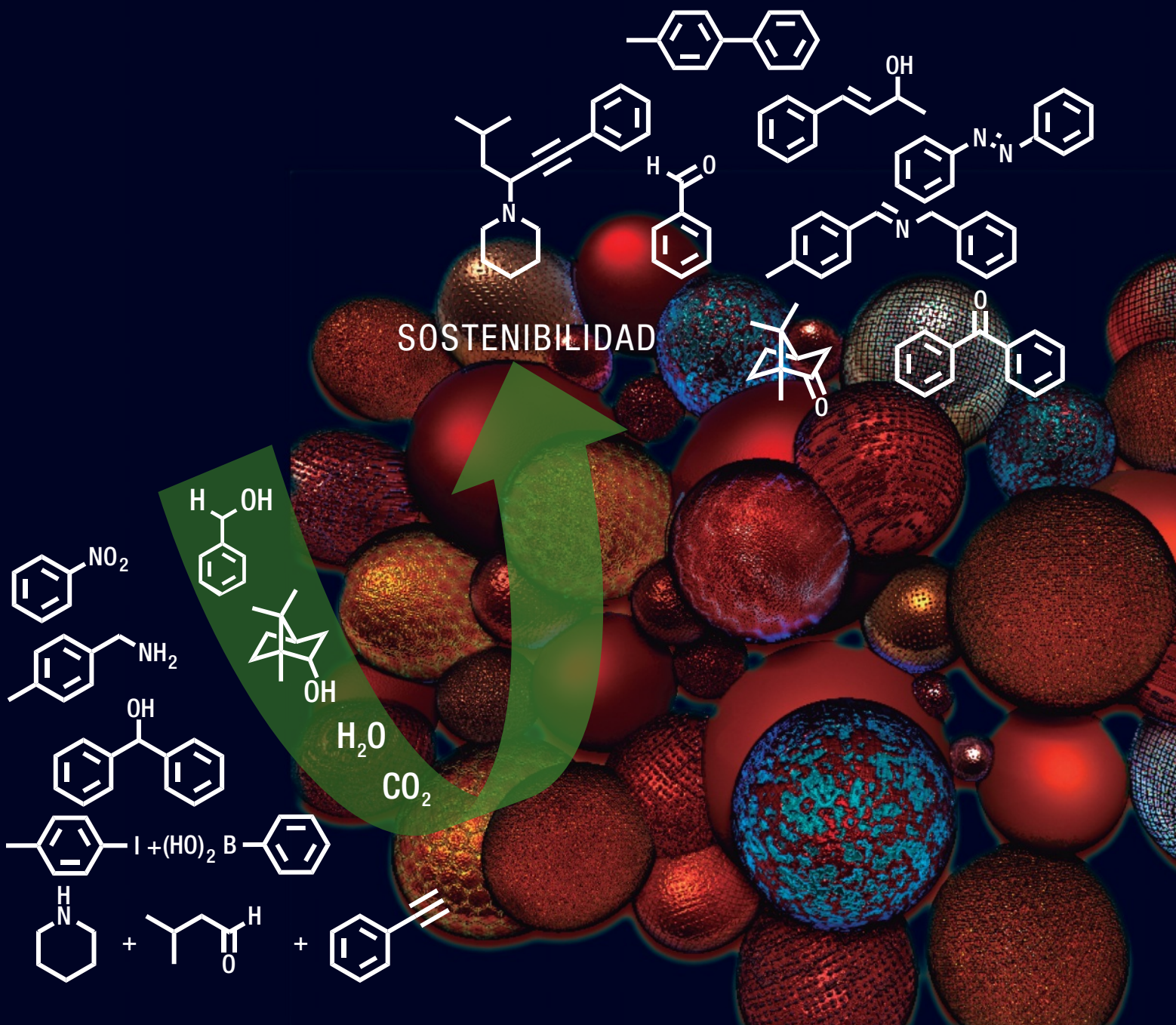




SOSTENIBILIDAD



Desarrollo de nuevos materiales mediante el ensamblado de nanopartículas, Marek Grzelczac

Química sostenible y fotocatalisis: nanopartículas metálicas como fotocatalizadores para síntesis de compuestos orgánicos, María González Béjar

Conclusiones de una vida dedicada a la enseñanza, Manuela Martín Sánchez

## Entidades colaboradoras



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE  
MADRID



## Socios Corporativos

- Sigma Aldrich (Merck)
- Bruker
- Cepsa
- Janssen Cilag
- Feique
- Lilly España

# Anales de Química

## Revista de la Real Sociedad Española de Química

### Editor General

Miguel Ángel Sierra  
*Universidad Complutense de Madrid*

### Comité Editorial

Fernando P. Cossío  
*Universidad del País Vasco Ikerbasque*

Juan José Lucena  
*Universidad Autónoma de Madrid*

Sonsoles Martín Santamaría  
*Centro de Investigaciones Biológicas del CSIC*

Inés Pellón González  
*ETS de Náutica y Máquinas Navales UPV/EHU*

Mariona Sodupe i Roure  
*Universidad Autónoma de Barcelona*

Carmen Redondo  
*Colegio Estudio*

María C. de la Torre  
*Instituto de Química Orgánica General del CSIC*

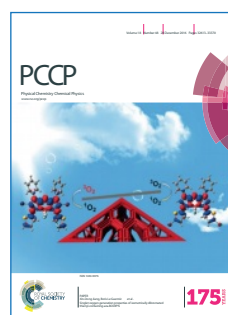
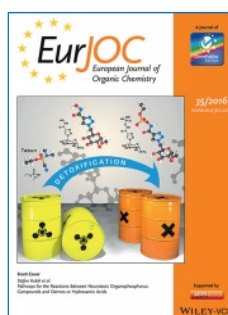
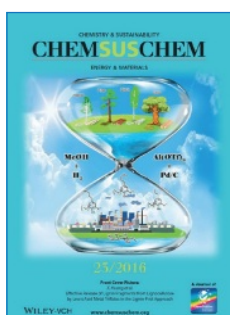
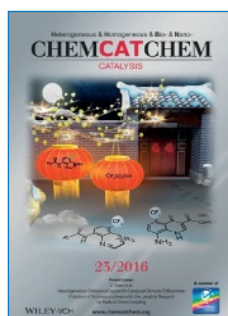
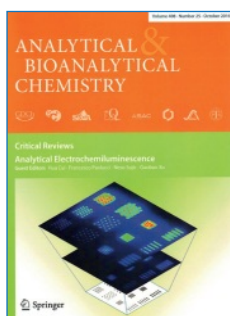
### Secretaría Editorial

Patricia Yáñez-Sedeño  
*Real Sociedad Española de Química*  
[www.rseq.org](http://www.rseq.org)

Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense Ciudad Universitaria.  
28040 Madrid  
Tel (+34) 913 944 356. Fax (+34) 915 433 879



## Revistas patrocinadas por la Real Sociedad Española de Química



**Sumario**



Composición y producción:

Moisés Fernández  
 Edinova Taller Editorial

<b>Editorial</b> .....	4
<i>Miguel Ángel Sierra</i>	
<b>Carta del Presidente</b> .....	6
<i>Antonio M. Echavarren</i>	
<b>Cartas al editor</b> .....	7
<i>Carta a Sr. Don Ximo Puig i Ferrer de María del Carmen Ramírez de Arellano, Presidenta de la S.T. de Valencia RSEQ</i>	
<b>La química vista por sus protagonistas</b>	
Conclusiones de una vida dedicada a la enseñanza .....	8
<i>Manuela Martín Sánchez</i>	
<b>Ensayo</b>	
Tres artistas y su material de laboratorio: George Brecht, Victor Grippo y Hermann Nitsch .....	19
<i>Santiago Álvarez Reverter</i>	
<b>Investigación Química</b>	
Desarrollo de nuevos materiales mediante el ensamblado de nanopartículas .....	25
<i>Marek Grzelczak</i>	
Química sostenible y fotocatalisis: nanopartículas metálicas como fotocatalizadores para síntesis de compuestos orgánicos.....	31
<i>María González Béjar</i>	
<b>Enseñanza de la Química</b>	
Aprender física y química “jugando” con los laboratorios virtuales .....	40
<i>Juan José Serrano Pérez</i>	
<b>Noticias de la RSEQ</b> .....	47
<b>Obituario</b>	
Jorge Wagensberg (Barcelona, 1948-2018) .....	52
<i>Gabriel Pinto Cañón</i>	
<b>Reseñas de libros</b>	
<i>Las medicinas de la historia española en América / Medicines of Spanish History from America</i> , profesor Enrique Raviña .....	54
<i>Miguel Á. Sierra y María C. de la Torre</i>	

*Anales de Química* está disponible en versión impresa. Para más información, por favor contactar con [pyanezs@ucm.es](mailto:pyanezs@ucm.es)

## Miguel Ángel Sierra

Hace unas semanas una persona a la que respeto y aprecio me mando un recorte de prensa en el que el jefe de la CRUE (Conferencia de Rectores de Universidades de España. Me referiré a este organismo por su acrónimo dado que cuando lo he hecho como el “Sanedrín” me han llamado la atención), el profesor Roberto Fernández afirmaba con rotundidad *Diez años de Bolonia*: “Debemos estar orgullosos del sistema universitario español”<sup>1</sup>. En ese mismo acto se afirmaba que:

La sociedad española se sienta orgullosa de sus universidades, que viven el mejor momento de su historia. Tiene muchas más probabilidades de ir a una universidad que esté entre las 800 mejores del mundo que un ciudadano de Estados Unidos.

El día anterior, el profesor Carlos Andradás, Rector de la UCM, había escrito:

Se está alejando la investigación de los departamentos universitarios y esto tiene un efecto letal... Han surgido iniciativas, como ICREA o Ikerbasque, que montan estructuras de investigación paralelas a las universidades. Bienvenidas sean, pero que se hagan en conexión con las universidades y no en su detrimento... Se nos achaca que nuestro sistema de gobernanza, contratación y gestión no es el adecuado para el desarrollo de la investigación avanzada. Pero quienes lo dicen son los que aprueban la ley de contratos, limitan las tasas de reposición para profesores y exigen acreditaciones para acceder a las universidades que impiden la internacionalización<sup>2</sup>.

En ambos casos yo me dije: bueno, si personas tan sesudas y democráticamente elegidas (no nombradas por sus méritos o su capacidad para el puesto, sino democráticamente elegidas, que otra cosa no, pero a demócratas en la universidad no nos gana nadie), dicen eso, yo, que lo veo de otra forma, debo estar equivocado.

Lo deje así, hasta que en medio de un atasco escuché en la radio una entrevista, de nuevo, con el profesor Fer-



nández. En ella, entre otras muchas cosas, preguntaba a su entrevistador ¿Qué prefieres, tener una Universidad entre las 10 primeras del mundo, o 100 entre las primeras 800 del mundo? En ese momento tuve una epifanía. Entiendo que la carretera de A Coruña y un atasco no es el sitio más adecuado, pero yo tuve allí una revelación.

En uno de esos momentos de lucidez que de vez en cuando me asaltan –cada vez más escasos– pensé: una de dos: o la CRUE y el sistema universitario oficial viven en los mundos de yupi, o yo vivo en una distopía<sup>3</sup>, desde la que, como en las películas de ciencia ficción, atisbo retazos del mundo real. Ese mundo real es en el que vive la CRUE. Puesto que, como he dicho, ellos son más sesudos y, además, han sido elegidos democráticamente, la respuesta debe ser la segunda.

Desde esa distopía en la que vivo (debería decir vivimos, porque hay otros muchos que ven lo mismo que yo) percibo una universidad anclada en una burocracia anacrónica, con un sistema de gobernanza y contratación decimonónico y ahogado por la endogamia, envejecida y en la que la investigación está agonizando. Además, si por lo menos nuestros alumnos se formasen adecuadamente en la ciencia del siglo XXI me podría dar por satisfecho, pero no es así.

<sup>1</sup> Universidad Nebrija, 7 de Febrero de 2018.

<sup>2</sup> *El País*, 6 de Febrero de 2018.

<sup>3</sup> La definición de la RAE de distopía, o antiutopía es una sociedad ficticia indeseable en sí misma.

A través de mi visión deformada al vivir en el universo distópico, me llegan, desde el mundo real una serie de aseveraciones recurrentes. Por no aburrirme voy a centrar en los mantras más al uso y que escucho desde hace cerca de 30 años.

Sin duda, el más genial de todos es “esta es la generación mejor preparada de la historia de la universidad española”. Digo yo que será la mejor titulada (títulos sí que tienen) porque preparada, lo que se dice preparada, salvo honrosas excepciones, no lo parece. Si medimos la preparación por su capacidad para tomar decisiones y enfrentarse a problemas, yo me cuestiono si la universidad está haciendo el trabajo por el que la sociedad le paga.

El segundo mantra es “hay que fomentar la transferencia a la industria...” Y de nuevo me pregunto: ¿a qué industria? ¿A la del turismo o la del ladrillo? Porque a la industria química lo veo difícil. No por nada, es que no tenemos industria química, y la poca que hay no tienen planes de I+D+i relevantes (dejo aparte las pocas internacionales farmacéuticas que quedan vivas todavía). Sin embargo, toda universidad que se precie tiene varios departamentos o vicerrectorados de transferencia e innovación, o un parque temático de desarrollo de “spin-offs”. En muchas, edificios enteros para alojar estas “spin-offs” que, desde mi visión deformada, cuando los he visitado los he visto vacíos.

El tercer mantra es “el acceso a los cuerpos docentes universitarios se hace en base a excelencia, y no existe endogamia”. La excelencia son, al parecer, los criterios de la ANECA que, valorar valora muchas cosas, pero la excelencia desde luego no (hablo desde el punto de vista privilegiado de haber pertenecido a una de las comisiones de esa agencia unos años). Respecto a las palabras de Andradás, tengo que romper una lanza a favor de “la Complu”. Desde el año pasado, algunos profesores se promueven al año por su excelencia curricular (4 el año pasado y 11 este en promociones a Cátedra). Impresionante si tenemos en cuenta el tamaño de mi universidad. El resto sigue el turno establecido (como en toda España) por su fecha de acreditación en la ANECA y su antigüedad en el cargo inferior. Si existe endogamia o no, mirad a vuestro alrededor. La respuesta no puede ser más evidente.

¿Quiénes son los culpables de esta situación? El gobierno con total seguridad. Ahora el del PP, antes el PSOE y

mañana ya veremos. Mientras tanto las universidades sigan por lo general apostando por “el de la casa” y que no se nos ocurra ir contra esto. Lo que nos han llamado a algunos que nos hemos atrevido a hacerlo no se puede escribir. La democracia en la Universidad es lo que tiene. Si a algún Rector se le ocurre ir contra la antigüedad y promover la excelencia lo mismo no le votan en las siguientes elecciones.

No voy a seguir. Como vivo en una distopía seguro que en el mundo real los alumnos “de Bolonia” salen excelentemente formados (en mi mundo no saben formular a nivel de master una silla ciclohexánica en proyección 3D, aunque claro en el mundo real lo que deben saber es dónde encontrar esa proyección, discutirla y analizarla, además de subrayar la palabra silla y discutirla con sus compañeros y compañeras).

En el mundo real, sin lugar a dudas, la transferencia a la industria se produce de forma eficiente. La industria busca en las universidades conocimiento. De estas universidades a las que se paga únicamente con dinero público, porque “son demasiado puras para venderse al capital” (literal), emergen “spin-offs”, y ayudan a competir a la industria española. Y, por último, la excelencia prima por encima de todo en la selección del profesorado universitario. No hay nada más que ver el número de candidatos que tiene cada plaza. Casi siempre supera la decena y se elige siempre (dentro del error experimental) al mejor.

Espero que el compartir una parte de mi epifanía no os haya aburrido demasiado. Si alguien se siente aludido pido disculpas. Si alguien tiene la curiosidad de saber cómo se llama en mi barrio a lo que hace el Sanedrín (perdón la CRUE, se me ha escapado) que me llame por teléfono. Eso no puedo escribirlo. Para terminar, os recomiendo el artículo que aparece en este número de *Anales de Química*, escrito por la profesora Manuela Martín. En él se recogen las conclusiones de una vida dedicada a la enseñanza. La visión que ofrece de distintos temas en ese escrito da cuando menos para pensar.

Gracias por leer.

MIGUEL Á. SIERRA  
Editor General de *Anales de Química*

Antonio M. Echavarren

Aprovecho esta ocasión para agradecer, en nombre del nuevo equipo, el apoyo recibido en estas pasadas elecciones, así como a Jesús Jiménez-Barbero y José Manuel González por la extraordinaria labor que han desarrollado al frente de la RSEQ durante estos últimos años.

El principal objetivo del equipo que lidero junto con Sonsoles Martín Santamaría, nuestra Secretaria General, no es otro que el de seguir trabajando en la línea de los últimos presidentes y secretarios generales, consolidando el liderazgo de la RSEQ como sociedad científica española.

Nuestra sociedad cuenta con una doble organización territorial y temática a través de Secciones Territoriales y Grupos Especializados que resulta perfectamente adecuada para afrontar los retos que nos proponemos acometer. Para ello, sin embargo, será necesario corregir algunos desequilibrios. Así, en primer lugar, no todos los socios se encuentran actualmente representados en las 19 Secciones Territoriales activas o los 25 Grupos Especializados. En el caso de las Secciones Territoriales seguramente serán suficientes algunas reformas sencillas para asegurar que todos los socios que trabajan en España estén representados territorialmente. Un problema distinto lo plantean los casi 100 socios que trabajan en el extranjero, para los que tenemos que buscar soluciones imaginativas que los hagan partícipes de las tareas de la sociedad. En cualquier caso, es conveniente asegurar que todas las Secciones Territoriales alcancen la masa crítica mínima para que sean los principales agentes en la coordinación de las actividades de la RSEQ a nivel local y que, a la vez, asegure su representación en la Junta de Gobierno.

Aunque la parte más activa de la comunidad académica española en química se halla integrada en la RSEQ, la representación de miembros de la industria o de los docentes de educación secundaria es insatisfactoria. Nos proponemos, por tanto, desarrollar nuevas acciones que contribuyan a incrementar el número de socios de estos dos colectivos.

En lo que se refiere a los Grupos Especializados, el número actual parece excesivamente elevado, especialmente si tenemos en cuenta que de los 25 grupos existentes, tan solo 9 superan los doscientos socios. El 35% de los miembros de la RSEQ son jóvenes, lo que es un resultado especialmente significativo y refleja los esfuerzos realizados en este sentido por los equipos anteriores. Aunque cerca del 60% de los socios jóvenes pertenecen al Grupo de Jóvenes Investigadores, esto no se traduce en una participación en la vida de los otros Grupos Especializados. Por esto, nos hemos fijado como uno de los objetivos el incrementar el número de los jóvenes que se integran en los Grupos Especializados, fomentando su participación en tareas orga-



nizativas de las reuniones especializadas y de las bienales de la RSEQ.

La investigación en Química es cada vez más transversal y aunque las antiguas especialidades tengan todavía vigencia a nivel pedagógico, desde la RSEQ debemos fomentar la creación de grupos y organización de reuniones que engloben a más de una de las tradicionales áreas. Nuestra organización dual se debe traducir también en la práctica en la coordinación entre Secciones y Grupos para la organización y financiación de los seminarios, conferencias y otras actividades de la RSEQ.

No es este el momento de profundizar en los problemas derivados de la modesta financiación de la investigación en España, que contrasta con el nivel de excelencia científica alcanzado por muchos grupos. En la medida de las posibilidades de la RSEQ seguiremos contribuyendo a paliar algunos de los déficits de nuestro sistema público de investigación, fomentando la comunicación científica y el intercambio de ideas, así como premiando a nuestros científicos más sobresalientes.

Por último, desde que se aprobaron los Estatutos de la RSEQ hace más de 15 años, nuestra sociedad ha incrementado el número de sus socios en un 80%. Para reflejar esta realidad y hacer de nuestra sociedad una organización más dinámica, resulta conveniente acometer una reforma de nuestros Estatutos y Reglamentos, que someteremos pronto a la consideración de todos los miembros de la RSEQ.

ANTONIO M. ECHAVARREN  
Presidente de la Real Sociedad Española de Química

Sr. don Ximo Puig i Ferrer  
President de la Generalitat Valenciana

Valencia, 12 de enero de 2018

La alarmante situación de la enseñanza de la Física y Química en los Institutos de Enseñanza Media de la Comunidad Valenciana ha quedado puesta de manifiesto a través de distintas asociaciones profesionales y ha sido reflejada en la prensa (diario *Levante-EMV*, 25 de agosto de 2017). La Comunidad Valenciana es la que menos horas semanales dedica a la Química, disciplina que debe ser uno de los pilares de la cultura científica de nuestros futuros profesionales. El conocimiento de la Química abre las puertas a la comprensión de fenómenos de amplia relevancia social y científica relacionados con el medio ambiente –el calentamiento global, o el uso de fuentes de energía no renovables–, con la comprensión de las bases de la bioquímica y la medicina, el estudio de la composición y funcionamiento de los fármacos, de los nuevos materiales que nos rodean, o de los productos que usamos a diario en nuestra alimentación e higiene. Además, la química es un fundamento básico para entender y actuar sobre nuestra agricultura e industria.

En la Comunidad Valenciana se imparten un total de siete horas semanales de Física y Química, apenas dos horas en segundo de ESO, otras dos en tercero y tres en cuarto. Una docencia que contrasta con las ocho horas que se dedican en Andalucía, Aragón, Baleares, Canarias, Navarra, Galicia y Murcia; las nueve horas de Cantabria, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Cataluña, Madrid, Extremadura, País Vasco y Asturias; y las diez horas de La Rioja. La situación no mejora en el caso del Bachillerato.

De nuevo estamos en el último lugar en el conjunto de las comunidades autónomas. No hay asignaturas optativas en las disciplinas de Física y Química para nuestros estudiantes y es nula la necesaria experimentalidad. Ante nuestra desazón, los Laboratorios de los Institutos se están desmantelando y los espacios se destinan a otros usos escolares. Por tales razones, nuestros estudiantes llegan a la universidad con una formación precaria lo que dificulta enormemente su especialización y conduce a un masivo fracaso. Si persistimos en este raquítico y pobre planteamiento de la enseñanza de la Química en la Comunidad Valenciana difícilmente cubriremos las expectativas necesarias para la formación científica de nuestras futuras generaciones y no abriremos caminos en favor del desarrollo de la agricultura e industria valencianas.

Por todo ello, desde la Sección Territorial de Valencia de la Real Sociedad Española de Química queremos poner de manifiesto la necesidad de corregir el actual desequilibrio y, por tanto, hacemos patente la urgencia de ampliar a tres horas por semana el horario lectivo de Física y Química en segundo y tercero de ESO, y de crear una optativa de Laboratorio en cuarto de ESO y otra en segundo de Bachillerato.

Quedamos a la espera de sus noticias, le agradecemos de antemano su atención.

MARÍA DEL CARMEN RAMÍREZ DE ARELLANO SÁNCHEZ  
Presidenta de la Sección Territorial de Valencia - RSEQ

Las cartas al editor no requieren invitación y deben enviarse directamente a Miguel Á. Sierra: [sierraor@ucm.es](mailto:sierraor@ucm.es)

# Conclusiones de una vida dedicada a la enseñanza

Manuela Martín Sánchez

**Resumen:** Partiendo de la experiencia de toda una vida dedicada a la enseñanza se intenta demostrar que es fundamental un profesor bien formado y entusiasta que es capaz de buscar en cada momento el método más adecuado pensando en los alumnos que tiene delante y los medios de que dispone. Se insiste en la importancia del esfuerzo y de la búsqueda de un equilibrio entre todas las posibilidades porque lo opuesto puede ser tan malo como lo que estaba haciendo.

