarea docente y las virtudes éticas necesarias para poder tomar las decisiones más justas en cada momento.”

propias y originales de la actividad educativa? ¿No estaremos repitiendo principios morales universalmente aceptados, pero esta vez compendiados de forma diferente para que parezcan novedosos?

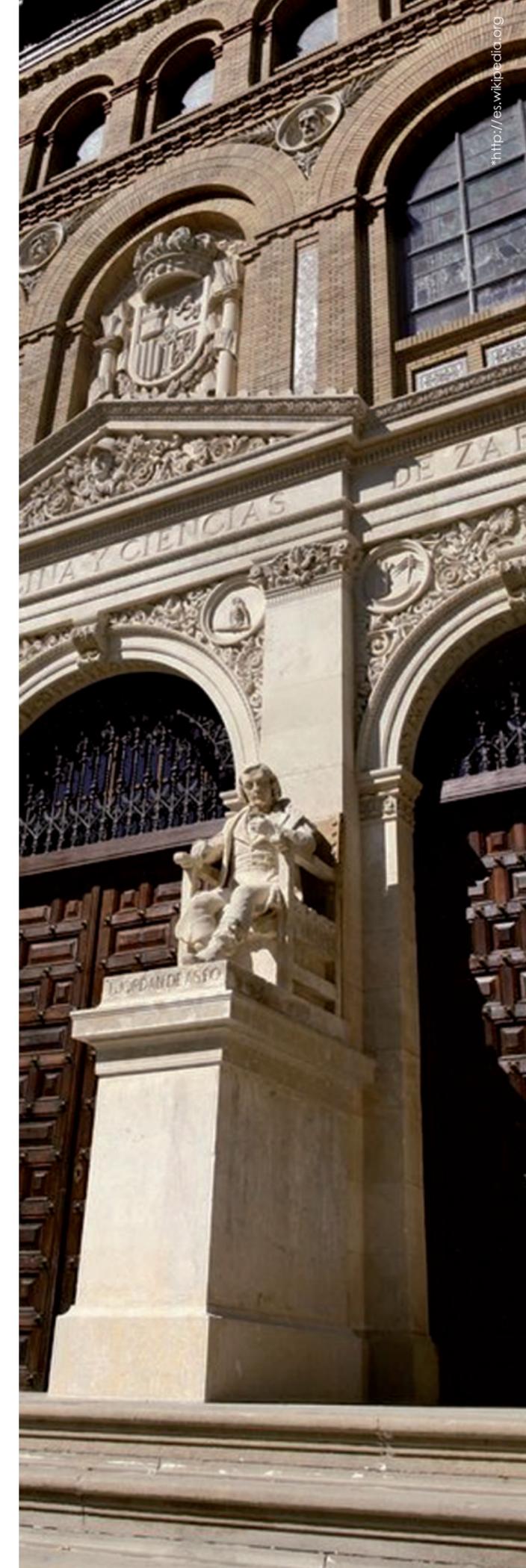
- **Razones de índole sociológico.** Los códigos de Responsabilidad Social han estado y están destinados a intentar regular comportamientos dentro del mundo económico, es decir, el mundo de la producción y transacción de bienes y servicios con fines lucrativos. Pero ¿todas las actividades humanas son de carácter económico? Por tanto, si no todos nuestros actos son de carácter economicista, ¿por qué vamos a aplicar unos códigos pensados para las actividades económicas a otras acciones sociales?
- **Razones de índole político.** La mejora de la eficiencia y la rendición de cuentas no son sinónimos ni de búsqueda del bien común, ni de aceptación de la pluralidad, ni de subordinación a entes elegidos democráticamente. Los grandes valores que se pretenden con los códigos de buen gobierno ni garantizan ni implican los valores realmente democráticos que deben regir las actuaciones sociales por parte de las instituciones. Rendir cuentas no significa que el gobierno de una organización esté sujeto al escrutinio de la mayoría. Al fin y al cabo, las sociedades mercantiles rinden cuentas económicas ante sus accionistas, acreedores y sociedad en general, y la elección de sus administradores y sus políticas distan mucho de ser democráticas. La eficiencia significa emplear el mínimo de recursos para la consecución de un fin, en forma, plazo y modo. Es decir, es la maximización de la relación beneficio obtenido a coste implicado. ¿Cuál es el beneficio que se obtiene del sistema educativo? ¿En qué plazo?

“La educación superior, sin ciencia que la retroalimente permanentemente, cae en la obsolescencia.”