**Palabras clave:** Problemas de enseñanza, técnicas de enseñanza, medios de enseñanza, métodos de enseñanza.

**Abstract:** Starting from the experience of a whole life dedicated to teaching, we try to demonstrate that a well-trained and enthusiastic teacher is fundamental and is able to search at all times for the most appropriate method, thinking about the students he has before him and the media available to him. Emphasis is placed on the importance of effort and the search for a balance between all possibilities because the opposite can be as bad as what I was doing.

**Keywords:** Teaching problems, teaching techniques, teaching aids, teaching methods.

## INTRODUCCIÓN

En 1984 Richard Mitchell, profesor de lengua, muy crítico con los sistemas de enseñanza que estaban dando lugar a qué los alumnos no supieran ni leer ni escribir, en una obra titulada *The leaning Tower of Babel*,<sup>[1]</sup> entre otras cosas, decía:

El problema fundamental ha sido que se pretende formar a los niños para que puedan tomar decisiones como si fueran personas mayores. Los niños son justamente niños, que puede que algún día, si dejan de ser manipulados dejen de serlo. Pero otras personas relacionadas con las escuelas: los profesores, los formadores de profesores, los expertos en educación y los traficantes de teorías se están comportando realmente como niños... Esta situación representa el final del proceso de lo que significa escolarización lo que lleva a la subversión del conocimiento y la razón.

En julio de 2003 con motivo de la celebración del centenario de las Reales Sociedades Españolas de Física y Química, tuvo lugar, en la Fundación Ramón Areces, una mesa redonda en la que participaban varios Premios Nobel de Física y Química. A todos ellos se les pidió que dijeran cuál

les eran, en ese momento, los dos problemas más importantes de la humanidad y todos coincidieron en que, por una parte, estábamos agotando los recursos y esquilmando la tierra y, por otra parte, habíamos perdido el norte en la educación. El holandés, Martinus J. G. Veltman, premio Nobel de Física 1999, añadió:

Cuando yo era alumno en Holanda había un sistema de enseñanza que podía ser tan malo como el franquista de España, pero permitía a los alumnos aprender cosas y formarse en lo imprescindible para poder seguir aprendiendo.

Como decía Unamuno en 1902 en un discurso en el Ateneo de Valencia:

Solo el que sabe es libre, y más libre el que más sabe, y el que sabe más se ve más forzado a elegir lo mejor, solo la cultura da libertad, y la libertad que hay que dar al pueblo es la cultura.<sup>[2]</sup>

Uno de los problemas fundamentales de la enseñanza es pensar que si algo no funciona lo opuesto va a ser maravilloso y al contrario, puede ser tan malo o peor. Hemos olvidado la importancia de la búsqueda del equilibrio como la situación ideal, que ya se encontraba plasmada en las frases lapidarias que recogía el oráculo de Apolo en Delfos "prudencia, moderación, nada en exceso". Al llegar el renacimiento se retoma esa idea de búsqueda del equilibrio. En los antepechos de las ventanas del claustro del edificio antiguo de la Universidad de Salamanca hay once enigmas grabados en piedra con imágenes tomadas del libro de Polifilo<sup>[3]</sup> (1449), que según unos eran las normas de comportamiento del emperador y según otros eran las normas de



Facultad de Educación  
Universidad Complutense  
C-e: [manuelamartinsanchez@gmail.com](mailto:manuelamartinsanchez@gmail.com)

M. Martín  
Sánchez

Recibido: 22/02/2018. Aceptado: 01/03/2018.





Figura 1. Enigma de los delfines

conducta de todos los estudiantes que salieran de la universidad. Pienso que pueden servir para ambos. De esos once enigmas tres se refieren a la importancia de la búsqueda del equilibrio.

Uno está representado por un delfín, símbolo de la rapidez unido a un ancla símbolo del reposo, con una inscripción en latín que dice “apresúrate despacio” (Figura 1).

Otro son dos amorcillos alados sumergidos en agua, pero ni vuelan ni se hunden y la inscripción dice “los bienaventurados conservaron el medio”. El tercero es una mujer sentada con el pie izquierdo en posición de avanzar y en la mano izquierda lleva una tortuga, mientras que la pierna derecha la tiene apoyada y en la mano derecha lleva unas alas, la inscripción dice “modera tu velocidad sentándote y tu lentitud levantándote” (Figura 2).<sup>[4,5]</sup>

Desgraciadamente en nuestro sistema de enseñanza se han roto todos los equilibrios posibles en los detalles más impensados como no cultivar la memoria, la falta de exigencia para formar la voluntad de los alumnos, un ambiente en el aula en la clase que ha pasado de silencio absoluto, a todos los estudiantes gritando y un largo etc. Entiendo la enseñanza, sobre todo en niveles elementales, como una conversación entre el profesor y los estudiantes, pero de forma ordenada, y que solo una persona esté en el uso de la palabra. El profesor tiene que conseguir esta situación



Figura 2. Enigmas de los amorcillos y la mujer sentada

desde el primer día de clase imponiendo su autoridad. Los primeros días son fundamentales para establecer las reglas de comportamiento, una vez que los alumnos han asumido cual es la función de cada uno ya no hay problema para mantener el orden. A veces se necesitará que haya discusiones en grupo, pero de forma ordenada. Tienen que aprender a respetar al que está en el uso de la palabra y no pueden olvidar que “atender les permite entender y entender les lleva a retener y eso les permite recordar”. No creo que se pueda enseñar nada con todos los alumnos gritando como se ve con frecuencia.<sup>[6]</sup>

En enseñanza se necesita, en primer lugar, un profesor bien formado y entusiasta. No es suficiente con saber enseñar, se tiene que saber muy bien lo que se va a enseñar. El profesor debe tener un conocimiento profundo de la materia que va a enseñar y mantenerse al día en esos temas. Decía un conocido profesor de matemáticas de la Universidad de Salamanca, Cuesta Dutari, que “es una obra de caridad enseñar al que no sabe pero no es ninguna enseñar lo que no se sabe”. Además, debe ser una persona llena de entusiasmo capaz de mantener la ilusión de los estudiantes y de captar el interés por aprender lo que les quiere transmitir.

La habilidad del profesor para plantear cuestiones es la mejor forma de abrir la mente de los alumnos para que se fijen e intenten aprender lo que se le está planteando. De esta forma llegarán a adquirir conocimientos que sean verdaderamente significativos. Este tipo de cuestiones son las que un alumno no puede encontrar en un libro por muy bueno que sea. Como dice Carlton:<sup>[7]</sup> “Un profesor de ciencias debe ser visto por sus alumnos como un co-inquiridor, no como una autoridad... siempre contestará a una cuestión con otra cuestión...”

## MI EXPERIENCIA

Los profesores y los padres deben tener claro que la **voluntad** de los hijos y de los alumnos es necesario formarla y que hay que enseñarles a ser responsables, que no todo vale.

En ese sentido he tenido una enorme suerte en mi vida, nací en Berganciano (Figura 3) (según Antonio Tovar nombre procedente de Braganza, bragantianos, zona repoblada por portugueses), pueblo muy pequeño de la provincia de Salamanca. Mis padres eran labradores que con gran esfuerzo y trabajando los dos consiguieron que sus cinco hijos tuvieran carrera universitaria: tres catedráticas de instituto de bachillerato, una de escuela universitaria y el otro de universidad. De ellos aprendimos dos lecciones que han marcado nuestras vidas: la importancia del esfuerzo y el respeto a todas las personas de nuestro entorno a las que debíamos de ayudar siempre que pudiéramos. Mi madre, que solo había ido a la escuela hasta los nueve años nos enseñó a todos a escribir, a leer y las operaciones de matemáticas. De mi padre y de mi madre aprendimos la importancia de estar bien informados y de relacionarnos con las personas de las que se podía aprender algo. En aquellos momentos en los que no era tan fácil conocer las noticias, mi padre estaba suscrito a uno de los periódicos



Figura 3. Berganciano

de Salamanca que leíamos y comentábamos. Los únicos periódicos que llegaban al pueblo eran el de la señora maestra y el nuestro.

La maestra del pueblo era trabajadora y únicamente tenía el problema de pasar de los acentos. Este debe ser el motivo por el que yo los olvido con frecuencia.

En bachiller tuve una excelente profesora de matemáticas, física y química, que, como se me daban bien, me encargaba de ayudar a las alumnas que iban retrasadas. Sin duda, la mejor forma de aprender algo es enseñarlo.

En la facultad tuve un buen profesor de Matemáticas (Jesus María Tharrats). Nos enseñó todo el cálculo vectorial que necesitábamos para poder entender la Física. Solo estuvo dos cursos en Salamanca porque obtuvo una plaza de Barcelona. Cuando se despidió nos enfadamos mucho con él porque nos dijo que ser catedrático de Salamanca era algo así como ser maestro nacional. También era excelente el profesor de Química Analítica (Felipe Lucena Conde) que, además de impartir unas clases con gran claridad, tenía montado un sistema de prácticas de laboratorio a base de problemas experimentales. Si no los resolvías no podías pasar al examen práctico que consistía en buscar aniones y cationes en una muestra sólida. El profesor de Química Orgánica era bastante desastre. Usaba unas fichas y según hablaba las descolocaba con lo que la lección era un lío, pero tenía un sistema de examen que o estudiabas y te lo sabías muy bien o no pasabas. A los tres estoy agradecida porque cuando me presenté a oposiciones no tuve



Figura 4. Investidura de doctora apertura curso 63/64, por el rector Dr. Balcells

que estudiar los temas relacionados con estas materias. No puedo decir lo mismo de Física General, Termodinámica, Electricidad, Química Inorgánica, o Química Física.

Las enseñanzas de mis padres y del profesor Lucena me sirvieron, a lo largo de mi vida, para buscar algo que pudiera suplir lo que necesitaba y no perder el tiempo en lamentaciones.

Así, cuando haciendo la tesis seguía una receta para obtener el tetrafluoruro de estaño partiendo de la obtención del tetracloruro de estaño, pasando cloro sobre el estaño (lo que me llevaba a intoxicarme con cloro, un día sí y otro también), me dedique a buscar en la bibliografía que propiedades de los compuestos de estaño y flúor hacían que el ácido fluorhídrico que lo deshacía todo excepto el platino no atacara al estaño. Leyendo libros me enteré que el problema se debía a que el difluoruro de estaño era bastante insoluble y pensé que lo mejor sería introducir un oxidante que lo llevara a tetrafluoruro, y que no introdujera otras sustancias en la reacción, esas condiciones solo las cumplía el agua oxigenada. Pero ¿y si me cargaba la única cápsula de platino que tenía?, además me habían dejado claro que si la estropeaba la tenía que pagar y mi economía no estaba para esas bromas. Habían salido en aquel momento al mercado una especie de bacinillas de polietileno. Calenté el estaño con ácido fluorhídrico al baño maría en una bacinilla, le añadí agua oxigenada de 110 volúmenes y desapareció rápidamente el estaño. Obtener los hexafluorestannatos de los elementos metálicos, que era parte del título de mi tesis, fue muy fácil y rápido añadiendo a esa disolución el carbonato del metal correspondiente. La tesis la terminé en menos de dos años (Figuras 4 y 5) y aparece recogida en el tomo del estaño del Gmeling después de haberse publicado en *Acta Salmanticensiae*.<sup>[8]</sup>

En 1985 estuve en la Facultad de Químicas de Zaragoza en una reunión organizada por el Instituto de Ciencias de la educación (ICE) y me acerque a saludar al profesor Rafael Uson Lacal que fue uno de los miembros del tribunal de mi tesis y cuando le pregunté si se acordaba de mí, me contestó “su tesis no es fácil de olvidar”.

En esa época, cuando en el laboratorio para que trabajaran mis alumnos no tenía bandejas para colocar el material, unas cajas de zapatos hacían la función. Ese tipo de soluciones “creativas” las tenía que buscar con frecuencia.

Entonces, no había proyectos de investigación, ni dinero para viajar. Utilicé mi dinero y mis vacaciones (en lugar de hacer otros viajes) y asistí a reuniones de los Comités de Enseñanza de la IUPAP, de la IUPAC y del GIREP en diversos países. Estuve en Edimburgo (1975), Madrid (1975), Montpellier (1976), Oxford (1978), Ljubiana (Yugoslavia, 1977), Dublín (1979), Praga (1980), Maryland (1981), Coimbra (1982), Montpellier (1983), Utrecht (Holanda, 1984), Tokio (1986), Waterloo (Canada-1989), York (1991), Braga (Portugal-1993), Pisa (1993), Queensland (Australia-1996), Duisburg (Alemania-1998), Barcelona (2000), Budapest (2000), Lund (Suecia-2002), Ostrava (República Checa-2004), y Istanbul (2004).

También asistí a la mayoría de las reuniones que sobre enseñanza de las ciencias se celebraban en España siempre

que no me coincidieran con horas de clase. Este es otro principio ético que aprendí de mis padres: Antes era la obligación que la devoción.

En todas estas reuniones conocí a profesores muy interesantes, por ejemplo, Arthur Campbell (Proyecto Chem) y Henry Bent de Carolina del Norte que intervenían en la reunión de Maryland con un tema que se titulaba “Cómo hacer las cosas fáciles difíciles y las difíciles fáciles”. Al final de la ponencia tuvieron un caluroso debate sobre qué y cómo se debía enseñar la química, debate que parecía no tener fin. Al final el Chairman les dijo “continúen ustedes luchando que los demás nos vamos a comer”.

Bent no entendía como los profesores complicaban a sus alumnos con una serie de factores de conversión con lo fácil que sería enseñarles a pensar, ni que a niveles no universitarios les enseñaran la correctísima definición de mol de la IUPAC, porque eso a un alumno de ese nivel no le decía nada. Campbell defendía que todo lo que teníamos alrededor eran productos químicos que nos podían servir para enseñar a nuestros alumnos. A la entrada de la conferencia nos dieron un pliego de papel, un clip y una anilla de goma elástica para tratar el tema de enlaces químicos. Apoyando el pliego de papel sobre la mesa nos pidió que cortáramos una tira en cada sentido y que dijéramos en qué sentido había salido mejor la tira. La conclusión era que el papel está hecho de fibras y se cortaba bien si lo hacíamos en el sentido de las fibras. El clip tenía enlace metálico, debíamos de comprobar tocando por debajo de la nariz que estaba frío. Si lo manipulábamos hasta conseguir que se rompiera, después de un cierto tiempo, podíamos comprobar que se había calentado mucho, demostración de que el trabajo se convertía en calor. También se pueden comprobar cambios de temperatura al estirar la anilla de goma.

Escuche en la Fundación Ramón Areces a Kroto contar como había llegado a proponer la estructura del fullereno. Cuando del análisis obtuvo una fórmula  $C_{60}$  dibujó en la pared hexágonos encadenados hasta tener 60 átomos de



Figura 5. Victor de M. Martín en la pared del Palacio de Anaya. Escudo entre los dos Victorios del profesor Maximiliano Gutierrez de Celis

carbono y pensó que aquello no podía ser. Al llegar al autobús vio a una señora que llevaba unas medias con rombos y ya empezó a pensar que podría ser una figura tridimensional. La estructura del  $C_{60}$  la completó al ver la cúpula del arquitecto Fuller en Canadá.

En estas reuniones conocí a profesores de Física como French del M. I. T., Lifshitz de la Academia de Ciencias de Moscú y de la Escuela de Landau, Salam Nobel de Física 1979, Chadwick Nobel de Física 1935, Rogers de la Universidad de Princeton y del Proyecto Nuffield y Jearl Walker autor de la *Feria ambulante de la Física*<sup>[9]</sup> (entre otras cosas, después de introducir una mano en agua la metió en hierro fundido y no se quemó). De química como: Ilya Prigogine Nobel 1977, Roald Hoffman Nobel 1981, Dudley Herschbach Nobel 1986, Bassan Shakkashiri autor de *Chemical demonstrations*,<sup>[10]</sup> de la Universidad de Wisconsin, Reg Friesen de la Universidad de Waterloo Editor de la revista *Chem 13 News*, Alexander Kornhhauser de la Universidad de Lubjiana, Majory Gardner de la Universidad de Maryland, y muchos más.

También en España había profesores que merecían la pena como Rafael Pérez Álvarez Ossorio, Justiniano Casas, Julio Casado, José Sánchez Real, Enrique Gutiérrez Ríos, Francisco García González, Francisco González García, Salvador Senent, Jesús Morcillo, Armando Durán y muchos otros.

La puesta en marcha de los ICE resultó muy positiva siempre que los directivos fuesen personas formadas y entusiastas. Así sucedía en Santiago de Compostela con Julio Casado Linarejos, en Salamanca con Agustín Escolano Benito, Oviedo con Rogelio Medina, etc. Sin embargo una nueva legislación suprimió la relación de la universidad con la formación de los profesores de niveles no universitarios creando los Centros de Profesores. Algo que es completamente absurdo. Recuerdo una transparencia que, en la reunión del Comité de Enseñanza de la IUPAC en 1977, proyectó la profesora Kornhhauser como solución a la mejora de la enseñanza. A lo largo de la transparencia en renglones separados estaba escrito: enseñanza universitaria, enseñanza secundaria y enseñanza primaria. Entre los dos primeros renglones dibujo el telón de acero, entre el segundo y el tercero una valla de un jardín. Su propuesta fue romper esas vallas como objetivo primero y fundamental para arreglar la enseñanza.

El ICE de la universidad de Salamanca publicó las pruebas de las XV primeras Olimpiadas Internacionales de Física y de Química<sup>[11,12]</sup> que habíamos conseguido en la reunión de Praga en 1979 y que fueron el origen de la puesta en marcha de las olimpiadas en España. Primero se celebraron las de Física con el apoyo de la Real Sociedad Española de Física y unos años más tarde las de Química. Estas últimas fueron organizadas inicialmente por la Asociación Nacional de Químicos (ANQUE) incorporándose posteriormente la Real Sociedad Española de Química.

En aquella época se publicaba la *Revista de Bachillerato* con artículos y números monográficos, sobre la enseñanza de las distintas materias, que merecía la pena leer, pero desapareció al mismo tiempo que los ICEs.

En todos los países y también en España empezaron a proliferar los docentes que contaban el resultado de sus famosas encuestas. Estos no conocían para nada a los alumnos y afirmaban que a los alumnos se les ocurrían cosas que no sucedían nunca. Eran los defensores del método científico, el constructivismo, etc. Recuerdo, en una conferencia en el ICE de Salamanca, a uno de esos profesores hablando de la caída de los cuerpos. Decía que cuando preguntaba a sus alumnos qué harían para medirlo dado lo rápido que iba, los alumnos inmediatamente contestaban que utilizarían la máquina de Atwood. En la conferencia estábamos bastantes profesores que conocíamos a los estudiantes reales. Levantamos la mano y le dijimos que de qué iba, evidentemente eso sería si previamente habían trabajado con ella. Se enfadó porque le habíamos estropeado su conferencia.

Un día al terminar mi clase, en un grupo de alumnos muy bueno, me retrasé al salir del aula (uno de los alumnos se acercó a preguntarme algo) y en ese momento entró el profesor siguiente. Me quedé impresionada porque iba con un “tocho” de los famosos cuestionarios. Varios alumnos se levantaron y le dijeron que no estaban dispuestos a contestar más encuestas y que se dedicara a explicar la lección que era su obligación.

De artículos sobre esas investigaciones se fueron llenando, por desgracia, las revistas relacionadas con la enseñanza. Así se explica que, en cierta ocasión, siendo directora del Departamento, desapareció un profesor una semana sin dar explicaciones. Cuando le llamé para que me explicara por qué no iba a clase me contestó: “estoy escribiendo un artículo, que para mí es muy importante y me tengo que concentrar”. Mi respuesta fue: “¿y eso está dentro de tu ética profesional? Pues vas a tener que cambiar de departamento si tienes que escribir más artículos”.

Por otra parte, pienso que tiene muy poca validez tantas investigaciones como se publican sobre enseñanza. Se trata de un terreno bastante resbaladizo por el número de variables que habría que controlar, y me preocupa que, por mucho que he leído en la bibliografía, nunca haya encontrado una experiencia pedagógica que no funcione. Astolfi<sup>[13]</sup> decía: “¿Se sabe de alguna experiencia pedagógica que no funcione?”.

La primera tesis que escuche sobre Didáctica de la Física en los años 90, era sobre la utilización del Plan Keller en la enseñanza de la Física. Creo recordar que los temas era la hidrodinámica y el electromagnetismo. El Plan Keller era un tipo de enseñanza personalizada que hacía furor en aquel momento. Los resultados habían sido maravillosos en relación al grupo de enseñanza tradicional. Sin embargo, los exámenes, los profesores, las horas de trabajo etc. eran diferentes a los tradicionales, entonces ¿qué variable había influido en los resultados? Nunca me convencieron ese tipo de investigaciones, me parecieron una pérdida de tiempo, No me arrepiento de que mi postura contribuyera a que no tuviera sexenios y me dieran cero votos en una oposición a cátedras de universidad.<sup>[14]</sup>

La selección de los profesores es fundamental en la Educación y repasando la historia de España el sistema que

mejor funcionó fue la selección de los catedráticos de instituto porque los tribunales se sorteaban y elegían a los mejores. A ese cuerpo pertenecieron Gerardo Diego, Torrente Ballester, Rodríguez Adrados, Puig Adam, y un largo etc... No había las presiones que se producían en la universidad en los procesos de selección. Recuerdo que en Inorgánica, cuando yo estaba haciendo la tesis, había dos escuelas y ya se sabía que si en el tribunal salían tres catedráticos de la escuela de Enrique Gutiérrez Ríos (1915-1990) de Madrid sacaba la cátedra uno de esa escuela, aunque fuera peor que el procedente de la otra escuela. La otra escuela eran los de Juan Martín Saura (1896-1969) de Zaragoza y pasaba lo mismo, aunque el número de la escuela de Gutiérrez Ríos fue creciendo y la probabilidad de que salieran los de la escuela de Zaragoza cada vez era menor. En cuanto a las oposiciones actuales a cátedras de universidad deberían por lo menos quitar el nombre de oposición, un solo candidato a un única plaza y con un tribunal propuesto por el.

Oposité a cátedras de instituto, me suspendieron y salieron las de escuelas normales, a las que me pude presentar porque además de ser licenciada había hecho magisterio por libre cuando hacía bachiller y me dieron Ciudad Real. Las oposiciones, lo mismo que las de instituto, eran cinco exámenes y con un programa que salía veinte días antes.

Cuando llegué a Ciudad Real, mi primer destino como profesora, lo primero que hice fue suscribirme al *Journal of Chemical Education* para tener algún sistema de información. Poco después me hice de la Asociación Nacional Químicos Españoles (ANQUE), de la Royal Society of Chemistry (RSC), de la Association for Science Education (ASE), del Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique (GIREP), de la Academia de Ciencias de Nueva York y me suscribí a Investigación y Ciencia, Mundo Científico, Alambique y Enseñanza de las Ciencias de España, Educación Química de la Universidad Autónoma de México, Chem 13 News de la Universidad de Waterloo (Canadá). Mi hermana se había hecho de las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química, de la American Chemical Society y de Historia de la Ciencias.



Figura 6. J.R. Bertomeu de Valencia, M. Martín de UCM, M<sup>o</sup>T. Oliver del Hoyo de North Caroline (USA). XXXIII Reunión Bienal de la RSEQ en Valencia (2011)

Sobre 1990, a petición del profesor Carlos Pico me hice de la Real Sociedad de Química para ayudarme en la nueva versión de Anales de Química y después he sido ocho años Directora del Grupo de Didáctica e Historia de la RSEQ, organizando varios Simposios en las Bienales de esta Sociedad (Figura 6). En este momento ya solo pertenezco a las dos Reales Sociedades de Química, la de Londres y la de España, y a la Real Sociedad de Física de España y también sigo con el *Journal of Chemical Education*.

En Ciudad Real solo estuve un curso. Después, por traslado, me fui a León. La Escuela Normal de León estaba muy bien dotada, además de ser la única de España que pertenecía a la UNESCO, recibíamos información y hacíamos trabajos en colaboración con la UNESCO. Un alto porcentaje de profesores estaban francamente bien preparados y eran muy responsables. Varios eran catedráticos de instituto o de la escuela de comercio, el único problema era coordinar los horarios, pero todos eran muy cumplidores. Las alumnas eran de alto nivel intelectual porque para no salir de León estudiaban magisterio, ya que la otra alternativa era veterinaria. También había alumnos, sobre todo procedentes de las zonas rurales, buenísimos. Tengo un buen recuerdo de aquellos alumnos que me siguen invitando a las bodas. El pasado septiembre celebramos las bodas de oro del Plan 1967 con un acto en el antiguo edificio de la Normal, ahora un IES, uno de los alumnos, que ha sido Director Provincial de Educación de León, en su intervención dijo que ya entonces existía la enseñanza personalizada y que siempre ha habido buenos profesores y métodos “modernos” (Figura 7).

La ley convirtió a la Escuela Normal en escuela universitaria y pasamos a depender de la universidad de Oviedo, a dónde tenía que asistir a las Juntas, por ser la Directora, pasando Pajares cuando no había túneles y con frecuencia había niebla o nieve.

En los tiempos conflictivos de los años setenta, la ciudad de León se llenó con pintadas en contra de un profesor de Música y los alumnos fueron a la huelga. Protestaban por la arbitrariedad en las calificaciones del citado profesor.



Figura 7. Bodas de Oro de Alumnos de Magisterio de León del plan 1967.-30/9/2017



Figura 8. Miguel Cordero exrector de la Universidad de León y tres exdirectores de la Normal: E. Martínez Torres, P. Muñoz y M. Martín

Entonces, se nombró un tribunal instructor en la Universidad de Oviedo. El presidente era el profesor Iglesias Cubría (Catedrático de Derecho de Oviedo), y el secretario Dionisio Llamazares (profesor en el Colegio de Derecho de León, después fue presidente de las Cortes de Castilla León y catedrático de Derecho). Se limitaron a llamar la atención al profesor. Recuerdo que cuando el Presidente del Tribunal me pidió las actas para estudiar las calificaciones me dijo: “tiene usted dos profesores a los que haría expediente ahora mismo, porque sus calificaciones son todas en torno a sobresaliente y eso no se lo cree nadie”.

Como anécdota, por los años 70 la caldera de la calefacción se rompía con bastante frecuencia (decía Joaquín Echegaray, profesor de Historia, que por la zona de la Normal había hielo de la época de Chindasvinto). Los elementos para reparar la caldera se traían de Barcelona, a veces con las fabricas en huelga, y en cierta ocasión, tuvimos que llevar un elemento en una ambulancia, porque los obreros no permitían que se sacara de la fábrica.

Al final de mi estancia en León, en 1981, se creó la Universidad de León (Figura 8). En esa época la política completamente absurda fue sembrar de universidades toda España. En pocos años se pasó de 13 universidades, que además no tenían todas las licenciaturas, a más de ochenta en las que proliferan todo tipo de grados.

Cuando empezaron a reproducirse las universidades hubo una mesa redonda en el teatro Príncipe de Madrid. Uno de los ponentes era Emilio Lledó, catedrático de Filosofía, de reconocido prestigio. El profesor Lledó leyó el decreto de 1254, del Rey Alfonso X que establece las normativas de organización de la Universidad de Salamanca. En este decreto se indica que los centros deben estar próximos para que se apoyen unos en otros porque todos los centros necesitaran del máximo número posible de medios y saberes. A continuación, leyó el Decreto de creación de la Universidad de Castilla La Mancha, en el que los centros se dispersaban por todas las capitales de provincia. En este momento en Castilla-León ya se plantean cerrar alguna Universidad, algo que no es fácil. En

la reunión de Dublín, en 1979, un profesor me preguntó ¿cuántas universidades había en España? 13 pero las van a duplicar y me contestó ¿se han dado cuenta del disparate que además es irreversible?

Como no salía una plaza en Salamanca me traslade a la E. U. Pablo Montesino de Madrid, porque Salamanca estaba mejor comunicada con Madrid que con León. Un reajuste del Rector Villapalos nos llevó a la Facultad de Educación junto con los pedagogos, con los que al principio tuvimos muchos problemas porque siempre se creían superiores y en posesión de la verdad. Había muchos que defendían que lo único que había que enseñar era “enseñar a aprender” como si alguien pudiera formarse sin aprender unos contenidos (Figura 9). No obstante, reconozco que en el Departamento de Teoría e Historia de la Educación y en el de Psicología había profesores de gran categoría y sensatos. Pronto se dieron cuenta de que tanto entre los profesores procedentes de escuelas como en los de facultad había gente buena, mientras que otros muchos necesitaban un reciclado. Entre los de Pedagogía estaban profesores como Jose Antonio Ibáñez Martín-Mellado, Gonzalo Vázquez, Julio Ruiz Berrio, Millán Arroyo, Jesús Beltrán, etc. (Figura 10).

### MIS IDEAS SOBRE ENSEÑANZA

A los estudiantes, salvo en casos muy concretos, es necesario exigirles que trabajen. Se tienen que convencer que no se puede aprender sin esfuerzo y que aprender a leer en cualquier materia, es tedioso y aburrido. Es lo mismo que sucede para aprender a leer, aprender las letras no es demasiado divertido lo que es gratificante es después leer entendiendo. Así sucede con los primeros conocimientos en cualquier campo. Al principio todo son ideas y conceptos nuevos que resultan aburridos. Sin embargo, cuando se supera esa etapa seguir investigando y aumentando sus conocimientos ya resulta muy placentero y agradable.

A lo largo de mi vida muchas veces mis alumnos me han dado las gracias por haberles exigido. Siempre, en el

último examen del curso, les pedía que, en una hoja que entregaban sin firmar y separada del examen, hicieran una crítica de la asignatura y un porcentaje muy alto decían “es una materia que ha merecido la pena venir a clase, no sucede eso en la mayoría”.

Es muy importante el cultivo de la **memoria**. **Solo se puede pensar sobre lo que se recuerda**. Un profesor de niveles no universitarios, sobre todo en primaria y ESO, debe tener claro que los alumnos a esta edad deben desarrollar la memoria porque es la edad crítica. Si en ese período no se cultiva después ya es imposible porque el cerebro no tiene esa plasticidad. Tendrán que aprender y memorizar conceptos e ideas que deben entender. Podríamos citar muchas frases de pensadores celebres relacionadas con esta idea.

Aprender sin pensar es inútil, pensar sin aprender es peligroso.

CONFUCIO

Los contenidos del pensamiento son ciegos, pero las estructuras del pensamiento sin los contenidos del conocimiento están vacías.

KANT

En cuanto a los **métodos, estrategias**, etc. no hay ninguno que sea la panacea. Estoy totalmente de acuerdo con las opiniones de Henry Bent,<sup>[15]</sup> profesor de Química Física de la Universidad de Carolina del Norte, que en 1975 escribía un artículo en el *Journal of Chemical Education*, referido a enseñanza, que lo titulaba “Usted no puede ganar”. Describía los distintos métodos, medios y estrategias que se utilizaban en aquel momento, ventajas e inconvenientes de cada uno y con una terminología muy química decía que por cada equivalente ganado hay un equivalente perdido. No obstante no era tan derrotista y terminaba afirmando que si un profesor se proponía mejorar, solo por el hecho de proponérselo, seguro que lo conseguía.



Figura 9. Feria de la Ciencia 2008 en Madrid. Estand de la UCM. Profesores de la Facultad de Educación con su Decano



Figura 10. J. A. Ibáñez, G. Vazquez, M. Martín, J. Ruiz Berrio

Ahora se han puesto de moda la “Flipped Classroom” (clase invertida), término acuñado por Jonathan Bergmann y Aaron Sams, profesores de química en Woodland Park High School en Colorado, o el similar de “Instrucción Peer” (PI) desarrollado por el profesor de Harvard Eric Mazur. Más o menos consisten en grabar las clases y colgarlas en la red o distribuir el video y dedicar el tiempo de la clase únicamente a atender las dudas de los estudiantes. Nos podemos encontrar investigaciones que llegan a la conclusión de que la utilización única y exclusiva de ese método no es adecuado. Es completamente diferente un video que un profesor, sería algo así como querer cambiar una persona por su fotografía, un video es algo estático, sin vida. Una clase como ya he dicho es un constante intercambio entre el profesor y los estudiantes. Las investigaciones que se han hecho sobre esta metodología advierten que solo es recomendable para cosas puntuales. Afirman que el método tiene muchos inconvenientes, entre otros que los estudiantes se olvidan con frecuencia de que tiene que ver el video y van al aula a resolver dudas sin tener ni idea del tema.<sup>[16]</sup>

La extendida idea de la rúbrica (palabra que proviene de “un título en un documento, a menudo escrito en rojo - del latín, rúbrica, ocre rojo, tinta roja” y que no he conseguido saber quién la patentó), refiriéndose a una especie de plantilla para evaluar a los estudiantes, me parece demasiado tiempo gastado para una evaluación. Esta idea la recogen muchas investigaciones que cuestionan su validez. Además, yo me pregunté realmente esa evaluación de cada alumno que parece tan precisa, y que yo dudo que lo sea, ¿para qué sirve después?

En cuanto a la “gamificación”, no me convence la idea extendida de aprender jugando que solo estará indicada en casos muy concretos y puntuales. Estoy de acuerdo con la opinión de Unamuno:<sup>[17]</sup> “El que aprende jugando acaba siempre por jugar a aprender. Y el maestro que les enseña, juega a enseñar. Y ni él en rigor enseña, ni ellos, en rigor, aprenden nada que lo valga”.

Un buen profesor debe informarse continuamente de los nuevos métodos, medios, técnicas que otros utilizan, pero debe ser lo suficientemente inteligente para saber escoger de todo eso que otros hacen que es lo más adecuado con su propia persona, con los estudiantes que tiene en ese momento y para el tema que está trabajando. Para que algo funcione en enseñanza es imprescindible tener en cuenta muchísimas variables y por supuesto conocer la filosofía del método que se intenta utilizar. El éxito estará en saber utilizarlos buscando un equilibrio entre todas las posibilidades y sin olvidar que lo contrario de lo bueno, aunque imperfecto, puede ser igual de bueno o incluso mejor.

Para tener éxito es necesario conjugar cómo aprenden los alumnos con sus intereses que, en la mayoría, será pasar la materia trabajando lo menos posible y con la mejor calificación. Un profesor no puede ir al aula sin haber pensado cómo le puede hacer más fácil de entender y más significativo a sus estudiantes lo que les quiere transmitir. Aunque lleve más de treinta años explicando ese tema cada

día debe ir con un esquema claro de lo que va a hacer. El tema puede ser el mismo pero los alumnos que tiene ese día, allí y en esas circunstancias son otros y en otras coordenadas. Sin embargo mucho me temo que no valgan para nada, más que para perder el tiempo, las programaciones que se exigen a nivel oficial y que evidentemente son tan abstractas que nunca se pueden cumplir.

Son muy interesantes las reflexiones de Moreno del Castillo<sup>[18]</sup> que dice que la única posibilidad de mejorar la enseñanza es desterrar de ella a los “mantras de aprender a aprender”, crear un sistema que fomente el esfuerzo, la constancia y el estudio. Estas ideas se oponen a las de Álvaro Marchesi que fue quien destrozó la enseñanza con tanta burocracia, tantas programaciones inútiles que hacen perder el tiempo a los profesores, tiempo que deberían dedicar a enseñar y a prepararse ellos para enseñar mejor. Creo que también tiene razón cuando dice que sobran muchos de los psicólogos, asesores, pedagogos y expertos que deambulan por los institutos y que con más cordura y menos delirios se obtendrían una enseñanza más eficaz y barata. Sin duda las ideas de María Ángeles Galino y de Alvaro Marchesi han influido bastante para destrozarse la enseñanza en niveles no universitarios. En cierta ocasión estuve en una intervención de Marchesi que, entre otras cosas, dijo que se podría llamar la atención a los profesores que enseñaban contenidos.

En España se pusieron en marcha la “matemática moderna” y la “gramática estructural” cuando ya se había demostrado en varios países que eso no funcionaba. La matemática se abandonó pero la gramática sigue siendo la culpable de que los alumnos no sepan lo que es un nombre, un adjetivo y un largo etc.

Me uniría a lo que decía Dudley Herron,<sup>[19]</sup> profesor de EE. UU. con muchos premios en enseñanza: “La influencia fundamental que las investigaciones en psicología y en educación han tenido en mi propia enseñanza es la variación en la parte de tiempo que dedico a hablar a los alumnos en relación con el que dedico a preguntarles qué piensan ellos”.

Como decía De Vos:<sup>[20]</sup> “Los problemas de enseñanza se deben resolver estudiando a los estudiantes”.

Se insiste mucho que el profesor debe ser un investigador en el aula, pero en el sentido de preocuparse, en todo momento, por los estudiantes que tiene delante, si realmente le siguen y se enteran de lo que están haciendo. Esta información no se consigue a través de test, se consigue a través de los trabajos y de las conversaciones con los alumnos. No se debe someter constantemente a los alumnos a test, muchas veces mal confeccionados y que sirven para muy poco. Decía Cuesta Dutari, ya citado, “Un test es lo mismo que mirar por el ojo de una cerradura, no se ve nada y es una falta de educación”.

Personalmente puedo afirmar que lo que más me ha ayudado a saber lo que entienden los alumnos ha sido corregir sus informes sobre los trabajos experimentales y hablar con ellos cuando estaban trabajando individualmente en el laboratorio. También han sido una importante ayuda las clases particulares que impartí cuando estudiaba.

Tiene una gran importancia en estas materias el trabajo experimental, muchas veces imprescindible para que los estudiantes sepan a lo que nos estamos refiriendo. Pero nunca como un show, sino integrado con el estudio teórico y para esto a nivel no universitario son muy valiosos los experimentos llamados de cátedra, si se hacen bien, de forma que todos puedan ver lo que está sucediendo y se les ayude a buscar qué sucede y por qué sucede. Con este fin era muy adecuado el uso del retroproyector pero supongo que en la actualidad sirve lo mismo una cámara y el cañón de proyección.

Con frecuencia cuando el material era fácil de transportar hice experimentos con los alumnos en el aula en grupos de cuatro, colaborando ellos en la distribución y recogida del material y siempre eran positivos para el aprendizaje de los alumnos.

No cabe duda que el trabajo de tipo experimental resulta muy formativo: fomenta actitudes de precisión, rigor y ética, aprenden a analizar e interpretar datos, normas de seguridad y adquieren una serie de hábitos de orden, limpieza, respeto, etc.

Pero para que el trabajo de experimental no sea una pérdida de tiempo y todos se lo tomen en serio, en cualquier modalidad que se utilice, los alumnos deben hacer un informe por escrito explicando, qué han hecho qué ha sucedido y por qué. Esos escritos sirven al profesor para saber lo que entienden y a ellos para reflexionar sobre lo que están haciendo.

Sobre los medios comenzaré por los **libros**. La mayoría de las veces no están hechos pensando en los estudiantes, muchas veces por sus contenidos parecen estar escritos para lucimiento del autor. Con frecuencia hasta tienen errores. Además están llenos de colores de fondo que dificultan la lectura, fotografías o imágenes que no tienen nada que ver con el texto y a lo mejor un espacio en blanco era más relajante. Tendrían que ser mucho más concretos, adaptarse al nivel y capacidad del estudiante y además así pesarían menos, se gastarían menos papel y no veríamos a los estudiantes arrastrando esas pesadas mochilas que terminarían estropeando su columna vertebral. Es posible que fuera necesario volver a los libros de texto de la primera mitad del siglo xx. Siempre que me preguntan cuál es el mejor libro digo que el más sencillo. Se trata de un problema mundial. En una reunión internacional del comité de enseñanza de la IUPAC en Dublín en 1979 estuvimos varias horas discutiendo sobre este problema y la conclusión final fue que era muy difícil de resolver porque las editoriales movían mucho dinero con los libros de texto.

Dudley Herron<sup>[21]</sup> opinaba que era muy importante seleccionar bien el libro el texto; había que buscar si la química era correcta y si el texto facilitaba el aprendizaje, empezando con lo concreto y yendo hacia abstracciones cada vez de más nivel. Al final terminó por escribir uno porque ninguno le convencía. Libro que era interesante pero a mí personalmente tampoco me convencía del todo.

Como resumen opino que un libro debe ser sencillo y un cuaderno de trabajo en el que escriben los estudiantes sus ejercicios y los resuelven. Nada de fichas que son el pa-

pel más caro de la historia y que solo sirven para que los alumnos no aprendan ni a leer ni a escribir, buscan lo que falta en el hueco, copian y no leen el texto.

Los **ordenadores** son unas herramientas buenísimas, pero solo si se utilizan de forma adecuada. La tecnología tiene impacto pero siempre que esté bien integrada en la enseñanza. En la mesa redonda de Premios Nobel de 2003, que ya he citado, Eric Cornell de la Universidad de Colorado, Premio Nobel de Física de 2001 de 42 años, dijo que lo que más furioso le ponía en aquel momento era que llegara su hijo de 5 años a casa y dijera que había estado trabajando con el ordenador en el colegio. Era superior a sus fuerzas admitir que hubiera maestros capaces de intentar enseñar a leer, escribir y calcular utilizando el ordenador.

En 1986 asistí a una reunión del comité de enseñanza de la IUPAC sobre Enseñanza de la Física en Japón. En esos momentos el boom de los ordenadores y creí que me encontraría muchos programas de enseñanza de la Física por ordenador. Sin embargo, había un aula dedicada a programas de ordenador y como diez o doce a enseñanza de la física a nivel elemental con material sencillo, de bajo costo y una parte importante procedente de la vida corriente. La última conferencia la impartió un eminente profesor japonés de Física, que nos comentó cómo explicaba la suma de movimientos vibratorios con lápiz y papel. Cuando los estudiantes ya lo habían entendido entonces sí que utilizaba el ordenador para que comprobaran como variaban las curvas de Lissajous al variar el defasaje, la frecuencia etc. Si comenzaba con el ordenador no se enteraban de nada, verían unos dibujos preciosos y nada más. Insistió que nadie duda y está plenamente demostrado que al mover la mano se actúa sobre el cerebro.

Es fundamental el cálculo porque da una gran agilidad mental. Creo que la calculadora solo la deberían usar en la universidad y como situación extrema en 2º de bachillerato. De hecho, en varios países avanzados como Alemania, China y Japón, así se hacía, espero que lo sigan haciendo al contrario de lo que sucede en España en donde se utiliza en primaria.

En cuanto al “power point” pienso que es una técnica muy interesante pero no para todo. No hace muchos años un amigo me comentó que tenía un sobrino en primero de biológicas, que era buen estudiante, siempre había tenido calificaciones brillantes y las seguía teniendo en todo salvo en Física en la que no pasaba de un tres. Me ofrecí a ayudarlo y no aceptó mi ayuda hasta ya entrado el mes de mayo. El chico me contó que en primero de bachillerato la profesora era licenciada en química y la física no la habían tocado, en segundo no cogió Física para que no le bajara la nota de selectividad y al llegar a la universidad se encontró con un profesor de física que enseñaba utilizando únicamente “power point” con lo cual no se enteraba de nada. Comenzamos la Física desde el principio, el chico era muy inteligente y cuando salió del examen final me dijo no estoy seguro que calificación tendré pero en este examen ya sabía de qué iba y qué me preguntaba. Pasó de un 3 a un 9.

El curso pasado me pidieron que ayudara a una alumna de segundo de bachillerato en química. Llevaba muchos



problemas que le ponía la profesora para hacer en casa y le pregunté, pero ¿los resolvéis en el aula? Contestación: nos pone un “power point” con el problema resuelto, pero no me entero de nada.

Un “power point” puede servir para repasar algo que se conoce, pero no para enseñar, el estudiante tiene que ver paso a paso como el profesor va haciendo el razonamiento y eso en un trabajo terminado no se ve.

**Internet:** Importante para buscar información siempre que se sepa buscar y es necesario enseñarles a buscar para que no pierdan el tiempo o se metan en algún lío.

**Páginas web son buenas** para colgar información para los alumnos, no se necesitan las fotocopias, ahora que todos los alumnos tienen su móvil es facilísimo enviarles información.

Los **vídeos** para visualizar procesos. Con relación a los vídeos podría contar otra curiosa anécdota. En 1977 en un programa que tenía la universidad de Ljubljana (Yugoslavia) para ayudar a los profesores de niveles no universitarios decidieron hacer vídeos con historietas que se desarrollaban en torno a ríos, montañas, etc. Los nombres aparecían constantemente para que los alumnos aprendieran geografía. El resultado fue que aprendieron los nombres de los artistas, pero de geografía nada.

Informe de PISA (octubre 2015) decía: “La incorporación de las tecnologías, por sí solas, no sirve para mejorar las malas prácticas docentes ni para mejorar la enseñanza ni el aprendizaje”.

## CONCLUSIONES

En enseñanza, como en muchos otros aspectos de la vida, es muy importante buscar un equilibrio entre todas las posibilidades. Nada en esencia es bueno ni malo, será interesante si se utiliza de una forma y en un momento adecuado. No existe ninguna receta para enseñar, se necesita una excelente formación en la materia, un conocimiento de todas las posibilidades de las que el docente se puede ayudar y no olvidar que enseñar es ante todo aprender.

Estaría bien que los “traficantes de teorías sobre enseñanza” hicieran menos encuestas y hablaran más con los alumnos. Antes de diseñar esas maravillosas teorías en una mesa de despacho se deberían pasar unos años enseñando.

Es imprescindible disminuir la burocracia en todos los niveles de enseñanza para que no suceda lo que en este momento en el que los profesores tienen que utilizar una gran parte de su tiempo en rellenar documentos absurdos, como programaciones o para justificar su “currículo”.

Los padres y los profesores deben tener muy presente que a los hijos y a los alumnos es necesario convencerlos de la importancia del esfuerzo y de que no todo vale, y ayudarles a adquirir una serie de hábitos y actitudes. Ambos son responsables de la enseñanza y es imprescindible la estrecha colaboración entre ellos sobre todo en niveles no universitarios.

Los políticos que se pongan de acuerdo y no cambien constantemente de planes, ni de normas y se asesoren de

buenos profesores antes de legislar. No deben olvidar que la enseñanza será de calidad si la selección de los profesores está bien hecha.

Alguien debería recordar que los derechos conllevan unos deberes y que el comportamiento ético de los profesores y de los padres, que normalmente deben aprender los alumnos y los hijos, se sigue echando en falta en nuestra sociedad.

También sería importante que se dejen de la historia de enseñanzas bilingües, que en la mayoría de los casos plantean muchos problemas a los alumnos y seleccionen bien los profesores de idiomas que será mucho más eficiente. Lo normal es que un profesor de química, aun suponiendo que domine muy bien el inglés, no tiene la viveza ni transmite el entusiasmo que tendría si enseñara en su idioma ya sea español, catalán, etc.