La actividad del docente solo podrá ser desempeñada de forma correcta si los encargados de llevarla a cabo poseen la cualidad de la lealtad al sistema al que se presta el servicio, de la cualificación suficiente para poder desempeñar la tarea docente y las virtudes éticas necesarias para poder tomar las decisiones más justas en cada momento. Estas cualidades no difieren de las que los clásicos pretendían para los que desempeñaban el gobierno de la república, ya que la tarea docente tiene mucho de función de mando de un grupo de individuos, con el aliciente de que dicho conjunto de ciudadanos son de extremada vulnerabilidad por su juventud y falta de formación. Si el gobierno de los ciudadanos no es sencillo, la adición de la labor formativa a personas jóvenes lo convierte en más complejo.

Pero como la ética es la puesta en práctica de los principios, debemos aclarar más qué queremos decir con que cualquier código de buen gobierno referido a las instituciones docentes debe recoger aquellos principios propios de la ética pública en que está inmersa la educación. Y para ello podemos apoyarnos en lo que los clásicos definieron como el *decorum* exigible a los que se encargaban del gobierno (Cicerón). Así pues, se consideraba que una persona con *decorum* debería poseer:

- Autoridad para evitar el abuso de poder.
- Honor para no caer en la vileza.
- Justicia para no ser arbitrario.
- Libertad para enseñarla.
- Prudencia para no actuar irreflexivamente.



La ética profesional de los docentes y los sistemas de evaluación

Vemos claramente cómo el docente, como representante y ejecutor de una función pública, debe poseer unas virtudes o cualidades éticas que le permitan llevar a cabo su labor. Pero, ya lo he mencionado anteriormente, la docencia, y en especial la educación superior, presenta unas características propias peculiares que deben ser tenidas muy en cuenta en cualquier esbozo de código ético pretendido. Y la educación superior, sin ciencia que la retroalimente permanentemente, cae en la obsolescencia. Es precisamente la ciencia, la actividad investigadora, y la necesidad permanente de incorporación de los resultados al *currículum* académico lo que diferencia la educación superior o

“El educador, al ejercer su tarea, debe afrontar una situación de pluralidad, es decir, la existencia de intereses minoritarios que deben ser tenidos en cuenta.”

universitaria de los niveles anteriores. La actualización permanente de la educación superior no es sólo metodológica, sino de contenidos también.

Así pues, la ciencia es, según el sociólogo Robert K. Merton, una actividad social organizada que debe tener como principios rectores los siguientes:

- Debe ser universalista ya que busca verdades transculturales, independientes del entorno cultural y del momento histórico. Cualquier postulado científico debe resistir el examen realizado desde variados principios deontológicos.
- No es individualista ya que comparte ideas y resultados. Es más, el premio más buscado por los científicos siempre ha sido el reconocimiento de la labor propia por parte de los pares o colegas, lo cual requiere que el trabajo sea conocido.

- Debe ser desinteresada, buscando el conocimiento por sí mismo. La ciencia exclusivamente orientada a la resolución de problemas inmediatos no podría avanzar, debido a la pérdida de la visión global. Sin ésta no sería posible, o al menos muy difícil, la formulación de leyes generales que permiten el avance en muchos campos. La ciencia sin su carácter generalista es únicamente tecnología.
- Escéptica, pues debe dudar de sus propios hallazgos. Solo la puesta permanente en cuestión de las proposiciones anteriores permite que los modelos formulados sean sometidos a continuo examen. Las teorías científicas son válidas en tanto en cuanto explican hechos o predicen otros nuevos que las confirman de forma indirecta.

Por tanto, en la educación superior, como función pública y sin ánimo de lucro, no es fundamentalmente a través de controles externos a los educadores como se evita que éstos cometan actos indebidos. Esto solo se alcanza cuando los individuos encargados de su ejecución tienen elevados principios morales que les motivan, y cuyo cumplimiento es satisfacción superior a cualquier otro beneficio que se pudiera obtener por la conculcación de esos mismos principios a favor de terceros. El bien común es el único objetivo, pero teniendo en cuenta siempre que su definición en cada caso concreto no es tarea fácil. Lo que sí se cumple siempre es que, en cualquier situación, el educador, al ejercer su tarea, debe afrontar una situación de pluralidad, es decir, la existencia de intereses minoritarios que deben ser tenidos en cuenta. Junto a lo anterior, también ocurre con frecuencia que los intereses de la mayoría presen-

tan una excesiva inclinación hacia los valores dominantes del momento, que no tienen que ser los más adecuados. La toma de decisiones, pues, tendrá un carácter transaccional, con el objeto de minorar al máximo las diferencias y el sentimiento de exclusión de las minorías. Esta forma de decidir, evitando al máximo la generación de vencedores y vencidos, exige un elevado grado de autocontrol, lo cual solo puede alcanzarse cuando el individuo dispone de unos principios éticos sólidos, claros y coherentes, que le dan una capacidad de análisis de la situación, y le permiten tomar las decisiones valorando al máximo las consecuencias de las mismas. Sin ética no habrá capacidad de decidir buscando el bien común, ni capacidad de prever consecuencias sobre el colectivo, ni grado suficiente de satisfacción personal que haga de la honestidad un valor en sí mismo.