Sigo diciendo que el mejor tratado de pedagogía es la poesía de Gabriel Celaya.

### Educar es lo mismo

*que poner motor a una barca.*

*Hay que medir, pesar, equilibrarla*

*... y poner todo en marcha*

### Pero para eso

*uno tiene que llevar en el alma*

*un poco de marino..*

*un poco de pirata..*

*un poco de poeta..*

*y kilo y medio de paciencia concentrada.*

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Mitchell, *The Learning Tower of Babel*, 1984 Edit. Simon and Schuter, New York.
- [2] F. Blanco Prieto, *Caricaturas de Unamuno*, 2015, Exposición Diputación de Salamanca, Caricatura nº 13, Dibujo Paco Roman, publicado *Adelanto de Salamanca*, 31.12.1933.
- [3] F. Colonna, *El sueño de Polifilo*, 1449 ,Edit. Aldo Munizio.
- [4] [https://es.wikipedia.org/wiki/Siete\\_emblemas\\_de\\_la\\_Universidad\\_de\\_Salamanca](https://es.wikipedia.org/wiki/Siete_emblemas_de_la_Universidad_de_Salamanca)
- [5] <http://www.fachadausal.com/enigmas.php?id=7>
- [6] M. Martín Sánchez, “Educación Científica: problemática” en J. Ruiz Berrio, Editor, *Pedagogía y Educación ante el siglo XXI*, 2005, Departamento de Teoría e Historia de la Educación, Universidad Complutense, 449-463.
- [7] E. Carlton, Throw the monkey into the sea ... , *Times Educational Supplement*, 1996, 6/12.
- [8] M. Martín Sánchez, Fluostannatos y Bromocadmiatos metálicos, *Acta Salmanticensiae*, 1963, VI (2),61-73, Recogido en Gmeling’s *Hanburch der Anorganischen Chemie*, Verlag Chemie, 1975,46(8), 178.
- [9] J. Walker, *Feria Ambulante de la Física*, 1979, Limusa, México.
- [10] B. Shakkashiri, *Chemical Demonstrations. A handbook for Teachers of Chemistry*, 4 volúmenes, 1983-1992, The University of Wisconsin Press, USA.
- [11] M. Martín y M.ª T. Martín, *Pruebas de las XV primeras Olimpiadas Internacionales de Química*, 1988, ICE Universidad de Salamanca.

- [12] M. Martín y M.<sup>a</sup> T. Martín, *Pruebas de las XV primeras Olimpiadas Internacionales de Física*, **1989**, ICE Universidad de Salamanca.
- [13] J. P. Astolfi, Desarrollo de un currículo multirefereenciando para hacer frente a la complejidad de los aprendizajes científicos, *Enseñanza de las Ciencias*, **1998**, *16*(3), 375-385.
- [14] M. Martín, Investigación en Enseñanza de las Ciencias. Por qué y cómo, *Alambique*, **2002**, *34*, 30-36.
- [15] H. A. Bent and James D. Power Yo can't win, *J. Chem. Edu.* **1975**, *52*(7), 448-450.
- [16] M. A. Rau, K. Lucas Oxtoby, M. Bollom, J. W. Moore Unpacking "Active Learning": A Combination of Flipped Classroom and Collaboration Support Is More Effective but Collabora-  
tion Support Alone Is Not *J. Chem Edu*, **2017**, *94*(10),1406-1414.
- [17] M. Unamuno. Arabesco Pedagógico, **1909**, *XI*, 291.
- [18] R. Moreno Castillo, Esfuerzo, constancia y estudio bases de la Reforma Educativa, *ABC*, 22/2/**2018**, 14.
- [19] D. Herron, J. Using Research in Chemical Education to improve My Teaching, *J. Chem. Edu.* **1984**, *61* (10), 850-854.
- [20] W. De Vos and A.H. Verdonk, Anew Road to Reactions, part 5 The elements and its atoms. *J. Chem. Edu.* **1985**, *64* (12), 1010-1013.
- [21] D. Herron, J. *The Chemistry Classroom. Formulas for successful Teaching*, **1996**, American Chemical Society, Washington.



**Scope:**

- Analytical Electrochemistry
- Bioelectrochemistry
- Electrochemical Energy Storage and Conversion
- Electrochemical Process Engineering
- Fundamental Electrochemistry
- Material Electrochemistry
- Molecular Electrochemistry

**Contact:**  
39gerseq@gmail.com

# XXXIX Meeting GE-RSEQ & 3<sup>rd</sup> 3E-Mediterranean Symposium

www.39gerseq.com



**Deadlines:**

July

Abstracts: March 10<sup>th</sup>  
Registration: June 15<sup>th</sup> **2<sup>nd</sup> - 5<sup>th</sup>, 2018**



Real Sociedad Española de Química



**Faculty of Medicine**  
**University Complutense of Madrid**



## Tres artistas y su material de laboratorio: George Brecht, Víctor Grippo y Hermann Nitsch

Santiago Alvarez

**Resumen:** Tres artistas contemporáneos, dos de los cuales eran también químicos, han empleado de forma destacada el material de vidrio del laboratorio químico en su obra. En este artículo se ofrece una semblanza de dichos artistas y de la relación de su obra artística con la química, y se establecen algunas analogías y contrastes entre ellos.

**Palabras clave:** Material de laboratorio; arte contemporáneo; arte conceptual; biografías de químicos.

**Abstract:** Three contemporary artists, two of whom were also chemists, have employed in a prominent way the glassware of the chemical laboratory in their works. In this article a biographical sketch of those artists is presented, the relationship between their artistic expression with chemistry is discussed, and some analogies and differences between them are analyzed.

**Keywords:** Glassware; contemporary art; conceptual art; biographies of chemists.

### INTRODUCCIÓN

Si los laboratorios de los alquimistas se encuentran ampliamente representados en obras de arte de los siglos XVII al XIX,<sup>[1]</sup> la impresión general es que, una vez desaparecidos los alquimistas, en los siglos XX y XXI los artistas han dejado de interesarse por la química. Es cierto que existen algunas obras aisladas relacionadas con la química, como es el caso de *Peace through Chemistry* (1970) de Roy Lichtenstein, o de *Synthesis* (1947, un encargo de la empresa N V Synthese de La Haya, fabricante de plásticos)<sup>[2]</sup> de Maurits Escher, sobre la cual llamaba la atención recientemente José Elguero en esta revista.<sup>[3]</sup> De la obra del escultor y físico cuántico Julian Voss-Andreae y algunos otros, así como de la presencia de la química en el cine y los cómics, me he ocupado en un artículo previo.<sup>[4]</sup> Este artículo pretende hacer una breve introducción a la obra de tres artistas contemporáneos que utilizaron de forma intensiva el material de vidrio del laboratorio químico. A ellos se puede añadir Tony Cragg (Liverpool, 1949),<sup>[5]</sup> más conocido como escultor, que después de hacer una escultura con seis piezas de laboratorio en aluminio colado produjo en 1988 una serie de cuatro grabados bajo el título *Laboratory Still Life* (Bodegón de laboratorio).<sup>[6]</sup>



S. Alvarez

Departament de Química Inorgànica i Orgànica, Secció de Química Inorgànica, e Institut de Química Teòrica i Computacional, Universitat de Barcelona.  
Martí i Franquès 1-11, 08028 Barcelona.  
C-e: [santiago@qi.ub.es](mailto:santiago@qi.ub.es)

Recibido: 24/11/2017. Aceptado: 22/12/2017.

### GEORGE BRECHT<sup>[7]</sup>

George Brecht es el nombre artístico de George Ellis MacDiarmid (New York, 1926 – Colonia, 2008), artista conceptual y compositor vanguardista estadounidense, a la vez que químico profesional. Después de la segunda guerra mundial estudió química en el Philadelphia College of Pharmacy and Science, y trabajó como químico entre 1950 y 1965 para empresas como Johnson & Johnson (con la que registró cuatro patentes de tampones y aplicadores), Pfizer y Mobil Oil. En 1958-1959 asistió a cursos de composición musical impartidos por John Cage y a principios de la década de 1960 enseñó en el departamento de arte de la Rutgers University. En 1965 se trasladó a Europa y vivió sucesivamente en Roma, Villefranche sur Mer (cerca de Niza), Londres y Düsseldorf, para acabar afincándose en Colonia en 1972.

Su carrera artística profesional se inicia en 1959 con el espectáculo *Toward Events*, en la Reuben Gallery de New York. Inspirándose en el arte conceptual de Marcel Duchamp y la música experimental de John Cage, Brecht desarrolló una modalidad de arte basado en elementos cotidianos o en el lenguaje. Fue uno de los participantes destacados del grupo de artistas conocido como *Fluxus*, junto a Joseph Beuys, Wolf Vostell, Nam Jun Paik y Yoko Ono, entre otros. Los miembros de este movimiento no tenían objetivos ni métodos comunes, solo la convicción de que las fronteras del arte son mucho más amplias de lo que parecían convencionalmente. Considerado uno de los precursores del arte conceptual, Brecht describía su arte como una forma de “asegurarse de que los detalles de la vida cotidiana, las constelaciones aleatorias de objetos que nos rodean, dejen de pasar inadvertidos”.

Una parte representativa de la obra de Brecht son sus *eventos*, para cada uno de los cuales escribía una “partitura de evento”, que explicaba así:



Figura 1. George Brecht, químico y artista conceptual estadounidense-europeo

Al componer música, el compositor permite una experiencia organizando una situación en la que se genera sonido. Si una partitura musical (partitura de sonido) prepara una situación musical (sonido), la partitura de evento nos prepara para eventos en todas las dimensiones...

De esa manera, un evento se puede reproducir numerosas veces con la misma partitura, incluyendo los matices propios de cada intérprete. Un ejemplo de una de esas "partituras" es la de una escalera de mano (1962):

- ESCALERA

Pintar una escalera de mano sencilla de blanco.

Pintar el primer peldaño de negro.

Distribuir los colores espectrales en los demás peldaños.

De forma natural, entre los objetos cotidianos que Brecht emplea en sus obras de arte aparece frecuentemente material de laboratorio, así como conceptos y objetos que

reflejan su experiencia como químico. Así, *Burette Music* marca el inicio de la *Drip Music* (1959-1962) y es una de sus obras musicales más conocidas y representadas. Consiste en hacer caer gotas de agua desde una bureta sobre una ristra de hélices metálicas (sonido) y de papel (no sonido) que cuelgan de un cordel. En sus notas aparecen los cálculos de las posibles frecuencias de caída de las gotas, desde rápida (300 por minuto) hasta lenta (24-36 por minuto); basando sus cálculos en un volumen de 0.05 cc por gota, prevé que el evento pueda durar (con una bureta de 50 cc) desde 3 minutos 1/3 hasta 33 minutos 1/3. Una poética instalación más reciente de Jaume Plensa, *Wisperm* (Pollensa, 2002),<sup>[8]</sup> se puede ver como una reinterpretación de la *Drip Music* de Brecht.

La obra *The Chemistry of Music*, un proyecto presentado en Londres en 1968, pretende redefinir el "arte" de la conferencia, criticando en clave humorística el formato de la lección magistral como método predominante en la enseñanza. La "conferencia" incluye diapositivas, palabras, música y actuación, y concluye con fuegos artificiales. Una secuela de esa experiencia es una colección de diecisiete collages titulada *Experimental Enlargement: The Chemistry of Music*, hecha en 1969 y editada en Verona en 1988 en forma de serigrafías en negro y gris sobre tela. Algunos de los títulos de esas piezas son *Tubos de goma*, *Embudo de seguridad*, *Sin título (hombre con flauta alemana)*, *Sin título (batería)*, *Ningún ruido es buen ruido*, *El mecanismo de una tecla de piano*, o *Sin título (oboe, cinco manos)*. En ellas aparecen tubos de ensayo, tubos de vidrio y de goma que se ensamblan junto con pentagramas, o tubos de combustión con productos químicos que desprenden en vez de gases alguna nota musical, o que se ensamblan con un mecanismo musical como una tecla de piano (Figura 2, izquierda). En uno de ellos (Figura 2, derecha), un músico toca una flauta travesera que acaba en un tubo de vidrio del cual destila una gota que cae sobre un tubo de ensayo, evidente homenaje a su padre, flautista de la Metropolitan Opera Orchestra y de la NBC Radio Orchestra, que murió cuando Brecht tenía 8 años.

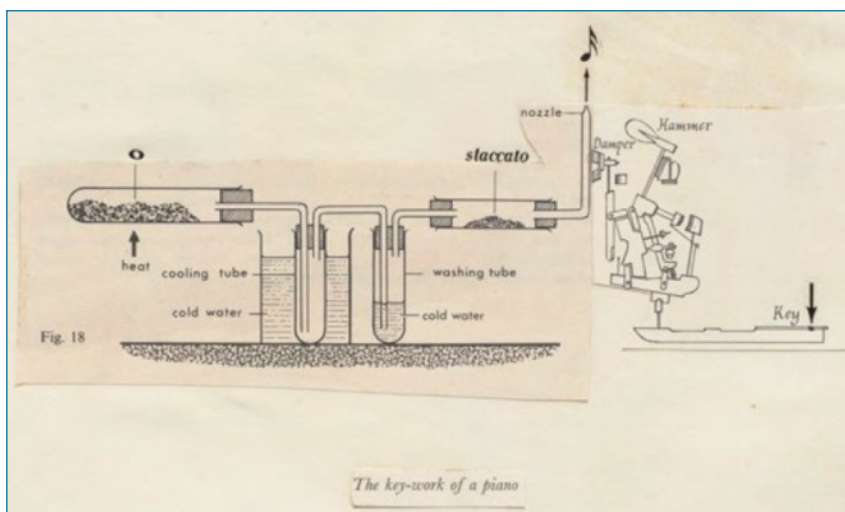


Figura 2. *The key-work of a piano* (El mecanismo de la tecla de un piano), izquierda, y *Untitled (Man with a German Flute)*, derecha, de la serie *Experimental Enlargement: The Chemistry of Music*, de George Brecht, 1969

Poco después de establecerse en Colonia, Brecht empezó a dedicarse al crecimiento de cristales en su apartamento, fruto de su interés por la química y por “los intermedios entre ciencia y arte”.<sup>[9]</sup> Ese trabajo culmina en su obra *Crystal Boxes* (1976-79), una colección de cajas cuadradas que contienen una cápsula de Petri en el centro con atractivos cristales (de sulfato de cobre, por ejemplo), y una serie de pequeños compartimentos en el perímetro que contienen dados, amuletos y otros objetos simbólicos o metafóricos. Estas y otras piezas de Brecht siguen la pauta de los conocidos montajes en pequeñas cajas de Joseph Cornell.

### VÍCTOR GRIPPO<sup>[10]</sup>

Víctor Grippo (1936-2002) pintor, grabador y escultor argentino, nació en Junín, provincia de Buenos Aires, hijo de un inmigrante italiano y una argentina de origen albanés. Estudió Farmacia en la Universidad de La Plata y asistió a seminarios en la Escuela de Bellas Artes. Ha sido reconocido como uno de los artistas más destacados del arte conceptual que ha conjugado conceptos tradicionalmente opuestos como arte y ciencia, naturaleza y cultura, o realidad o ficción. En 2002 la Fundación Konex de Argentina le concedió su máximo galardón, el Premio Konex de Brillante, uno de los más prestigiosos del país, como la personalidad más importante de las artes visuales de la última década. Antonio Trotta,<sup>[10]</sup> lo describía así:

Víctor Grippo, con su imagen tan intelectual y su cuerpo que parecía inexistente, sólo los anteojos brillaban en la flacura de su figura. Refinado conocedor de todo lo que es posible conocer: literatura, poesía, filosofía, marxismo, teología, arqueología, mayas o etruscos, incas o griegos, Rilke o Byron.

Su trabajo ha girado siempre en torno a la vida cotidiana, el mundo del trabajo, el alimento y la energía. Desde el principio utilizó materiales y medios no convencionales en sus objetos, esculturas e instalaciones, para reflexionar en torno a las condiciones sociales y espirituales de las personas. Su fascinación por las herramientas sencillas como el tenedor, el clavo o el martillo se refleja en las múltiples obras en que aparecen esas herramientas, a las que se unen también los materiales del laboratorio químico. Todo ello visto como instrumentos de transformación, en la convicción de que el artesano-artista actúa como un alquimista, y transforma la materia en ideas y metáforas.

Una de las materias primas más celebrada de sus obras es la patata. Procedente del medio rural, Grippo utiliza de forma recurrente patatas y mesas en su obra. El artista convierte las patatas en pilas eléctricas introduciendo un electrodo de cobre y otro de zinc en cada una, de manera que el ácido ascórbico del tubérculo reacciona con el zinc por vía electroquímica, produciendo energía. Las patatas se conectan entre sí con cables para hacer funcionar diversos dispositivos, desde una radio hasta un *tester* que mide



Figura 3. Víctor Grippo, químico y artista conceptual argentino

la energía generada. En este ámbito, una de sus obras más conocidas, *Analogía I* (Figura 4), es una de las dos primeras instalaciones de una serie de cuatro que Grippo realizó entre 1970 y 1991. Sobre una mesa larga se amontonan grandes cantidades de patatas, las cuales están interconectadas en grupos de entre 3 y 5 unidades. Estos grupos están unidos entre sí también mediante cables, formando agrupaciones cada vez más grandes, hasta que los dos últimos cables sueltos conectan todo el patatal a un voltímetro. Cuando el espectador pulsa un botón, la aguja del voltímetro muestra la cantidad total de energía generada por las patatas. Igual que en el ciclo de la vida y la muerte en la existencia humana, las patatas también “mueren” después de un tiempo y su energía vital va disminuyendo, como indica el voltímetro, hasta que esas patatas son substituídas por otras frescas, empezando un nuevo ciclo.

La germinación de las patatas inspiró otras obras, como *Todo en marcha* (1973), donde se muestran varias patatas

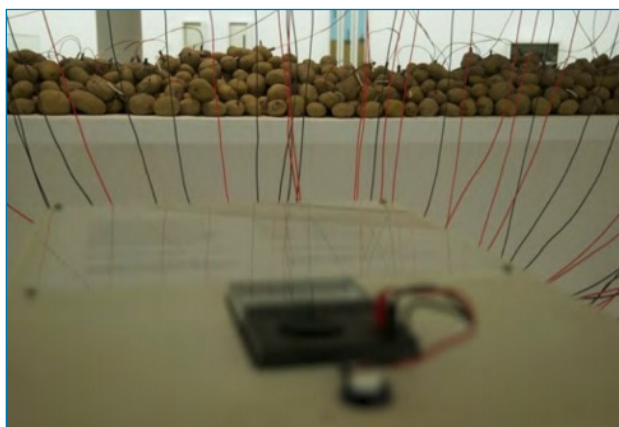


Figura 4. *Analogía I*, Víctor Grippo, Santiago de Compostela, 2013. Foto: S. Alvarez

con diferentes grados de germinación, mientras en un kitasato vecino unas patatas en descomposición desprenden gases que son conducidos a través de un tubo de goma a un frasco de Wolf, de manera que el burbujeo del líquido coloreado que contiene el frasco delata la emisión de los gases.

Los textos que acompañan esta instalación rezan así:

Del hedor de la desintegración escondida viene un perfume muy dulce, que resulta de la vida y el calor (texto alquímico).

El olor gradualmente disminuye hasta que todas las partes blandas extendidas forman un detrito gris y burbujeante en el suelo, con un olor dulce y aromático (observación de la putrefacción de un cadáver humano hecha por científicos franceses a principios del siglo xx).

La cita de un texto alquímico por Grippo no es baladí, ya que éste tenía un gran interés por la alquimia, especialmente en su vertiente transformadora y espiritual. Así se refleja en diversas obras de 1983 en las que emplea yeso pintado de negro, *Matraz*, *Palingenesia* y *Crisol de alquimia* (Figura 5).

En 1976 introduce sus “valijitas”, objetos transparentes con un asa de metal que contienen diversos objetos, en la línea de Joseph Cornell y George Brecht: *Valijita de panadero* (1977), *Valijita de crítico sagaz* (1978). A partir de 1980 Grippo utiliza dos nuevos formatos, las vitrinas y las “cajas” de madera con cubierta de vidrio que contienen herramientas de los diversos oficios, máscaras, panes, matraces y crisoles. Entre las vitrinas de Grippo, las más famosas serán en 1980, *Vida, muerte, resurrección* (Figura 6), un conjunto de tres piezas, la mayor de las cuales opone, a una serie de cuerpos geométricos realizados en plomo, otra idéntica pero rellena de legumbres húmedas. Al germinar, las semillas hacen estallar el envase que las contiene. Esta instalación, que forma hoy parte de la colección del MoMA de Nueva York, recuerda a *Brunch's Stones* de Brecht, con sus cubos y conos.



Figura 5. *Crisol de alquimia*, Víctor Grippo, 1983. Foto: S. Alvarez

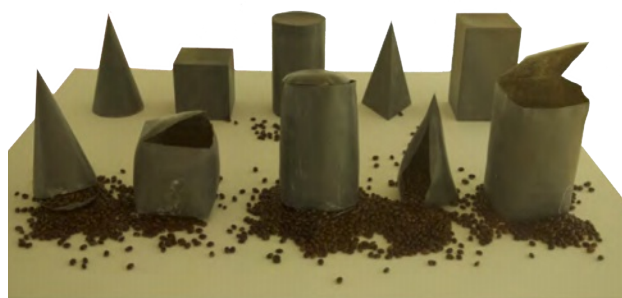


Figura 6. *Vida, muerte y resurrección*, Víctor Grippo, 1980. Foto: S. Alvarez

Otras creaciones de Grippo claramente influenciadas por la química son *Abstracción simbólica de una destilería* (maqueta), objeto destruido posteriormente, y la muestra *Frate Focu* (Hermano fuego, 1983) con cajas blancas que contienen ramas de rosal, máscaras, objetos de plomo y grafito, que han sufrido alguna forma de tratamiento con fuego.

#### HERMANN NITSCH<sup>[1]</sup>

Hermann Nitsch (Viena, 1938), el máximo exponente del Accionismo Vienés desarrolló su idea del *Orgien Mystieren Theater* (Teatro de Orgías y Misterios) entre 1957 y 1960. Para Nitsch, la representación de actos orgiásticos y onanistas, con la escenificación de ritos sacrificiales, permite una liberación catártica de tabúes religiosos, morales y sexuales. Nitsch pintaba siguiendo la técnica tachista, vertiendo directamente pintura sobre la tela o pintando incluso con las manos. A partir de 1961 empezó a trabajar con animales sacrificados, usando su sangre como pintura. A medida que el número de participantes en sus acciones crecía, algunos ejercían de actores pasivos, siendo colgados en crucifijos y salpicados con sangre, mientras otros restregaban las entrañas de los animales sacrificados sobre la tela. El planteamiento artístico de Nitsch no podía menos que generar controversia, llevándole en tres ocasiones a la prisión. Se dice que su obra ejemplifica la fascinación de la cultura por la violencia. A partir de los años 90 sus instalaciones recorren el planeta mostrando diversos objetos, telas, partituras y proyectos de diseño gráfico que reflejan su experiencia artística, en la que fluyen el teatro, la pintura, la música, la fotografía, el vídeo y la actuación.

No puedo evitar poner como antítesis de la “pintura de sangre” de Nitsch una obra de Joan Pere Viladecans, *La sang infectada* (1997-1999), en la que los colores marrones se obtienen con Betadine, es decir, solución de yodo en yoduro de potasio, o *tintura de yodo*. También Turner había usado el yodo en sus pinturas, aunque sólo por su color, sin hacer alusiones a la dualidad entre heridas y curación.

En 1971 Nitsch compró el castillo de Prinzerdorf en Austria, que se convirtió en la sede de su *Orgien Mystieren Theater*. Poco después entró en contacto con Giuseppe Morra de Nápoles, que se convirtió en su editor y galerista.



**Figura 7.** Hermann Nitsch, artista accionista austriaco, 2012. Licencia CC BY-SA 3.0

ta, y publicó sus planteamientos teóricos y las partituras de sus producciones teatrales. También Morra es responsable de la fundación del museo Hermann Nitsch<sup>[12]</sup> en Nápoles, ubicado en lo alto de una colina, en un edificio de tipología industrial de finales del siglo XIX originalmente destinado a una planta eléctrica, y al cual se llega a través de callejones y recovecos empinados y estrechos. En el exterior, una amplia terraza ofrece excelentes vistas de la ciudad y su bahía. En el interior, dos pisos sostenidos por columnas y vigas de hierro pintadas de negro ofrecen un espacio diáfano adecuado para exposiciones (Figura 8).

En ese espacio se puede ver desde abril de 2016 la exposición *Arena. Opere dall'opera*. Esta presenta una amplia colección de “derrelictos” provenientes de las acciones teatrales de Nitsch desde los años sesenta hasta la actualidad. Se trata de una amplia variedad de objetos, dispuestos en mesas, tarimas y estanterías, flanqueados en las paredes por fotografías de los eventos artísticos organizados por Nitsch, y de pinturas en paredes y techo, más alguna que otra pantalla que proyecta grabaciones de los mismos eventos. De fondo, música del propio Nitsch. Los eventos fotografiados son rituales con vísceras y sangre de animales, de los cuales no doy más detalles para no herir sensibilidades. Los cuadros, de gran tamaño, son telas blancas con restos de sangre, de tal manera que el hierro de la hemoglobina oxidado constituye el pigmento marronoso de todos ellos.

En cuanto a los objetos expuestos, aparecen perfectamente alineados instrumental quirúrgico, apósitos y gasas, crayones de colores, paneles con muestras de colores, terrones de azúcar, saquitos con pigmentos, matraces, probetas, embudos, tubos de ensayo, frascos de reactivos, erlenmeyers vacíos o con sustancias de colores, pipetas, matraces aforados, velas de cera, balones con tubuladura lateral, vasos de precipitados, serpentines... Dispersos en medio de esta colección de objetos aparecen elementos litúrgicos como cálices –uno de ellos al lado de sendas cacerolas–, una custodia, estolas, casullas o alguna ima-



**Figura 8.** Aspecto general de la primera planta de la instalación *Arena. Opere dall'opera* de Hermann Nitsch en el Museo Nitsch de Nápoles (2017). Foto: S. Alvarez

gen religiosa. Para poder alojar esos objetos, las cajas de Cornell y las valijitas de Grippo cambian de escala en manos de Nitsch y se convierten en grandes estanterías.

Los críticos de arte y periodistas no dan pistas sobre el papel que juega la ingente cantidad de material de laboratorio en la instalación de Nitsch, más interesados por la parte anatómico-forense de su arte. Sin embargo, la incorporación de recipientes de vidrio con líquidos de colores a las instalaciones de Nitsch se remonta a unas cuantas décadas atrás, ya que en 1965 inauguró una instalación titulada *La Farmacia (Die Apotheke / The Pharmacy)*,<sup>[13]</sup> que ha sido presentada en diversos países durante todos estos años, recalando en 2011 en Nueva York.

En esa obra presentaba ya pequeños frascos de vidrio con fluidos de colores (trasunto de los fluidos corporales de sus acciones), las cápsulas de porcelana, los matraces aforados y las probetas, junto a un interés por los pigmentos y los sólidos de colores en general. Los cientos de artilugios de vidrio tomados en préstamo de los laboratorios químicos presentes en su obra más reciente, no son, pues, una nueva incorporación, sino un desarrollo de una tendencia ya instaurada en la obra de Nitsch.

El material de laboratorio comparte el papel de fetiche con los demás elementos de la exposición ya comentados. Por otro lado, a Nitsch los reactores químicos y los procesos que en ellos tienen lugar le recuerdan el cuerpo y sus fluidos, que constituyen el leitmotif de su carrera artística. También se ha de tener en cuenta que al esparcir vísceras y sangre sobre sus telas se produce una transformación que deja como residuo un pigmento, lo que es simbolizado en algunos de sus matraces por los restos también de tonos marrones de procesos de evaporación o de fermentación.

Con un poco de suerte, como me ocurrió a mí, al concluir la visita a la exposición se puede ver pasar al artista (para presidir un acto sobre “La scuola nei Musei” en mi caso), que con un andar lento y majestuoso desplaza su oronda anatomía y su amplia barba blanca, con un aspecto de entre profeta, obispo ortodoxo y carnicero.

## EPÍLOGO

Los tres artistas contemporáneos que coinciden en este artículo tienen diversos puntos de contacto, aparte de compartir una misma época. El que parece más evidente en el presente contexto es su utilización de instrumental del laboratorio químico en sus obras, ya sea como objetos (Grippe y Nitsch) o mediante representación (Brecht). Dos de ellos (Brecht y Grippe) tienen en común haber recibido una formación como químicos, mientras que Brecht y Nitsch comparten la composición musical. Por otro lado, Grippe y Nitsch coinciden en su fascinación por los procesos de fermentación y putrefacción, así como por los fluidos coloreados. Brecht y Grippe también utilizan cajas para exponer pequeñas colecciones de objetos cotidianos con carga metafórica –al estilo de Joseph Cornell, a medio camino entre la escultura, el coleccionismo y la poesía visual de Brossa–, que en el caso de Grippe se acaban convirtiendo en vitrinas, mobiliario que también incorpora Nitsch a sus instalaciones. Las mesas con material

de laboratorio que utilizan tanto Grippe como Nitsch me parecen un trasunto del “Laboratorio en casa” con que el perfumista Septimus Piesse (Figura 9) ilustraba su libro de divulgación sobre las maravillas de la química,<sup>[14]</sup> estableciendo un puente con el arte de los perfumes.

## REFERENCIAS

- [1] A. R. Greenberg, *The Art of Chemistry*; Wiley-Interscience; New York, 2003; A. R. Greenberg, *From Alchemy to Chemistry in Picture and Story*; Wiley-Interscience; New York, 2007; S. Alvarez, *De dones, homes i molècules. Notes d'història, art i literatura de la química*; Edicions de la Universitat de Barcelona; Barcelona, 2017.
- [2] J. L. Locher, ed. *M. C. Escher, His Life and Complete Graphic Work*, Abradale Press, New York, 1992.
- [3] J. Elguero, *An. Quím.* 2017, 113, 151.
- [4] S. Alvarez, *Educ. Quím. EduQ* 2013, 4-18.
- [5] Tony Cragg: <http://www.tony-cragg.com>,
- [6] Laboratory Still Life de Tony Cragg: <http://www.tate.org.uk/art/artworks/cragg-laboratory-still-life-no-3-p77291>,
- [7] A. Dezeuze, *Papers of Surrealism* 2005, 1-11; J. Robinson, *George Brecht. Events - Eine Heteroperspektive - A Heteroperspective*, Walter König; Colonia, 2005.
- [8] A. VV, *Jaume Plensa. Wispern*; Ajuntament de Pollença; Pollença, 2002.
- [9] M. Nayman, en *George Brecht*; Gagosian Gallery, 2004, 64.
- [10] A. Longoni. Tesis doctoral; *Vanguardia y revolución. Ideas y prácticas artístico-políticas en Argentina de los años '60/'70*, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2004.
- [11] Hermann Nitsch: <http://www.nitsch.org/index-en.html>,
- [12] Museo Nitsch, Nápoles: <http://www.museonitsch.org>,
- [13] Die Apotheke / The Pharmacy: <http://koenigandclinton.com/exhibitions/hermann-nitsch-die-apotheke-the-pharmacy/>
- [14] G. W. S. Piesse, *The Laboratory of Chemical Wonders*; Longman, Green, Longman, and Roberts; Londres, 1860.

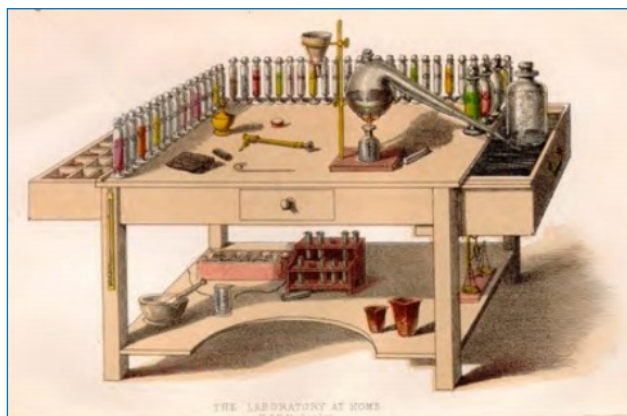


Figura 9. George William Septimus Piesse (1820-1882), químico y perfumista inglés, “The Laboratory at Home”<sup>[14]</sup>



# Desarrollo de nuevos materiales mediante el ensamblado de nanopartículas

Marek Grzelczak<sup>[1,2]</sup>

**Resumen:** El reciente aumento en la complejidad experimental y el desarrollo teórico en el campo del ensamblado de nanopartículas ha tenido una importante contribución en la mejora sobre el control de la organización de nanoestructuras tanto en sustratos sólidos como en fase líquida, así como en su predicción. En la actualidad, el ensamblado de nanopartículas cambia de rumbo desde la nanofabricación estática, dirigida a la fabricación de nuevos dispositivos en fase sólida, hacia sistemas dinámicos con propiedades más características de la materia viva. Este artículo pretende resumir los últimos avances en ambas áreas, indicando los retos a los que se enfrenta esta línea de investigación en el futuro.

**Palabras clave:** Auto-organización, Ensamblado, Nanopartículas, Química de materiales, Nanofabricación.

**Abstract:** Self-assembly of nanoparticles has become increasingly complex on both experimental and theoretical levels. Synthetic methods and the diversity of available building blocks, have contributed to better control and prediction of the spatiotemporal distribution of nanoparticles on solid substrates or in a liquid phase. The innovation perspectives are shifting today from the bottom-up fabrication of solid-state devices for electronics to life-inspired systems with spatiotemporal features. This article discusses two main trends in nanoparticle self-assembly – static and dynamic - with the aim to draw the picture toward future directions.

**Keywords:** Self-organization, Self-assembly, Nanoparticles, Chemistry of materials, Nanofabrication.

## INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se han desarrollado multitud de materiales a escala nanométrica con diversas propiedades, suscitando un importante interés en áreas como la fotónica, el magnetismo, la catálisis o la medicina.<sup>[1,2]</sup> El avance en la optimización de los protocolos de síntesis y los métodos de caracterización han permitido establecer una relación entre las propiedades ópticas, magnéticas e incluso catalíticas de las nanopartículas con la morfología, la estructura cristalina y la composición superficial de las mismas. Aunque el campo dedicado a la fabricación de nanopartículas permanece activo, se ha establecido en paralelo un área de investigación especializada en la organización de las mismas utilizando las herramientas experimentales características de la química física, la química orgánica y la química supramolecular. En la actualidad, se distinguen dos tendencias destacadas dentro de esta línea de investigación. Se está desarrollando una línea de investigación en el contexto de una ciencia aplicada con el objetivo de desarrollar nuevos materiales para su integración en dis-

positivos electrónicos como transistores, celdas solares o sensores.<sup>[3]</sup> Por otro lado, se está desarrollando una línea de investigación puramente fundamental con el fin de estudiar las distintas interacciones existentes entre nanopartículas en fase líquida.

Dado que un aumento de entropía conlleva a un mayor desorden del sistema, puede resultar contradictorio que el ensamblado estático de nanopartículas sea un proceso entrópico<sup>[4]</sup> puesto que este tipo de organización da lugar a la formación de estructuras cristalinas. La entropía mide el grado de organización de un sistema, y en este caso el sistema está compuesto por nanopartículas y moléculas del disolvente, lo que implica que unas partes del sistema contribuyen en una disminución de la entropía total del sistema, y otras hacen que aumente.<sup>[5,6]</sup> Un ejemplo de este fenómeno es el proceso de cristalización coloidal (Figura 1 - izquierda), donde se produce un aumento de la entropía del sistema durante la formación de la fase ordenada (orden visible). Para que el valor de entropía del sistema aumente, el volumen existente entre las nanopartículas debe aumentar también, esto se traduce en una distribución eficiente de las moléculas de disolvente. En otras palabras, el orden al nivel de las nanopartículas (orden visible) se compensa mediante el desorden a nivel molecular.<sup>[7]</sup> Este fenómeno explica por qué el tipo de ordenamiento cristalino preferente es el cúbico, en el cual se maximiza el volumen libre de cada nanopartícula. Recientemente D. Frenkel ha publicado un artículo en que estudia el efecto entrópico durante el proceso de ensamblado.<sup>[8]</sup>

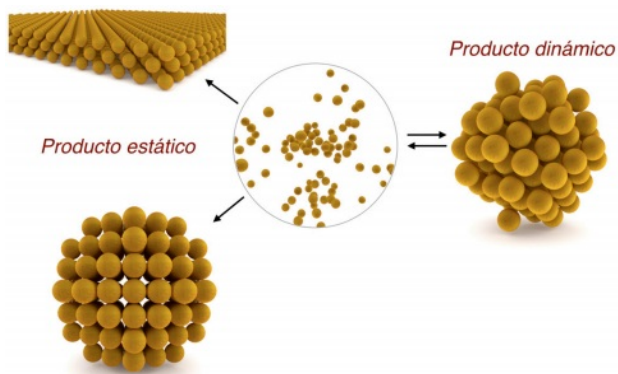
El ensamblado dinámico es un proceso reversible que tiene lugar mediante la aplicación de un estímulo externo



M. Grzelczak

Donostia International Physics Center (DIPC)  
Paseo de Manuel Lardizabal 4  
20018 Donostia-San Sebastián  
C-e: [marek.grzelczak@dipc.org](mailto:marek.grzelczak@dipc.org)

Recibido: 23/10/2017. Aceptado: 22/12/2017.



**Figura 1.** Ensamblado de nanopartículas estático y dinámico. La evaporación del disolvente de la dispersión de nanopartículas conduce a su cristalización en forma de películas o cristales esféricos de forma irreversible. La aplicación de un estímulo externo (aditivos, luz, temperatura) a la dispersión coloidal produce un ensamblado dinámico metaestable, con la capacidad de recuperar el estado inicial mediante la supresión del estímulo externo

como el tipo de disolvente, ciertos aditivos, la temperatura, la luz o el campo magnético. El estado organizado se mantiene mediante un balance entre fuerzas entrópicas y energéticas. En los sistemas dinámicos, la eliminación del estímulo externo dirige el sistema hacia el estado inicial facilitando la dispersión de las nanopartículas.

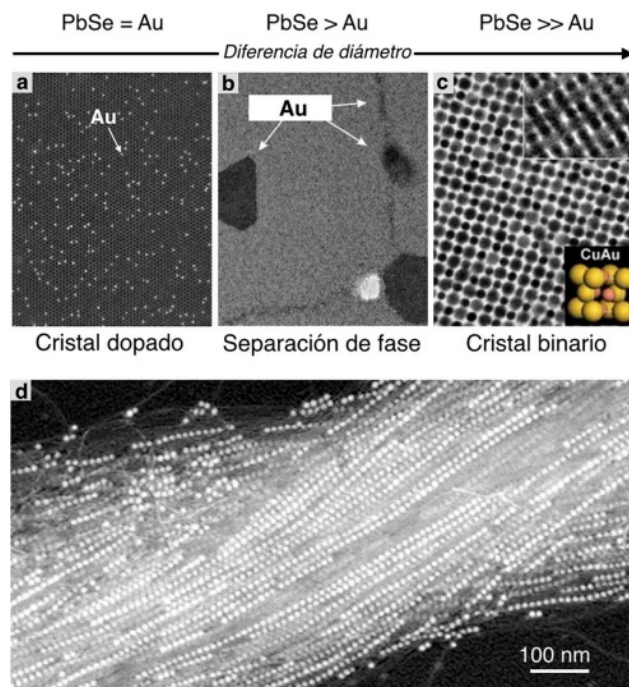
Ambos procesos de ensamblado, estático y dinámico, se han explorado para nanopartículas de diferente forma y composición, pero en la mayoría de los ejemplos se ha utilizado un solo tipo de nanopartícula, estos sistemas son también llamados unitarios. La complejidad del proceso aumenta mediante la incorporación de otras nanopartículas (sistemas binarios o ternarios), provocando por ejemplo procesos de separación de fase o formación de estructuras amorfas. Las líneas actuales de investigación centradas en el desarrollo de sistemas binarios o ternarios se limitan al estudio de las condiciones experimentales óptimas donde diferentes tipos de nanopartículas se organizan de forma complementaria. La complementariedad de distintos tipos de nanopartículas ofrece múltiples beneficios como por ejemplo la emergencia de nuevas propiedades, frecuentemente no esperadas.<sup>[9]</sup>

Este artículo pretende ofrecer una revisión breve de los recientes avances en la organización estática y dinámica de nanopartículas, haciendo énfasis en aquellos ejemplos experimentales cuyos objetivos han sido controlar la formación de estructuras compuestas por más que un tipo de nanopartícula.

## ENSAMBLADOS ESTÁTICOS

El método más accesible para la formación de superestructuras es sin duda el ensamblado mediante evaporación del disolvente. Este método tiene su origen en el campo de la cristalización coloidal y se explica mediante el modelo de “esferas rígidas”.<sup>[7]</sup> Las esferas (nanopartículas) se repelen a lo largo del proceso de organización, pero mediante la evaporación del disolvente y el consecuente aumento de la concentración tiene lugar la transición de fase de

líquida a cristalina. La analogía entre un cristal coloidal y la red cristalina atómica permite estudiar las nanopartículas como entes análogos a los átomos, facilitando así la proyección de posibles estructuras e incluso predecir la formación de nuevos sistemas binarios. El grupo de investigación coordinado por C. B. Murray ha contribuido en el desarrollo de nuevas estructuras utilizando nanopartículas esféricas de diferentes tamaños y composición, aplicando como método experimental la evaporación de una suspensión coloidal de nanopartículas en hexano sobre la superficie de otro líquido inmiscible como el dietilenglicol.<sup>[10]</sup> El producto final es la formación de una película de nanopartículas organizadas en la interfase aire-líquido. El grupo de Murray ha demostrado que para obtener un cristal binario, compuesto por dos subredes cristalinas, es necesario utilizar nanopartículas de diferentes tamaños, por ejemplo, Au (3 nm) y PbSe (6.2 nm). Cabe destacar que solamente estos dos tipos de nanopartículas pueden producir hasta once tipos de redes cristalinas (Figura 2c muestra un tipo). El uso de nanopartículas cuyos diámetros presentan poca diferencia provoca la separación de fases (Figura 2b), donde las nanopartículas más grandes (Au 6.5 nm) forman dominios en la red cristalina de las nanopartículas más pequeñas (PbSe 5.5 nm).<sup>[11]</sup> La utilización de nanopartículas cuyos diámetros son similares conduce a la incorporación aleatoria de las nanopartículas



**Figura 2.** Efecto del tamaño y la geometría de las nanopartículas en la formación de ensamblados binarios mediante la evaporación del disolvente. (a-c) Diversidad de organización estructural obtenida mediante el empleo de nanopartículas de diferentes diámetros. (a) El uso de nanopartículas con diámetros similares permite obtener un cristal dopado donde las nanopartículas que se encuentran en menor concentración actúan como un agente dopante. (b) Una pequeña diferencia entre el valor de los diámetros de las nanopartículas produce separación de fase. (c) Una diferencia superior entre el valor de diámetros de las nanopartículas conduce a la formación de un cristal binario. (d) Ensamblado binario obtenido mediante el uso de nanopartículas de diferentes morfologías: nanohilos y esferas de oro. Durante la evaporación, los nanohilos dirigen la formación de cadenas de nanopartículas esféricas

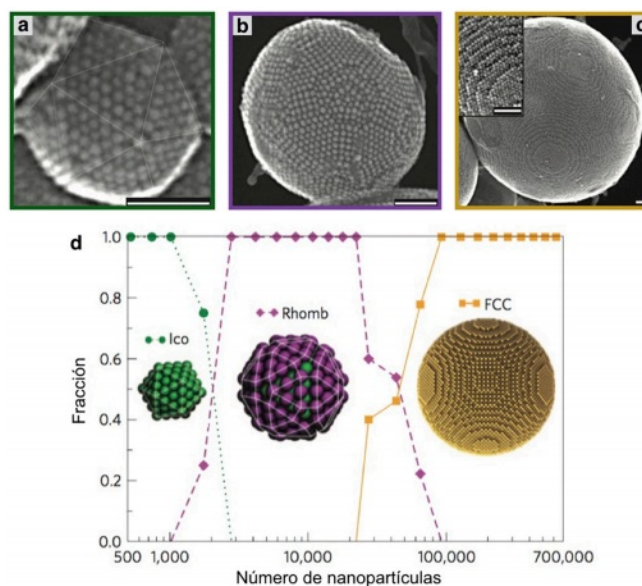
en baja concentración a la red principal compuesta por el otro tipo en alta concentración (Figura 2a).<sup>[11]</sup>

La amplia variedad estructural de películas organizadas obtenidas mediante el control de tamaño de los subcomponentes posibilita su uso en diversas aplicaciones. Por ejemplo, el sistema binario compuesto por nanopartículas magnéticas presenta magnetorresistencia negativa,<sup>[10]</sup> lo que permite su utilización en la fabricación de sistemas de almacenamiento de información. Por otro lado, el cristal dopado (Figure 2a) presenta propiedades electrónicas análogas a las de un semiconductor clásico, es decir, elevando la fracción de nanopartículas metálicas hasta el 16 %, la conductividad de la película aumenta en seis ordenes de magnitud,<sup>[11]</sup> ofreciendo sin duda un modelo experimental para la fabricación de materiales tipo N o tipo P.

El uso de sistemas binarios permite obtener una gran diversidad estructural, utilizar nanopartículas con una relación de aspecto muy diferente favorece la aparición de un escenario experimental donde un tipo de nanopartículas (relación de aspecto elevada) determina la distribución espacial de las nanopartículas con relación de aspecto menor. Se ha demostrado que nanohilos de oro de longitud superior a 2 micras y 1 nm de diámetro pueden dirigir la orientación de nanopartículas esféricas de 10 nm de diámetro durante la evaporación del disolvente (hexano).<sup>[12]</sup> En la estructura binaria organizada (Figura 2d), los nanohilos de oro determinaron la distancia entre las nanopartículas esféricas, afectando esta distancia en las propiedades ópticas de la película.