La búsqueda de la eficiencia en el uso de los recursos puede ser muy necesaria para el manejo de las organizaciones socioeconómicas, pero el gobierno de una institución educativa requiere que no se dejen de lado otras cuestiones importantes de interés general de largo plazo. ¿Podría considerarse lícito que el sistema educativo superior seleccionara dentro de sí un conjunto de receptores más avanzados y centrara en ellos sus esfuerzos en aras a maximizar los recursos económicos que la sociedad le ha encomendado? Mientras que para una organización económica la búsqueda de la eficiencia significa la búsqueda de un espacio

“Sin ética no habrá capacidad de decidir buscando el bien común, ni capacidad de prever consecuencias sobre el colectivo, ni grado suficiente de satisfacción personal que haga de la honestidad un valor en sí mismo.”



Patio de las Escuelas.
Universidad de Salamanca.

*Foto por ViajeroItalico (www.flickr.com).

La ética profesional de los docentes y los sistemas de evaluación

propio de actividad donde la organización posea una ventaja competitiva frente a terceros, en el sistema educativo, como en otras muchas organizaciones sociales, esta selección artificial de los mejores no encaja con los valores que la educación superior debe transmitir conjuntamente con los conocimientos. Si permitimos o, peor aún, si fomentamos que la eficiencia se convierta en un fin en sí misma, la propia falta de equidad social existente va a encontrar la mejor manera de perpetuarse, ya que los grupos de presión (*lobbies*) serán capaces de imponer sus criterios sobre las políticas de selección.

La formación en determinados conocimientos, técnicas y valores, aunque se haga seleccionando a los mejores individuos por su capacidad intelectual, no responde al concepto democrático de la educación, ni a su sentido formativo en valores (por ejemplo del principio de igualdad de oportunidades) por su carácter marcadamente elitista. La tecnocracia no es, y así se ha demostrado históricamente, un buen factor de cohesión social.

Finalmente, la propia supervivencia de la ciencia, como actividad propia del ser humano, requiere reafirmar que su objetivo no es la discriminación de unos individuos en favor de otros. Si la ciencia y los científicos, y su traducción académica práctica, es decir, la educación superior, reformulan su actividad para servir a intereses inmediatos, marcadamente particulares, se convertirían en cómplices del debilitamiento de las sociedades democráticas tal y como las conocemos. La ciencia medieval avanzó muy poco debido, entre otras causas, a su alineamiento ideológico no cuestionado con los valores imperantes. La ciencia y la educación superior se convirtieron en los garantes del *sta-*

“La educación superior debe tener siempre presente que su acción y efecto es a largo plazo.”

tu quo social. Como algún sociólogo actual ha denominado, la ciencia y la universidad que así opera se enmarcan dentro de la denominada “ciencia defensiva”, centrada casi en exclusiva en la argumentación a favor de determinados intereses. Ejemplos actuales tenemos y de gran importancia. Señalaré que, en mi opinión, la energía nuclear y el cambio climático son dos claros casos de que la ausencia de un debate realmente científico, sin agudas aristas ideológicas, es la causa de que todavía no hayamos llegado a conclusiones aceptadas por la mayoría de la comunidad. En ambos casos

existen demasiados informes y contrainformes de comités científicos “independientes” y de contrastada reputación que avalan sin género de duda una conclusión, y su contraria.

VALORES PARA LA EVALUACIÓN DE LA ENSEÑANZA SUPERIOR

Vista la existencia y necesidad de una ética de características propias del mundo docente universitario, es posible también dedicar unas líneas a los valores que deberían estar contenidos en un código de buen gobierno y en cualquier sistema evaluador del mundo universitario.

La educación superior debe tener siempre presente que su acción y efecto es a largo plazo. No puede pensarse en un sistema educativo tan flexible que se pueda adaptar de forma inmediata y permanente a situaciones cambiantes. En la crisis actual, muchos valores del capitalismo financiero finisecular han sido puestos en duda. La ausencia de regulación de los mercados, confiando en su propia capacidad para hacerlo por sí mismos, es una premisa que



se ha demostrado, cuanto menos, peligrosamente optimista. Es evidente que con el tiempo se produce la evolución de las enseñanzas pero, excepto en casos muy extremados, esta evolución es gradual. Ello exige que los educadores tengan siempre presente esta visión a largo plazo, y que no caigan en la tentación de incorporar teorías de forma muy prematura y poco meditada.