A pesar de que los ensamblados de nanopartículas en forma de película ofrecen una rápida implementación en dispositivos, estos tipos de organizaciones presentan limitaciones para su aplicación en disolución. No obstante, durante los últimos años se ha aumentado la variedad de ensamblados de tipo estático en forma de estructuras tridimensionales, con la posibilidad de procesado en fase líquida. El método más conveniente para formar microcristales en fase líquida se basa en emulsiones tipo aceite/agua. El grupo de M. Dijkstra ha logrado producir estructuras esféricas con un diámetro de 5 micras compuestas por nanopartículas de óxido de hierro de 6 nm, utilizando la emulsión como un espacio confinado (Figura 3).<sup>[13]</sup> La relevancia de este trabajo se basa en la importancia del efecto entrópico durante la formación de estructuras con la simetría icosaédrica, una propiedad poco común para el empaquetamiento de nanopartículas esféricas. Además, se ha demostrado mediante estudios de simulación que el efecto entrópico y no la naturaleza de las atracciones entre nanopartículas (*e.g.* van der Waals) ofrece una herramienta para la formación de estructuras cristalinas de alta simetría en dimensiones micrométricas.

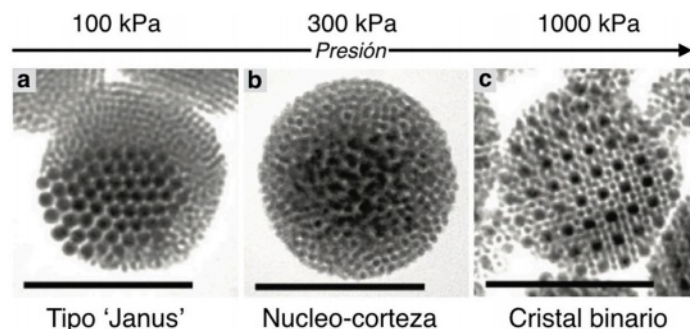
Basándose también en emulsiones, el grupo liderado por T. Kraus,<sup>[14]</sup> ha logrado sintetizar sistemas binarios para la formación de agregados esféricos compuestos por dos tipos de nanopartículas de oro (4 y 8 nm de diámetro). Han observado que la organización de nanopartículas dentro del ensamblado depende de la presión externa aplicada durante la evaporación de la emulsión estabilizada por un surfactante polimérico. A presiones bajas (100 kPa), las na-



**Figura 3.** Ensamblado dirigido por efecto entrópico de nanopartículas de CoFe (6 nm) en una emulsión mediante la evaporación del disolvente. A medida que aumenta el número de nanopartículas en el agregado puede observarse la transición estructural que se produce: (a) icosaedro, (b) rombicosidodecaedro, (c) estructura en el sistema cristalino cúbico (FCC). (d) Influencia del tamaño del agregado en la estructura del mismo. La aparición de una estructura con mayor simetría (FCC) confirma la importancia del efecto entrópico durante el proceso de ensamblado

nanopartículas forman estructuras asimétricas (tipo “Janus”, Figura 4a), mientras que presiones más altas (300 kPa) conducen a estructuras tipo núcleo-corteza (Figura 4b). Aplicando una presión superior a 1000 kPa, se forman cristales binarios, donde se maximiza la distribución de los dos tamaños de nanopartículas (Figura 4c). El efecto de la presión sobre la estructura final, se ha explicado mediante la aglomeración de forma secuencial de las nanopartículas dentro de la emulsión. A presiones más altas, las nanopartículas exhiben estabilidad coloidal prolongada dentro de la emulsión. Sin embargo, a presiones más bajas, la precipitación de las nanopartículas más grandes tiene lugar antes, provocando la separación de fase.

Aunque la cristalización de nanopartículas dentro de un espacio confinado abre la puerta a nuevos materiales, el



**Figura 4.** La modulación de la presión externa permite controlar la formación de sistemas binarios en emulsiones. Con el aumento de la presión externa, se prolonga la estabilidad coloidal de las nanopartículas de oro facilitando la formación de diferentes estructuras tales como agregados tipo “Janus” (a), estructura tipo núcleo-corteza (b) o cristales binarios (c).

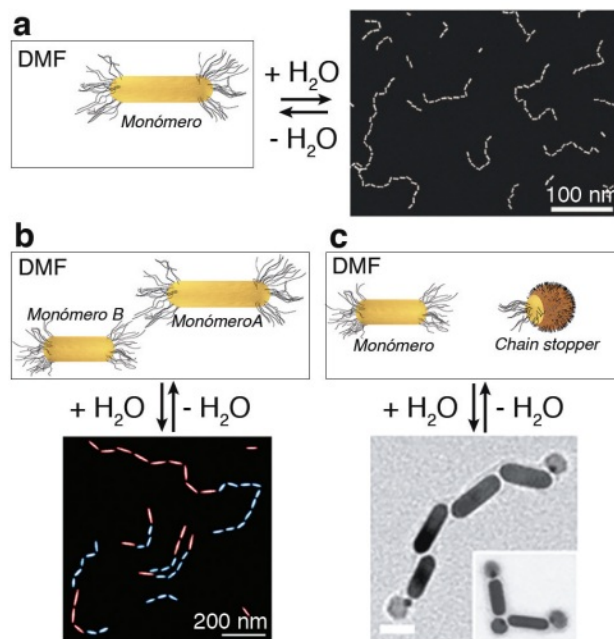
mayor desafío es sin duda el control sobre la maximización del empaquetamiento de las nanopartículas donde el efecto termodinámico resulta crucial.

### ENSAMBLADOS DINÁMICOS

Tal y como se ha mencionado en la introducción del presente artículo, la organización dinámica es un proceso reversible durante el cual el balance entre las fuerzas de repulsión y de atracción entre nanopartículas se modula mediante un estímulo externo. En general, la elección del estímulo externo depende del sistema molecular utilizado para estabilizar las nanopartículas. Por tanto, el desarrollo de este tipo de organización depende de la capacidad de adaptar el comportamiento de los sistemas moleculares (química supramolecular) a la química coloidal. En la práctica, se debe aplicar un “pensamiento molecular” para diseñar y ejecutar un nano-sistema dinámico. Los últimos avances demuestran que la organización dinámica de nanopartículas se ha beneficiado de los conocimientos de la química de polímeros. El grupo de E. Kumacheva ha contribuido en el campo mediante numerosos ejemplos dedicados a la organización de nanovarillas de oro estabilizadas con poliestireno, tratando así las nanopartículas de forma análoga a un monómero polimérico.<sup>[15]</sup> La adición de agua a la disolución de nanopartículas en dimetilformamida (DMF) produce la formación de cadenas mediante fuerzas hidrofóbicas (Figura 5a). Las nanopartículas vuelven al estado inicial al desplazar la composición de la mezcla hacia el disolvente orgánico. Curiosamente, la base teórica para explicar la formación de cadenas (“polímero plasmónico”) deriva de las leyes de la polimerización molecular.<sup>[16]</sup> El modelo propuesto permite predecir el número de nanopartículas que forma parte de la cadena durante el tiempo de la organización. El mismo modelo experimental se ha utilizado para fabricar “copolímeros plasmónicos” utilizando una mezcla de nanovarillas de oro de diferentes longitudes, produciendo el copolímero en bloque (Figura 5b).<sup>[17]</sup>

Con el objetivo de formar cadenas estables con el paso del tiempo se ha aplicado otro concepto perteneciente a la química de polímeros –*terminación de cadena (chain stopper)*–, que permite un control sobre la longitud final del polímero plasmónico.<sup>[18]</sup> Este sistema está compuesto por óxido de hierro y oro (partícula tipo Janus), funcionalizado con poliestireno exclusivamente en la región de oro (Figura 5c). De este modo la partícula híbrida frena la formación de cadenas una vez incorporadas en el extremo. Modificando la concentración de nanopartículas es posible controlar la longitud de la cadena del polímero plasmónico.

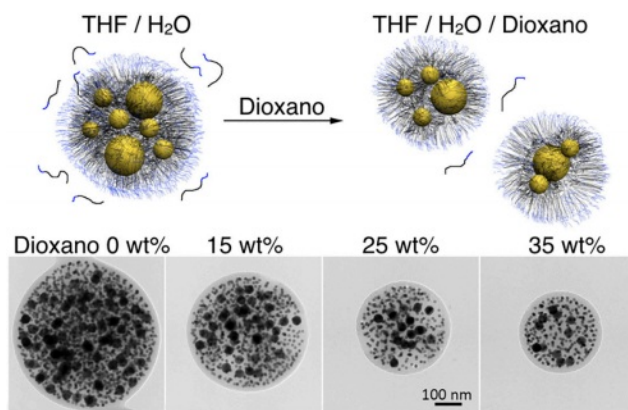
Además de formar ensamblados mediante el cambio de composición del disolvente, se pueden dividir los mismos de forma controlada. Se ha demostrado que es posible dividir agregados binarios compuestos por nanopartículas de oro de 40 y 10 nm de diámetro encapsuladas en el interior de micelas poliméricas en micelas de tamaño inferior, repartiéndose las nanopartículas de forma equitativa entre



**Figura 5.** Ensamblado dinámico de nanovarillas inducido por el cambio de mezcla de disolventes. (a) Formación de cadenas de nanovarillas de oro, también denominado polímero plasmónico. (b) Formación de cadenas análogas a un copolímero en bloque. (c) Incorporación de un detenedor de cadena coloidal para inhibir la formación de cadenas de forma controlada

éstas.<sup>[19]</sup> El proceso de división ha sido controlado mediante la adición de dioxano en la mezcla de agregados binarios encapsulados en las micelas poliméricas (Figura 6). Según el mecanismo propuesto, el dioxano disminuye la energía superficial de las micelas poliméricas, facilitando el aumento espontáneo de la superficie. Este cambio se manifiesta en el cambio de diámetro de las micelas, produciendo agregados más pequeños.

El control sobre el proceso de organización de los ejemplos anteriores requiere la intervención directa sobre la mezcla mediante la adición de otro disolvente, cambiando las condiciones experimentales y afectando a la reproducibilidad del ensamblado. El uso de otros estímulos externos, como por ejemplo la temperatura, el campo magnético o la



**Figura 6.** División espontánea de ensamblados binarios mediante el cambio de composición del disolvente

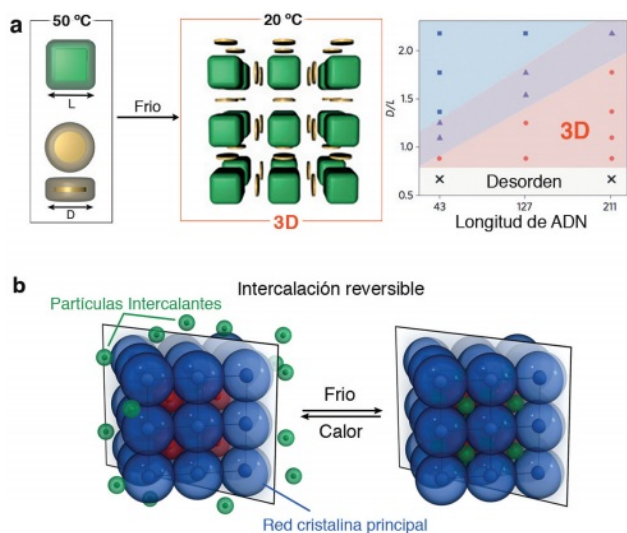
luz, ofrecen un control menos invasivo, que no interfiere o modifica las condiciones iniciales de la mezcla. Debido a su fácil implementación, la temperatura es el estímulo utilizado de forma más habitual en la organización de nanopartículas, siendo el ADN el sistema molecular más adecuado para este estímulo. Las moléculas de ADN inmovilizadas en la superficie de nanopartículas de oro manifiestan una transición repentina de temperatura de fusión ( $T_m$ ). Las nanopartículas permanecen estables en condiciones de temperatura superiores a  $T_m$ , mientras que a temperaturas inferiores, las nanopartículas precipitan mediante la formación de puentes de hidrógeno. Se ha demostrado que un enfriamiento más lento conduce a la cristalización de nanopartículas con una configuración de mínima energía (sistema cristalino cúbico).<sup>[20]</sup>

El grupo de C. Mirkin ha dedicado los últimos 20 años al estudio sistemático de la organización de nanopartículas de diferentes tamaños y formas, llegando a la conclusión de que en un sistema binario el desorden interno en un ensamblado se ve incrementado a medida que aumenta la diferencia entre el tamaño de los subcomponentes. La posibilidad de modular experimentalmente la longitud de las cadenas de ADN puede compensar la aparición de defectos durante el proceso de ensamblado. Por ejemplo, el uso de cadenas largas y flexibles permite aumentar el espacio entre las nanopartículas, favoreciendo una mayor acomodación de diferentes formas y tamaños.<sup>[21]</sup> Es importante destacar que este efecto se debe exclusivamente a la longitud de cadena y no el número de bases que unen las nanopartículas. La Figura 7a muestra como un aumento de la longitud de la cadena afecta a la distribución interna de las nanopartículas con forma cúbica y de disco, lo que a su vez define la dimensionalidad del cristal. El grupo de Mirkin ha conseguido diseñar un diagrama de fase en el que se definen

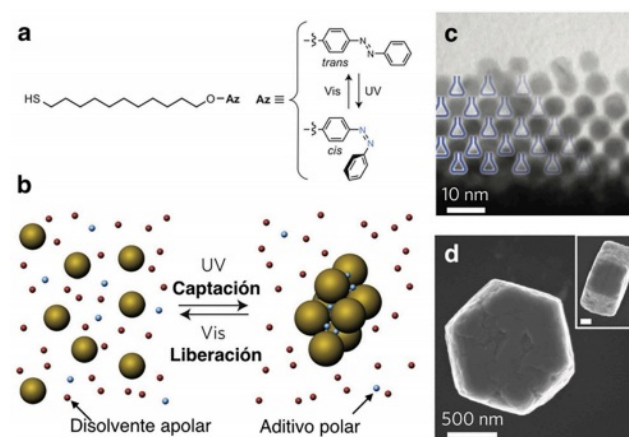
los límites experimentales (longitud de cadena de ADN y relación de tamaños) requeridos para la formación de sistemas ordenadas.

Dado que el ADN permite obtener un gran espacio entre las nanopartículas, se pueden intercalar nanoobjetos de forma dinámica mediante el cambio de temperatura.<sup>[22]</sup> El mismo grupo ha demostrado que las nanopartículas intercalantes de menor tamaño y  $T_m$  inferior difunden hacia el interior de un cristal "madre" compuesto por nanopartículas más grandes y  $T_m$  superior (Figura 7b). Las nanopartículas pequeñas ocupan los espacios vacantes formando otra red cristalina. Su desintegración se obtiene mediante el aumento de la temperatura. La intercalación reversible es sin duda un gran avance en el área de los sistemas dinámicos permitiendo el uso de espacios confinados con el fin de ejecutar procesos químicos en el interior de los mismos.

El grupo de R. Klajn ha llevado esta posibilidad hacia el siguiente nivel, demostrando que el espacio confinado entre nanopartículas puede acelerar la cinética y estereoselectividad de reacciones como la hidrólisis de acetal y la dimerización del antraceno.<sup>[23]</sup> El grupo ha utilizado la luz como estímulo externo para la organización de nanopartículas de oro (5 nm) estabilizadas con una molécula fotosensible (azobenceno) en cristales de 5 micras (Figura 8). El espacio confinado entre las nanopartículas organizadas facilita la retención de compuestos, aumentando la posibilidad de reacción de los mismos (Figura 8). Una vez finalizada la reacción, el cristal se desintegra mediante el uso de luz visible o temperatura. La alternancia de distintas longitudes de onda posibilita la reversibilidad del proceso. Este tipo de sistema permite mejorar la eficiencia de las reacciones químicas que tienen lugar en el espacio confinado mediante un aumento de la velocidad de la reacción.



**Figura 7.** Organización reversible de nanopartículas mediante ADN. (a) El enfriamiento de la mezcla binaria compuesta por cubos y discos conduce a la formación de un cristal binario. La estructura cristalina se controla mediante la longitud del ADN intercalarte. (b) El cambio de temperatura permite intercalar nanopartículas en una red cristalina de forma reversible



**Figura 8.** Formación de supracristales compuestos por nanopartículas de oro como plataformas para su uso en catálisis. (a) Estructura química del agente estabilizante dinámico (azobenceno) y su cambio estructural reversible (*trans-cis*) en presencia de luz a diferentes longitudes de onda. (b) Representación del proceso reversible de ensamblado de nanopartículas y captación de moléculas en las cavidades mediante luz ultravioleta, y desintegración del ensamblado en presencia de luz visible. (c) El espacio entre las nanopartículas se asemeja a un "nano-matraz" que facilita las reacciones químicas. (d) Imagen de microscopía electrónica de barrido que muestra un ensamblado compuesto por multitud de nanopartículas de oro

## CONCLUSIONES

La capacidad sobre la organización de los nanomateriales es un campo emergente debido a la aparición de nuevas propiedades y futuras aplicaciones, permitiendo a su vez el avance de la química de materiales. Los modelos basados en sistemas moleculares o atómicos dictan los pasos para el progreso y desarrollo de la organización de nanomateriales.<sup>[24]</sup>

Los recientes avances en la formación de ensamblados estáticos se dirigen hacia la integración de nuevos materiales organizados en dispositivos en fase sólida como transistores, celdas solares, sensores o diodos.<sup>[25]</sup> El mayor desafío es sin duda la obtención de estructuras organizadas en un rango superior al centímetro cuadrado. Para alcanzar con éxito este objetivo es necesario optimizar las condiciones experimentales durante la organización de los nanomateriales.

Por otro lado, los sistemas dinámicos permiten el desarrollo de nuevos materiales inteligentes, capaces de reconfigurar su organización mediante la aplicación de un estímulo externo, dando lugar a un marco experimental idóneo para el estudio de conceptos fundamentales en sistemas fuera de equilibrio.<sup>[26]</sup> El ensamblado dinámico puede implementarse para el desarrollo de diversas aplicaciones puesto que ofrece sistemas con propiedades oscilatorias inducidas por estímulos externos como la temperatura, el sonido, la luz, o la presencia de biomoléculas, que permiten activar o desactivar una función como el reconocimiento molecular, la catálisis, la motilidad e incluso la cognición.<sup>[27]</sup> La gran ventaja del ensamblado dinámico es la posibilidad de almacenamiento de información mediante la programación previa de sus subcomponentes.<sup>[28]</sup> La información puede ser codificada en cada partícula durante el proceso de fabricación, definiendo no solo la morfología del ensamblado, también sus propiedades y funciones. El futuro desarrollo de los sistemas dinámicos se dirige hacia la obtención de características intrínsecas a los sistemas vivos<sup>[29]</sup> en forma de estructuras organizadas, como por ejemplo, la capacidad de autocuración o incluso la replicación.<sup>[30]</sup>

## AGRADECIMIENTOS

El autor del presente artículo agradece la tarea realizada por los colaboradores que han contribuido en el desarrollo de este trabajo: Ana Sánchez-Iglesias y Luis M. Liz-Marzán. También agradece el soporte recibido, en forma proyectos, por parte del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (MAT2013-46101-R, MAT2013-49375-EXP) y la Fundación Ikerbasque.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Grzelczak, J. Vermant, E. M. Furst and L. M. Liz-Marzán, *ACS Nano*, **2010**, *4*, 3591-3605.
- [2] Z. Nie, A. Petukhova and E. Kumacheva, *Nat. Nanotechnol.*, **2010**, *5*, 15-25.
- [3] D. V. Talapin, J.-S. Lee, M. V. Kovalenko and E. V. Shevchenko, *Chem. Rev.*, **2010**, *110*, 389-458.
- [4] M. D. Eldridge, P. A. Madden and D. Frenkel, *Nature*, **1993**, *365*, 35-37.
- [5] G. van Anders, D. Klotsa, N. K. Ahmed, M. Engel and S. C. Glotzer, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **2014**, *111*, E4812-E4821.
- [6] B. A. Grzybowski, K. Fitzner, J. Paczesny and S. Granick, *Chem. Soc. Rev.*, **2017**, *46*, 5647-5678.
- [7] M. A. Boles, M. Engel and D. V. Talapin, *Chem Rev.*, **2016**, *116*, 11220-11289.
- [8] D. Frenkel, *Nat Mater*, **2015**, *14*, 9-12.
- [9] C. Yan and T. Wang, *Chem. Soc. Rev.*, **2017**, *46*, 1483-1509.
- [10] A. Dong, J. Chen, P. M. Vora, J. M. Kikkawa and C. B. Murray, *Nature*, **2010**, *466*, 474-477.
- [11] M. Cargnello, A. C. Johnston-Peck, B. T. Diroll, E. Wong, B. Datta, D. Damodhar, V. V. T. Doan-Nguyen, A. A. Herzing, C. R. Kagan and C. B. Murray, *Nature*, **2015**, *524*, 450-453.
- [12] A. Sánchez-Iglesias, M. Grzelczak, J. Pérez-Juste and L. M. Liz-Marzán, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2010**, *49*, 9985-9989.
- [13] B. de Nijs, S. Dussi, F. Smalenburg, J. D. Meeldijk, D. J. Groenendijk, L. Fillion, A. Imhof, A. van Blaaderen and M. Dijkstra, *Nat Mater*, **2014**, *14*, 56-60.
- [14] T. Kister, M. Mravlak, T. Schilling and T. Kraus, *Nanoscale*, **2016**, *8*, 13377-13384.
- [15] Z. Nie, D. Fava, E. Kumacheva, S. Zou, G. C. Walker and M. Rubinstein, *Nat Mater*, **2007**, *6*, 609-614.
- [16] K. Liu, Z. Nie, N. Zhao, W. Li, M. Rubinstein and E. Kumacheva, *Science*, **2010**, *329*, 197-200.
- [17] K. Liu, A. Lukach, K. Sugikawa, S. Chung, J. Vickery, H. Thérien-Aubin, B. Yang, M. Rubinstein and E. Kumacheva, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, *53*, 2648-2653.
- [18] A. Klinkova, H. Thérien-Aubin, R. M. Choueiri, M. Rubinstein and E. Kumacheva, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **2013**, *110*, 18775-18779.
- [19] M. Grzelczak, A. Sánchez-Iglesias and L. M. Liz-Marzán, *Soft Matter*, **2013**, *9*, 9094-9098.
- [20] E. Auyeung, T. I. N. G. Li, A. J. Senesi, A. L. Schmucker, B. C. Pals, M. O. de la Cruz and C. A. Mirkin, *Nature*, **2014**, *505*, 73-77.
- [21] M. N. O'Brien, M. R. Jones, B. Lee and C. A. Mirkin, *Nat Mater*, **2015**, *14*, 833-839.
- [22] R. J. Macfarlane, M. R. Jones, B. Lee, E. Auyeung and C. A. Mirkin, *Science*, **2013**, *341*, 1222-1225.
- [23] H. Zhao, S. Sen, T. Udayabhaskarara, M. Sawczyk, K. Kučanda, D. Manna, P. K. Kundu, J.-W. Lee, P. Král and R. Klajn, *Nature Nanotechnol.*, **2016**, *11*, 82-88.
- [24] A. Guerrero-Martínez, M. Grzelczak and L. M. Liz-Marzán, *ACS Nano*, **2012**, *6*, 3655-3662.
- [25] F. Qiao, X. Wang, Q. Wang, G. He and Y. Xie, *Nanoscale*, **2017**, *9*, 8066-8079.
- [26] S. Mann, *Nat Mater*, **2009**, *8*, 781-792.
- [27] B. A. Grzybowski and W. T. S. Huck, *Nat Nanotechnol.*, **2016**, *11*, 585-592.
- [28] L. Cademartiri and K. J. M. Bishop, *Nat Mater*, **2015**, *14*, 2-9.
- [29] R. Merindol and A. Walther, *Chem. Soc. Rev.*, **2017**, *46*, 5588-5619.
- [30] Z. Zeravcic and M. P. Brenner, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **2014**, *111*, 1748-1753.

# Química sostenible y fotocátalisis: nanopartículas metálicas como fotocatalizadores para la síntesis de compuestos orgánicos

María González-Béjar

**Resumen:** Este artículo ofrece una breve reflexión acerca del interés general de la fotocátalisis, en el ámbito de la química sostenible, para transformar energía solar en energía química y obtener así productos o procesos que están térmicamente prohibidos o tienen lugar con bajo rendimiento. Se incluye una introducción básica a la fotocátalisis y, seguidamente, se describen las propiedades de las nanopartículas metálicas y los procesos que tienen lugar tras su irradiación. Finalmente, se incluyen ejemplos ilustrativos de su uso en fotocátalisis para síntesis de compuestos orgánicos con especial énfasis en la utilización de nanopartículas soportadas en sólidos para fotocátalisis heterogénea.

**Palabras clave:** Química sostenible, fotocátalisis, luz solar, nanopartículas metálicas.

**Abstract:** This article offers a brief discussion about the general interest of photocatalysis, in the field of sustainable chemistry, aiming to transform solar energy into chemical energy in order to obtain products or processes that are thermally forbidden or take place with low yield. An introduction of general concepts in photocatalysis is included, followed by a brief description of the main characteristics of metallic nanoparticles and their capabilities as photocatalysts upon irradiation. Finally, some representative examples of syntheses of organic compounds have been included to illustrate these capabilities, with special emphasis on supported metallic nanoparticles for heterogeneous photocatalysis.

**Keywords:** Sustainable chemistry, photocatalysis, sunlight, metallic nanoparticles.

## INTRODUCCIÓN A LA QUÍMICA SOSTENIBLE

Nos encontramos en un momento de confrontación entre los escépticos ante Cambio Climático y aquellos que trabajan para encontrar una solución al respecto.<sup>[1]</sup>

Asimismo, aunque centramos nuestros esfuerzos en destacar la incuestionable contribución de la Química a la mejora de nuestro bienestar y calidad de vida, no le faltan críticas negativas en el ámbito social.<sup>[2]</sup> Algunas de ellas, más que justificadas, son debidas a la falta de ética profesional (contaminación, armas químicas, etc.) mientras que otras están basadas en la ignorancia (campañas contra vacunación, engaños en el campo de la medicina, etc.). Indudablemente, la industria química ha contribuido al desarrollo de nuevas tecnologías que ofrecen bienestar y comodidad en la sociedad actual (textil, automóviles, comunicación, etc.) gracias a la elaboración de nuevos materiales y compuestos (tejidos, plásticos,

fármacos, pinturas...)<sup>[3]</sup>. Dicha contribución ha influido notablemente en el aumento de la esperanza de vida en el último siglo desde los 45 a los 83 años.

Es por tanto crucial tener en consideración la máxima del Código de Conducta publicado por la American Chemical Society: nuestra responsabilidad profesional ha de servir al interés público, y al avance del conocimiento científico, así como de preocuparse por la salud y el bienestar de la sociedad. Para ello, debemos comprender y anticiparnos a las consecuencias medioambientales de nuestro trabajo, evitar la polución y proteger el medioambiente.<sup>[4]</sup>

Dada la influencia indiscutible de la Química en aspectos medioambientales, económicos y sociales, esta ciencia puede aportar una solución (o parte de ella) a algunos de los grandes problemas actuales. Entre ellos destacan: i) el cambio climático relacionado con el incremento de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, metano, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno<sup>[5]</sup>; ii) la disminución de la capa de ozono; iii) la necesidad de sustituir el petróleo como fuente primaria de compuestos químicos y combustibles y iv) remediar la contaminación en agua, suelo y alimentos.

Hace 30 años (1987), la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas elaboró el Informe Brundtland y definió el concepto de Desarrollo Sostenible como el modelo de desarrollo que, cubriendo las necesidades del presente preserva la posibilidad de que las



Instituto de Ciencia Molecular  
Departamento de Química Orgánica  
Universidad de Valencia  
C/ Catedrático José Beltrán, 2  
C-e: [maria.gonzalez@uv.es](mailto:maria.gonzalez@uv.es)

M. González-  
Béjar

Recibido: 03/11/2017. Aceptado: 21/02/2018.

generaciones futuras satisfagan las suyas propias. Desde entonces hasta ahora son numerosas las disciplinas que incorporan este concepto: economía sostenible, arquitectura sostenible, etc.<sup>[6]</sup>

En este contexto, desde la década de 1990 se ha desarrollado una nueva disciplina química denominada Química Verde que enmarca las directrices aconsejables para conseguir una Química Sostenible.<sup>[7]</sup> Desde entonces, la comunidad científica está realizando un gran esfuerzo para desarrollar tanto procesos “más verdes”<sup>[8,9]</sup> como programas de formación especializada en Química Sostenible.<sup>[10]</sup> No se trata únicamente de mejorar procesos ya descritos, sino también de desarrollar otros nuevos que ofrezcan mejores beneficios a la sociedad.

La Química Verde se fundamenta en aspectos tecnológicos, medioambientales, económicos y sociales para conseguir el desarrollo de procesos químicos eficientes e inocuos para la salud humana y el medioambiente con la finalidad de minimizar, y evitar en la medida de lo posible, la utilización de un exceso de reactivos y energía, así como de cualquier riesgo para el planeta.<sup>[8]</sup> El conjunto de directrices de diseño de la química verde se conoce como los Doce Principios.<sup>[8,11]</sup> Estos son:

1. Es mejor prevenir la formación de residuos que tratar de remediarla.
2. Los métodos sintéticos deben ser diseñados para conseguir la máxima incorporación en el producto final de todas las materias usadas en el proceso (economía atómica).
3. En la medida de lo posible, se deben diseñar metodologías de síntesis para el empleo y la generación de sustancias con escasa o nula toxicidad humana y ambiental.
4. Se deben diseñar productos químicos que, preservando la funcionalidad, presenten una toxicidad mínima.
5. Se debe prescindir o minimizar el uso de disolventes y auxiliares químicos.
6. Los métodos sintéticos deben llevarse a cabo a temperatura y presión ambiente si es posible (eficiencia energética en el diseño).
7. Se han de usar preferentemente materias primas renovables y no extinguidas.
8. Se debe evitar en la medida de lo posible la formación innecesaria de derivados (bloqueo de grupos, protección/desprotección, modificación temporal de procesos físicos/químicos).
9. Los reactivos catalíticos (tan selectivos como sea posible) son mejores que los estequiométricos.
10. Los productos químicos han de ser diseñados de manera que sean biodegradables.
11. Se deben desarrollar las metodologías analíticas que permitan el seguimiento a tiempo real durante el proceso y el control previo a la formación de sustancias peligrosas.
12. Las sustancias y sus formas de uso deben seleccionarse de modo que minimicen la posibilidad de accidentes.

## Situación actual y oportunidades de mejora

Es firme el compromiso adquirido por investigadores e innovadores para afrontar la ardua tarea de avanzar hacia un futuro más sostenible basado en el uso de combustibles renovables y reducir las emisiones netas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.<sup>[12]</sup> El Acuerdo de París sobre el Cambio Climático aprobado en virtud de la Convención Marco de las Naciones Unidas consiguió el compromiso mundial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) lo suficientemente rápido como para mitigar el cambio climático y satisfacer la creciente demanda de energía.<sup>[13]</sup> La firma del Acuerdo de París obliga a reducir entre un 80% y un 95% las emisiones contaminantes con respecto a los niveles de 1990 para mitad del siglo XXI. Lamentablemente, la opinión de la comunidad científica no ha frenado la decisión de los Estados Unidos de abandonar el acuerdo de París.<sup>[1,14]</sup>

Cabe destacar que los tres pilares principales de la transición energética requerida en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas para el año 2030 son: el acceso a nuevos servicios energéticos y con bajo nivel de emisiones de carbono, una mayor eficiencia energética y aumento del uso de las energías renovables.<sup>[15]</sup> Aunque este escenario de respuesta al cambio climático depende principalmente de la eliminación de dióxido de carbono del aire,<sup>[13]</sup> el uso de la energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> deben desligarse sin lugar a duda. Es más, por ejemplo en nuestro país, tres cuartas partes de esas emisiones proceden de usos energéticos.

Para desligar las emisiones del uso de energía existen cuatro opciones: energía nuclear, captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés), eficiencia energética y energía renovable.<sup>[15]</sup> La gran desventaja de la energía nuclear respecto a las otras soluciones es la magnitud de los problemas sociales y medioambientales causados tras grandes accidentes (Chernobyl, Fukushima), el almacenamiento y confinamiento de los residuos nucleares y la escasez de uranio.<sup>[15]</sup>

Por otra parte, la CCS puede aplicarse en el sector de la energía, pero su elevado coste y la disponibilidad de alternativas limpias más baratas, como el uso de fuentes renovables, está frenando su aplicación y no hay ningún proyecto operando a gran escala por falta de rentabilidad e incentivos para las empresas que desarrollan la tecnología. Además, debe evaluarse la viabilidad y los riesgos ambientales del almacenamiento de dióxido de carbono a gran escala ya que la CCS lo retira de la atmósfera pero no lo elimina.<sup>[13]</sup> ¿Cuál es el riesgo de que el CO<sub>2</sub> escape de los depósitos?. Dos de las principales técnicas propuestas para CCS son la forestación y la bioenergía con CCS (BECCS, por sus siglas en inglés). Esta última consiste en utilizar las plantas para capturar CO<sub>2</sub> y luego quemarlas para generar energía (o refinarlas en combustibles líquidos como el etanol) y capturar las emisiones de carbono resultantes. Se ha de tener en cuenta que esto podría afectar a los ecosistemas y la biodiversidad porque requeriría plantar cultivos y franjas de bosques aproximadamente en un tercio del total de las tierras cultivables del planeta.<sup>[13]</sup> Parece lógico inten-



tar evitar tanto la competencia directa entre la bioenergía y la producción de alimentos como la costosa infraestructura que necesitaría la CCS.

Una aproximación más adecuada es la de aprovechar el CO<sub>2</sub> como fuente sostenible de carbono para generar compuestos<sup>[16]</sup> de valor añadido<sup>[17]</sup> (p. ej. cemento<sup>[18]</sup> o combustibles<sup>[19]</sup>). La reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> es una estrategia prometedora para la producción de combustibles y productos químicos.<sup>[20]</sup>

Ahora bien, el primer principio de la Química Verde se basa en la prevención, e indica que es mejor prevenir la formación de residuos que tratar de limpiar tras su formación.<sup>[8,9]</sup> Por lo tanto, nuestra acción estratégica debería centrarse en reducir urgentemente las emisiones y no en “emitirlas ahora y eliminarlas después”.<sup>[13]</sup> En este contexto, resulta crucial conseguir mayores eficiencias energéticas y desarrollar energías renovables.<sup>[21]</sup>

En la producción de energía, más de la mitad de la capacidad de generación que se adiciona anualmente proviene de fuentes renovables, lo que supone una participación del 23% del suministro de energía en 2014.<sup>[15,22]</sup> Afortunadamente, los costes de muchas tecnologías basadas en energías renovables, incluyendo la energía solar y el viento, han disminuido significativamente en los últimos años.<sup>[23]</sup> Aunque las instalaciones solares tanto fotovoltaicas (celdas solares) como termosolares (energía solar concentrada para calentamiento) no producen emisiones contaminantes, aún es necesario encontrar el modo de disminuir sus costes de inversión y se debe realizar una cuidadosa evaluación del impacto medioambiental que producirán en la zona en la que se construya.<sup>[24]</sup>

Sobre esta base, se ha constituido una coalición formada por 121 países (en la que España “país del Sol” clama por su ausencia) denominada Alianza Solar Internacional (ISA, por sus siglas en inglés) para promocionar la energía solar y reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles.<sup>[25]</sup> Esta iniciativa se centra en el fomento de capacidades, la promoción, la financiación, la tecnología y el acceso a la energía, así como en la formulación de proyectos y programas en el ámbito de la energía solar. La Alianza tiene como objetivo alcanzar inversiones de un billón de dólares para acelerar el despliegue de la energía solar fotovoltaica en los países tropicales.

Supuestamente, a partir de marzo del 2018, en España se aprobará en Consejo de Ministros las directrices para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones netas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera marcados por la Unión Europea para el año 2020, detalladas en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima.<sup>[26]</sup>

Actualmente se están diseñando dispositivos para aprovechar la energía de la luz solar (la mayoría para conseguir electricidad aunque aún es complicado almacenarla), y sería ideal poder transferir los conocimientos adquiridos en el campo de la tecnología fotovoltaica y los concentradores solares, para llevar a cabo procesos químicos.<sup>[27,28]</sup> De hecho, el aprovechamiento de la luz solar para su uso en síntesis química es un sueño que la comunidad química tiene desde hace tiempo.<sup>[29]</sup>

## Fotocatálisis

Hace menos de 20 años que Ryōji Noyori (Premio Nobel en química de 2001) destacó la necesidad de sintetizar compuestos de interés con un 100% de rendimiento y selectividad para evitar la producción de residuos. En este contexto, la catálisis ha sido y seguirá siendo uno de los temas de investigación más importantes, ya que es el único modo racional de producir compuestos de forma ambientalmente benigna, económica y además ahorrando energía.<sup>[3]</sup> También señaló que hay muchas reacciones que no funcionan bajo condiciones térmicas y, que para potenciar nuevas rutas sintéticas, es necesario explorar más a fondo la fotocatalisis ya que permite transformaciones que de otro modo están energéticamente prohibidas.<sup>[3]</sup>

Se ha de tener en cuenta que la fotoquímica comenzó a principios del siglo xx y ha demostrado ser adecuada para llevar a cabo reacciones más verdes.<sup>[30,31]</sup> Hoy en día, las aplicaciones fotoquímicas y fotofísicas son fundamentales para el desarrollo de productos en la vida cotidiana: tecnología de la información, nanotecnología, tecnologías sostenibles (limpieza de aguas residuales, etc.), dispositivos analíticos y de seguridad (hologramas, sensores), cosméticos (tintes, etc.) e iluminación (LED).<sup>[32]</sup>

En este contexto, la luz también se puede utilizar para obtener especies catalíticas activas. Este proceso se conoce como fotocatalisis y la especie que absorbe la luz es el fotocatalizador.<sup>[33-35]</sup> Es decir, la fotocatalisis es la aceleración de una reacción química producida gracias a la absorción de luz por un fotocatalizador. En los últimos 15 años, el interés por la fotocatalisis solar ha crecido de forma sorprendente (Figura 1). Es muy gratificante observar este auge ya que potencia su aplicabilidad en otras áreas de la química que, aún siendo afines, se consideraban completamente distintas. De hecho, la fotocatalisis está experimentando un gran desarrollo en el campo de la química verde<sup>[36]</sup> para disociación del agua,<sup>[37,38]</sup> fotovoltaica, desarrollo de superficies autolimpiables<sup>[39]</sup> y el área de síntesis química<sup>[8,31,40,41]</sup> entre otros ejemplos.

La razón principal es la posible utilización de luz solar para generar energía térmica (calor) o química, es decir, para permitir procesos químicos, que son térmicamente inalcanzables o pueden ser mejorados evitando condiciones de reacción severas.<sup>[33,40,42]</sup> La fotosíntesis es de por sí el

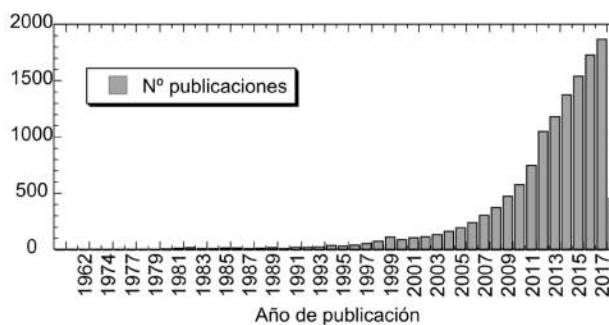


Figura 1. Histograma representativo de la evolución de artículos publicados con el término fotocatalisis solar

proceso fotoquímico natural que ayuda a mantener la vida en la tierra y por ello, es fuente de inspiración para diseño de fotosíntesis artificial, la cual pretende transformar dióxido de carbono y agua en carbohidratos y en oxígeno imitando la fotosíntesis natural de las plantas, basándose en una combinación apropiada de fotocatalizadores, catalizadores y luz.<sup>[43]</sup>

La fotocatalisis se ha relacionado mayoritariamente con la degradación de contaminantes<sup>[44]</sup> (procesos de oxidación avanzados)<sup>[45]</sup> y la esperanza de explotar la energía solar para la generación de combustible.<sup>[32,34]</sup> En esta línea, la “fotocatalisis positiva” tiene como objetivo generar nuevos productos y no sólo degradarlos,<sup>[46]</sup> es decir, se refiere a la síntesis de compuestos químicos.<sup>[35,47]</sup>

Para que la fotocatalisis tenga lugar, el fotocatalizador debe absorber luz de la fuente de iluminación (preferiblemente luz visible ya que es la zona de mayor emisión del espectro solar y además la más inocua para nuestro organismo) o dicho de otra forma, solamente la luz con la longitud de onda apropiada puede activar selectivamente un fotocatalizador de interés para generar especies reactivas que a su vez pueden iniciar procesos que no podrían ocurrir bajo condiciones térmicas o que requerirían condiciones de reacción extremas.<sup>[33,48]</sup> Indudablemente, la luz solar (gratuita y abundante) es el reactivo más verde para llevar a cabo procesos catalíticos.

La Figura 2 muestra el espectro electromagnético y el espectro de la radiación solar de la atmósfera terrestre. Si se compara el espectro electromagnético con el espectro solar se observa que el rango del UV que abarca UVC (200-280 nm), UVB (280-300 nm), y UVA (320-400 nm), solo supone un 5%. Las longitudes de onda desde 400 a 760 nm corresponden al rango del visible (donde la luz solar tiene las máximas intensidades) y longitudes de onda por encima de 760 nm corresponden a IR cercano. Se puede irradiar con luz a diferentes longitudes de onda para obtener el efecto catalítico deseado.

Cabe destacar que la fotocatalisis cumple algunos de los 12 principios de la química verde y puede diseñarse para satisfacer los demás.<sup>[40,49]</sup> Así, cumple con la prevención de residuos (reacciones selectivas o destrucción de contami-

nantes); uso de reactivos catalíticos que hacen que la reacción sea más rápida; reduce el consumo de energía ya que las reacciones se llevan a cabo normalmente a temperatura ambiente y también, mejora la economía atómica en reacciones de acoplamiento.

Por tanto, los procesos químicos inducidos por la luz solar evitarían o al menos disminuirían el consumo de combustibles fósiles. Esto reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> y, en consecuencia, el uso de energía a nivel mundial. Además, la contaminación que no pueda evitarse podría reducirse mediante aproximaciones fotoquímicas como purificaciones de aire y agua. A pesar de las ventajas medioambientales de las reacciones inducidas con luz visible, el uso de luz solar directa es, hasta la fecha, extremadamente raro.<sup>[27]</sup>

En cualquiera de estas aplicaciones el fotocatalizador ideal debe ser estable bajo las condiciones de reacción, reutilizable, capaz de realizar reacciones selectivamente y tener baja toxicidad. Además, los fotocatalizadores pueden ser homogéneos o heterogéneos, dependiendo si son solubles en la mezcla de reacción o no. Entre los homogéneos se encuentran los compuestos orgánicos y complejos organometálicos mientras que semiconductores inorgánicos como óxidos de titanio o zinc,<sup>[33,48]</sup> semiconductores de naturaleza orgánica como polímeros orgánicos conjugados porosos<sup>[50]</sup> o semiconductores híbridos como MOFs,<sup>[51]</sup> se han utilizado como fotocatalizadores en sistemas heterogéneos.

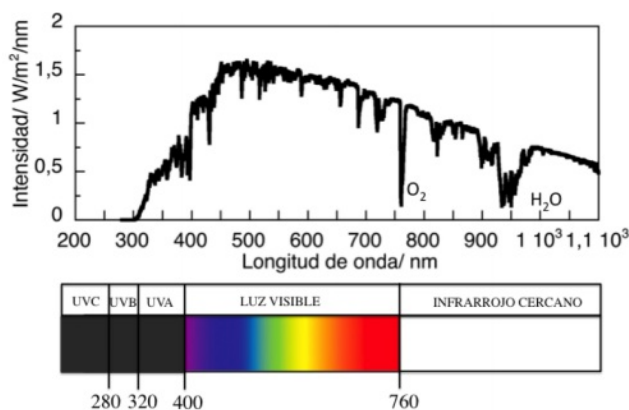
### Nanopartículas metálicas como fotocatalizadores

En particular, la nanocatálisis coloidal heterogénea se refiere a aquellas reacciones que ocurren en la superficie de las nanopartículas.<sup>[52]</sup> El sitio activo en reacciones catalíticas heterogéneas es una colección de átomos superficiales que adsorben los reactivos y facilitan las transformaciones de los enlaces químicos.<sup>[53]</sup>

El tamaño nanométrico de las nanopartículas metálicas (MNP, por sus siglas en inglés) de oro (AuNP), plata (AgNP) y cobre (CuNP) varía el nivel de Fermi de las mismas y da lugar a un potencial de reducción menor del metal en su superficie. Además, en las nanopartículas también ha aumentado la superficie disponible en comparación con la del sólido extendido, lo que se traduce en un mayor rendimiento catalítico.<sup>[54]</sup>

Las MNP presentan una banda de absorción característica (habitualmente en el visible) conocida como Banda de Plasmón Superficial (SPB, por sus siglas en inglés) y depende del tamaño y forma de la nanopartícula y de su composición (entre otros factores).<sup>[55]</sup> Esto se debe a que los electrones libres de la banda de conducción en la superficie de las MNP oscilan en resonancia con la onda electromagnética incidente.

Se puede seleccionar el método de síntesis para obtener el tamaño, la morfología y composición deseados según las necesidades experimentales. Gracias a la SPB, las MNP pueden absorber luz en una amplia gama del espectro de luz solar.<sup>[56,57]</sup> Por eso, se utilizan MNP como



**Figura 2.** Espectro de la radiación solar en la atmósfera terrestre medida con un espectroradiómetro de Luzchem Inc., y una fracción del espectro electromagnético. Se indican los mínimos del espectro solar debidos a la absorción del oxígeno y del agua en la atmósfera terrestre<sup>[48]</sup>

fotocatalizadores iluminándolas en el rango de longitud de onda de su SPB. Es lo que se conoce como catálisis mediada por plasmón (PMC, por sus siglas en inglés).<sup>[38,55,58]</sup> La energía adicional que la irradiación de luz confiere a una nanopartícula metálica genera un campo eléctrico local muy intenso que puede favorecer la inducción de procesos de transferencia de energía, electrónica y de calor.<sup>[58]</sup> Las MNP tienen propiedades ópticas y capacidades catalíticas que las hacen ideales para la fotocatalisis verde (es decir, fotocatalisis que utiliza una parte importante del espectro solar).<sup>[59]</sup>

La utilización de PMC con fines sintéticos es aún muy reciente pero prometedora.<sup>[38,56,57,60]</sup> Con esta estrategia, se transforma la energía de la luz en energía química debido a la creación de electrones energéticos con un tiempo de vida muy corto y a aumentos de campos eléctricos generados en la superficie (o muy cerca de la superficie) de las nanopartículas.<sup>[38]</sup> Gracias a la combinación de estos efectos se están descubriendo nuevos procesos fotocatalíticos.