Otro valor importante a tener en cuenta es el propio valor de la ciencia como tal. La ciencia, la investigación científica, no debe centrarse exclusivamente en la búsqueda de respuestas a problemas concretos planteados por la sociedad. Debe centrarse en la elaboración

“La ciencia, la investigación científica, debe centrarse en la elaboración de modelos que expliquen las causas y predigan los efectos de los fenómenos, naturales y sociales.”

de modelos que expliquen las causas y predigan los efectos de los fenómenos, naturales y sociales. Estos modelos-teorías son los que dan la respuesta a las cuestiones sociales planteadas. Es decir, la investigación científica no es ni puede ser una fuente de asesoramiento. Ni tan siquiera una autoridad moral. La aseveración de que algo está “científicamente probado” suele tener más de eslogan publicitario que de realidad.

La ética profesional de los docentes y los sistemas de evaluación

Un valor importante, que también debe ser tenido en cuenta, es el referido a la libertad. En la actualidad, y sin darnos realmente cuenta de ello, todos estamos fomentando que las instituciones privadas se incorporen al sistema investigador como organismos financiadores, conjuntamente con los poderes públicos. Ello supone una clara descarga para las arcas del Estado y, por ende, para todos los contribuyentes. Pero también supone una pérdida de libertad sobre la elección de aquellos temas y cuestiones de interés. El financiador elige qué cuestiones deben ser las prioritarias. Pretender que las organizaciones privadas no defiendan sus intereses es algo tan estúpidamente obvio que no merece

ni ser comentado. Por eso, se requiere que los sistemas evaluadores tengan en cuenta lo anterior. Cuando una institución privada considere adecuado a sus intereses la financiación de una determinada investigación, busca quién puede llevar adelante esta labor más adecuadamente. Y ese quién, sea persona o grupo, es elegido por su experiencia y resultados anteriores, muchos de los cuales han sido obtenidos trabajando con financiación pública y con un mayor grado de libertad. Es preciso, entonces, que los sistemas de evaluación tengan en cuenta el equilibrio necesario entre los agentes de financiación para permitir que la libertad de acción, imprescindible en la investigación

científica, no se vea cercenada por falta o ausencia de fondos, y se puedan seguir formando investigadores capacitados para abordar problemas futuros todavía no planteados.

CONCLUSIÓN

La utilidad de los sistemas de evaluación del gobierno de organizaciones, que no están directamente relacionadas con una valoración económica, es una labor que, en mi opinión, todavía no está satisfactoriamente resuelta. La evaluación de cualquier actividad humana que no pueda ser resumida en unos pocos dígitos, de sencillo cálculo y más simple interpretación, es compleja. La tendencia a aceptar criterios evaluadores que son reflejo de otras organizaciones de índole muy diferente no creo que sea el mejor modelo a seguir. Éxito y fracaso en la educación superior tienen muchos más matices que índices de aprobados y suspensos. La utilidad social de determinados estudios superiores no puede evaluarse únicamente tomando como horizonte temporal unos pocos años. La sobrevaloración de evaluaciones apa-

rentemente independientes, pero claramente sesgadas hacia unos determinados valores, puede llevar a tomar decisiones a corto plazo de enorme trascendencia a largo. Los principios éticos del personal universitario, como los de todo individuo, si no son tenidos en cuenta en la evaluación serán abandonados, por muy loables que sean. El abandono de los valores éticos tradicionales por otros cuyo objetivo sea la satisfacción de criterios más utilitaristas es un riesgo que solo puede correrse tras una profunda reflexión. Y algunos principios, que están siendo aplicados en otros ámbitos sociales, son de una procedencia que quizá no sea la más recomendable para una institución encargada de culminar la formación de los ciudadanos que tendrán que gobernar la sociedad en las próximas dos generaciones.

Ana Isabel Elduque

Decana
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza

“La sobrevaloración de evaluaciones aparentemente independientes puede llevar a tomar decisiones a corto plazo de enorme trascendencia a largo.”



Antigua Facultad de Medicina y Ciencias de Zaragoza.

*Foto de la Facultad de Ciencias.

Exposiciones... en la Facultad de Ciencias

C/ Pedro Cerbuna, 12; 50009 Zaragoza
De lunes a viernes: 8h -21h; sábados: 8h-14h



DARWINISMO: la evolución selectiva



INSTRUMENTA

Colección permanente de instrumentos históricos de laboratorio
de la Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza.





con CIENCIAS.digital

Revista de divulgación científica de la Facultad de Ciencias de Zaragoza

<http://ciencias.unizar.es/web/conCIENCIASnumero7.do>

Nº 7 MAYO 2011



International Year of
CHEMISTRY
2011

Ir a la segunda parte

**Ciencia,
pensamiento y...
MUCHA QUÍMICA**