Las MNP interactúan con los reactivos en su superficie. Esto es extremadamente importante para aplicaciones catalíticas y fotocatalíticas, ya que una nanopartícula puede interactuar con muchos reactivos simultáneamente (comparativamente, las moléculas orgánicas o los complejos organometálicos sólo permiten interacciones mol a mol).<sup>[61]</sup> Por lo tanto, la velocidad de reacción dependerá del número de electrones de conducción y de moléculas de reactivos sobre la superficie de la nanopartícula según la afinidad entre la superficie MNP y los reactivos.<sup>[56,57]</sup> Una de las limitaciones de PMC es que el efecto resonante limita el ancho de banda de absorción (típicamente  $\approx 50$  nm o menor para nanoesferas uniformes) aunque se pueden usar nanopartículas más heterogéneas.<sup>[62]</sup> La otra es que el coeficiente de absorción suele ser bajo debido a la fuerte dispersión de la luz.<sup>[62]</sup>

Por ejemplo, para las nanopartículas de plata (AgNP), se observa un desplazamiento en la banda de absorción de plasmón de 400 a 670 nm cuando la forma varía de una esfera a un cubo.<sup>[38,63]</sup> Se ha demostrado que la forma influye en el resultado de la catálisis (p. ej. en la oxidación catalítica del estireno a óxido de estireno<sup>[64]</sup>). Las AgNP actúan como fotocatalizadores en la hidrogenación de carbonilos

a través de la absorción de luz visible a presión atmosférica (Esquema 1A).<sup>[65]</sup>

De manera similar a las nanopartículas de plata, la SPB de las nanopartículas de oro (AuNP) esféricas presentan una absorción máxima alrededor de los 510-530 nm dentro de la región visible del espectro electromagnético.<sup>[67,68]</sup> Las AuNP fotocatalizan eficazmente la oxidación de alcoholes bencílicos en presencia de  $H_2O_2$  a los correspondientes carbonilos (Esquema 1B).

La utilización de diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) como fuente de excitación es una manera sencilla y económica de iniciar reacciones fotoquímicas, frente a las fuentes de excitación de luz visible más habituales, tales como láseres, lámparas de Xe y fotorreactores.

Aunque la fotocatalisis con AuNP supone la implementación de un método más verde de oxidación de alcoholes, las AuNP coloidales no son reciclables. Por este motivo, los soportes sólidos están siendo ampliamente utilizados para fijar las MNP con el fin de mejorar su estabilidad y como consecuencia su reciclabilidad, ya que los fotocatalizadores heterogéneos son más fáciles de eliminar de la mezcla de reacción (por ejemplo, por filtración o centrifugación). Además, el soporte puede ayudar a realizar el proceso fotocatalítico gracias a la generación de un efecto sinérgico debido a la asociación entre el soporte y la nanopartícula. Así pues, las reacciones fotoinducidas que utilizan MNP soportadas son muy prometedoras. Por ejemplo, la oxidación de alcoholes se puede llevar a cabo con AuNP soportadas en distintos materiales tales como  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , o hidrotalcita (HT).<sup>[68]</sup>

La capacidad fotocatalítica de las MNP soportadas estará dictada tanto por el tamaño de las MNP como por las interacciones MNP/soporte,<sup>[69]</sup> ya que el soporte en sí no puede verse exclusivamente como un componente inerte del catalizador heterogéneo. De hecho, el mecanismo de las reacciones fotocatalíticas para MNP soportadas en aislantes es diferente al de las soportadas en semiconductores.<sup>[56]</sup>

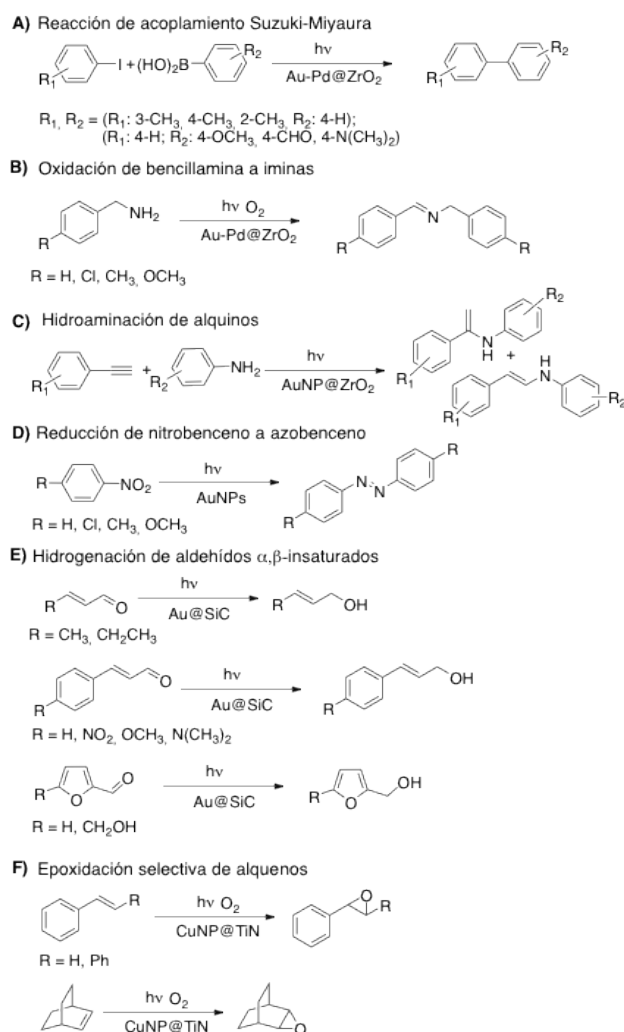
Dada la variedad de mecanismos posibles gracias a la combinación de MNP con soportes de distinta naturaleza química, encontramos diversos ejemplos de aplicación de estos fotocatalizadores para síntesis de azo compuestos por acoplamiento reductor de derivados nitro aromáticos<sup>[70]</sup>; oxidación de alcoholes<sup>[68,71]</sup> y metano;<sup>[72]</sup> y de acoplamiento cruzado Suzuki-Miyaura<sup>[71]</sup> entre otros.<sup>[65,71]</sup>

En el Esquema 2 se muestran algunos ejemplos ilustrativos de fotocatalisis con luz visible basados en MNP o aleaciones y seguidamente se detallan en el texto algunos de ellos, p. ej. oro-paladio (Au-Pd) soportadas en otros materiales, para destacar las ventajas que ofrecen frente a procesos convencionales.

Las NP de aleación Au-Pd soportadas en  $ZrO_2$  (Au-Pd @ $ZrO_2$ ) absorben la luz visible y mejoran la conversión de varias reacciones a temperatura ambiente tales como la reacción de acoplamiento cruzado Suzuki-Miyaura (Esquema 2A), la oxidación de bencilaminas a iminas (Esquema 2B), y la oxidación selectiva de alcoholes aromáticos a los aldehídos y cetonas correspondientes y la oxidación



**Esquema 1.** A) Esquema de reacción para la reducción de carbonilos fotocatalizada por AgNP.<sup>[65]</sup> B) Esquema de reacción para la oxidación de alcoholes bencílicos fotocatalizada por AuNP.<sup>[66]</sup>

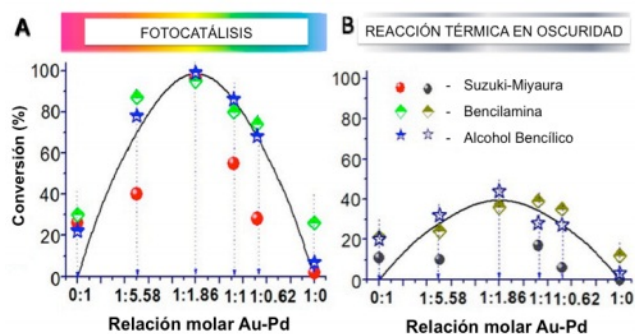


**Esquema 2.** Otros ejemplos de reacciones fotocatalizadas con nanopartículas metálicas soportadas: A) Reacción de acoplamiento Suzuki-Miyaura<sup>[71]</sup>; B) Oxidación de benzilamina a iminas<sup>[71]</sup>; C) Hidroaminación de alquinos<sup>[71]</sup>; D) Reducción de nitrobenzeno a azobenceno<sup>[70,71]</sup>; E) Hidrogenación de aldehídos  $\alpha,\beta$ -insaturados<sup>[73]</sup>; F) Epoxidación selectiva de alquenos (lineales, aromáticos, terminales y conjugados)<sup>[74]</sup>

de fenol.<sup>[71]</sup> La relación molar Au/Pd de las NP de aleación determina tanto la heterogeneidad electrónica como la distribución de sitios Pd en la superficie NP y por ello, tiene un impacto importante en el rendimiento de la fotocatalisis (Figura 3). Por ejemplo, la mejor conversión para la PMC en la reacción de acoplamiento cruzado Suzuki-Miyaura (Esquema 2A;  $R_1:3\text{-CH}_3, R_2:4\text{-H}$ ), fue 96% frente a un 37% lograda térmicamente a 30°C con una relación Au/Pd de 1: 1.86.<sup>[71]</sup>

Un buen ejemplo de efecto sinérgico entre el soporte y la nanopartícula es el de la síntesis de propargilaminas (a partir de aldehído, una amina y un alquino) fotocatalizada por AuNP soportadas en óxido de zinc (AuNP@ZnO).<sup>[75]</sup> La síntesis se lleva a cabo en tan solo 2 horas de exposición LED en el visible (532 nm) a temperatura ambiente gracias a la excitación selectiva de las AuNP (Figura 4).

Estas son las condiciones de reacción más suaves reportadas hasta la fecha para este tipo de reacción de acoplamiento comparado con las condiciones térmicas típi-

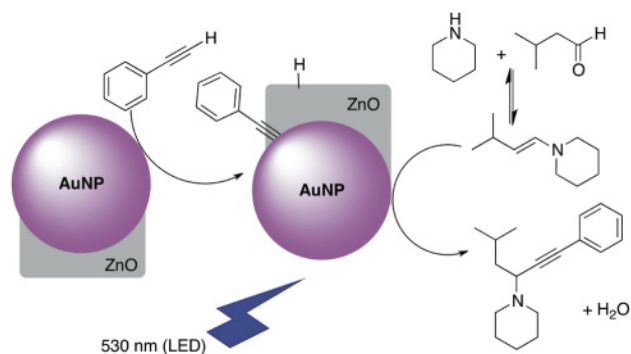


**Figura 3.** Dependencia del rendimiento de Au-Pd@ZrO<sub>2</sub> en la relación molar Au-Pd de las NP de aleación en (A) la reacción fotocatalítica (longitud de onda de excitación 400-750 nm) y (B) la reacción térmica (30°C) en la oscuridad para tres reacciones distintas: acoplamiento cruzado Suzuki-Miyaura, oxidación de benzilamina, y oxidación de alcohol benzílico.<sup>[71]</sup> Adaptada con permiso de la American Chemical Society

cas en las cuales se emplean alrededor de 100°C y tiempos de reacción en el rango de 8-16 h.<sup>[76]</sup> El mecanismo propuesto podría implicar tanto procesos de transferencia electrónica como térmicos pero, indudablemente, la utilización de ZnO como soporte ha sido fundamental por su interacción con el fenilacetileno para obtener rendimientos de reacción óptimos.<sup>[75]</sup> En primer lugar, los grupos alquino se adsorben en la superficie de AuNP debido a la alquino-filia de las especies de oro<sup>[77]</sup> y en ZnO (debido tanto a su basicidad como al posible aumento de la eficacia de síntesis por la presencia Zn<sup>2+</sup>).<sup>[78]</sup> Entonces, la enamina formada entre el aldehído y la amina interactúa con el complejo alquino-[Au@ZnO] para dar lugar a la propargilamina.<sup>[75]</sup>

La oxidación de metano es otro ejemplo de fotocatalisis con nanopartículas de plata soportadas en ZnO bajo irradiación con luz solar simulada a temperatura ambiente a presión atmosférica. El ZnO puede fotocatalizar eficientemente la oxidación pero la decoración con AgNP mejora aún más la actividad fotocatalítica.<sup>[72]</sup> Las AgNP extienden la utilización de la luz visible y actúan como receptor de electrones que reduce la recombinación de electrones y huecos en la superficie de ZnO.<sup>[72]</sup>

Gracias a la fotocatalisis con AuNP soportadas en carburo de silicio (SiC) se ha logrado hidrogenar una gran



**Figura 4.** Mecanismo propuesto para el acoplamiento ternario entre isovaleraldehído, piperidina y fenilacetileno mediado por AuNP@ZnO con luz visible (LED 532 nm).<sup>[75]</sup> Adaptada con permiso de la Royal Society of Chemistry

variedad de aldehídos  $\alpha,\beta$ -insaturados a los alcoholes correspondientes bajo irradiación con luz visible a 20°C (Esquema 2E).<sup>[73]</sup> Comparativamente, la hidrogenación selectiva de aldehídos  $\alpha,\beta$ -insaturados (p. ej. cinamaldehído: compuesto responsable del sabor y del olor característico de la canela) es especialmente difícil mediante catálisis heterogénea, debido a que la hidrogenación del doble enlace C=C es mucho más favorable que la del grupo carbonilo (termodinámica y cinéticamente).<sup>[79]</sup>

Por otro lado, la aplicación de CuNP está dificultada normalmente por su inestabilidad en aire. Aún así, se pueden diseñar fotocatalizadores heterogéneos en los que las CuNP permanecen en el estado metálico. Por ejemplo, las CuNP soportadas en nitrato de titanio (CuNP@TiN), además de ser estables en el aire, fotocatalizan la epoxidación selectiva de varios alquenos (lineales, aromáticos, terminales y conjugados) con O<sub>2</sub> o incluso aire bajo irradiación en visible a temperaturas moderadas (Esquema 2F).<sup>[74]</sup>

## CONCLUSIONES

Es crucial conseguir selectividad y buenos rendimientos en la síntesis de compuestos químicos de la forma más eficiente en términos energéticos. En este contexto, el aprovechamiento de la luz solar (gratuita y abundante) para fotocatalisis permite llevar a cabo (o mejorar) procesos químicos térmicamente inalcanzables evitando condiciones de reacción severas. Así, prevenimos la formación de residuos y contribuimos a reducir las emisiones. Indudablemente, estamos presenciando un crecimiento en el número de trabajos sobre nuevas reacciones fotocatalíticas inducidas con luz visible aunque debemos hacer un esfuerzo para conseguir ampliar los resultados al uso de luz solar directa.

Las nanopartículas metálicas pueden absorber la luz solar y generar energía térmica (calor) o química y han demostrado su utilidad en procesos fotocatalíticos muy diversos. Su versatilidad para combinarse con otros soportes sólidos, ofrece además sinergias que permiten nuevas reactividades tanto para fotocatalisis positiva (nuevas herramientas para la síntesis orgánica) como para fotodegradaciones (p. ej. purificaciones de aire y agua).

## AGRADECIMIENTOS

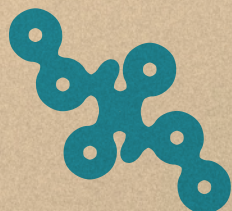
La autora agradece el apoyo económico de la Fundación Ramón Areces y del Ministerio de Ciencia e Innovación (programa Ramón y Cajal). Gracias también al profesor Miguel Ángel Sierra (Departamento de Orgánica de la UCM) y a la revista *Anales de Química* por la invitación. Fotografía/retrato: Toni Balanzà.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Hodson, *Nature* **2017**, *550*, S53-S53.  
 [2] J. Barluenga, *An. Quím.* **2011**, *107*, 10-16; B. Herradón, *An. Quím.* **2012**, *108*.

- [3] R. Noyori, *Nature* **2009**, *1*, 5-6.  
 [4] The Chemical Professional's Code of Conduct, ACS, 2016.  
 [5] D. A. Lashof, D. R. Ahuja, *Nature* **1990**, *344*, 529-531.  
 [6] T. Das, H. Cabezas, *Environ. Prog. Sustainable Energy* **2018**, *37*, 73-81; R. Eires, A. Camoes, S. Jalali, *Mater. Sci. Forum* **2008**, *587-588*, 908-912.  
 [7] R. Mestres, *Educ. Quím.* **2013**, *24*, 103-112.  
 [8] P. Anastas, N. Eghbali, *Chem. Soc. Rev.* **2010**, *39*, 301-312.  
 [9] E. S. Beach, Z. Cui, P. T. Anastas, *Energy Environ. Sci.* **2009**, *2*, 1038-1049.  
 [10] B. Altava, M. I. Burguete, S. V. Luis, *Educ. Quím.* **2013**, *24*, 132-138.  
 [11] P. T. Anastas, J. C. Warner, Oxford University Press, New York, **1998**, p. 30; S. Tang, R. Bourne, R. Smith, M. Poliakoff, *Green Chem.* **2008**, *10*, 268-269.  
 [12] D. King, *Science* **2016**, *351*, 107.  
 [13] P. Williamson, *Nature* **2016**, *530*, 153-155.  
 [14] M. A. Sierra, *An. Quím.* **2017**, *113*, 74.  
 [15] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, *Nat. Mater.* **2016**, *15*, 117-120.  
 [16] J. A. Castro-Osma, *An. Quím.* **2016**, *112*, 207-215.  
 [17] Red temática sobre "Valorización Química Sostenible de CO<sub>2</sub>" ([www.valco2.unican.es](http://www.valco2.unican.es)).  
 [18] K. Vance, G. Falzone, I. Pignatelli, M. Bauchy, M. Balonis, G. Sant, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2015**, *54*, 8908-8918.  
 [19] Red de excelencia para desarrollo de combustibles solares (fotofuel.org).  
 [20] F. Fresno, P. Jana, P. Reñones, J. M. Coronado, D. P. Serrano, V. A. de la Peña O'Shea, *Photochem. Photobiol. Sci.* **2017**, *16*, 17-23.  
 [21] Niels Berghout, Machteld van den Broek and Ernst Worrell (Utrecht University); Dolf Gielen, Deger Saygin and Nicholas Wagner (IRENA) IRENA (2017), "Synergies between renewable energy and energy efficiency, a working paper based on REmap", International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, [www.irena.org/remap](http://www.irena.org/remap)  
 [22] RETHinking Energy: Renewable Energy and Climate Change (International Renewable Energy Agency, 2015); <http://go.nature.com/98eHfe>  
 [23] Renewable Power Generation Costs in 2014 (International Renewable Energy Agency, 2015); <http://go.nature.com/5Vp2l5>  
 [24] R. R. Hernandez, M. K. Hoffacker, M. L. Murphy-Mariscal, G. C. Wu, M. F. Allen, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2015**, *112*, 13579-13584.  
 [25] [isolaralliance.org](http://isolaralliance.org)  
 [26] Disposición 9067 del BOE núm. 180 de 2017.  
 [27] D. Cambié, F. Zhao, V. Hessel, M. G. Debije, T. Noël, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2017**, *56*, 1050-1054.  
 [28] M. Oelgemöller, *Chem. Rev.* **2016**, *116*, 9664-9682.  
 [29] G. Ciamician, *Science* **1912**, *36*, 385-394.  
 [30] K. Zeitler, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 9785-9789.  
 [31] S. Protti, M. Fagnoni, *Photochem. Photobiol. Sci.* **2009**, *8*, 1499-1516.  
 [32] P. Klán, J. Wirz, *Photochemistry of organic compounds: from concepts to practice*, 1ST ed. ed., Wiley-Blackwell, **2009**.  
 [33] R. E. Galian, J. Pérez-Prieto, *Energy Environ. Sci.* **2010**, *3*, 1488-1498.  
 [34] D. Ravelli, D. Dondi, M. Fagnoni, A. Albin, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 1999-2011.  
 [35] G. Palmisano, V. Augugliaro, M. Pagliaro, L. Palmisano, *Chem. Commun.* **2007**, 3425-3437.  
 [36] *Green Chemistry and Sustainable Technology* (Eds.: J. C. Colmenares, Y.-J. Xu), Springer, **2016**.

- [37] A. Fujishima, K. Honda, *Nature* **1972**, *238*, 37-38; A. Kudo, Y. Miseki, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 253-278; Z. Zou, J. Ye, K. Sayama, H. Arakawa, *Nature* **2001**, *414*, 625-627; E. Borgarello, J. Kiwi, E. Pelizzetti, M. Visca, M. Gratzel, *Nature* **1981**, *289*, 158-160; R. M. Navarro Yerga, M. C. Álvarez Galván, F. del Valle, J. A. Villoria de la Mano, J. L. G. Fierro, *ChemSusChem* **2009**, *2*, 471-485.
- [38] S. Linic, P. Christopher, D. B. Ingram, *Nat. Mater.* **2011**, *10*, 911-921.
- [39] A. Kafizas, S. Kellici, J. A. Darr, I. P. Parkin, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **2009**, *204*, 183-190; S. Giulio, P. Faraldi, N. Russo, D. Fino, G. Saracco, V. Specchia, *J. Appl. Electrochem.* **2009**, *39*, 2265-2273; A. Bozzi, T. Yuranova, J. Kiwi, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **2005**, *172*, 27-34.
- [40] T. P. Yoon, M. A. Ischay, J. Du, *Nature Chem.* **2010**, *2*, 527-532.
- [41] D. G. Nocera, *Energy Environ. Sci.* **2010**, *3*, 993-995.
- [42] A. Albini, L. Germani, in *Handbook of Synthetic Photochemistry* (Eds.: A. Albini, M. Fagnoni), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, **2010**.
- [43] C. Casadevall, A. Call, Z. Codolà, F. Acuña-Parés, J. Lloret-Fillol, *An. Quím.* **2016**, *112*, 133-141.
- [44] M. L. Marin, L. Santos-Juanes, A. Arques, A. M. Amat, M. A. Miranda, *Chem. Rev.* **2012**, *112*, 1710-1750.
- [45] A. R. Khataee, M. Fathinia, in *Recent Advances in Photocatalytic Processes by Nanomaterials* (Ed.: S. L. Sun), Elsevier Science Ltd., United Kingdom, **2013**, pp. 267-288; M. R. Hoffmann, S. T. Martin, W. Choi, D. W. Bahnemann, *Chem. Rev.* **1995**, *95*, 69-96.
- [46] A. Corma, V. Fornés, H. García, M. A. Miranda, J. Primo, M. J. Sabater, *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, *116*, 2276-2280; A. Corma, H. García, *Chem. Commun.* **2004**, *13*, 1443-1459.
- [47] S. Protti, M. Fagnoni, *Photochem. Photobiol. Sci.* **2009**, *8*, 1499-1516; P. Esser, B. Pohlmann, H.-D. Scharf, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1994**, *33*, 2009-2023.
- [48] M. González-Béjar, J. Pérez-Prieto, J. C. Scaiano, in *Green Chemistry* (Ed.: R. Luque), Nova Science Publishers, Inc., **2012**, pp. 112-132.
- [49] A. Marinas Aramendía, *An. Quím.* **2007**, *103*, 30-37; J. C. Colmenares, R. Luque, J. M. Campelo, F. Colmenares, Z. Karpíński, A. A. Romero, *Materials* **2009**, *2*, 2228-2258.
- [50] M. Liras, M. Iglesias, F. Sánchez, *Macromolecules* **2016**, *49*, 1666-1673; M. Liras, M. Pintado-Sierra, M. Iglesias, F. Sanchez, *J. Mater. Chem. A* **2016**, *4*, 17274-17278.
- [51] M. Álvaro, E. Carbonell, B. Ferrer, F. X. Llabrés i Xamena, H. García, *Chem. Eur. J.* **2007**, *13*, 5106-5112.
- [52] M. A. Mahmoud, R. Narayanan, M. A. El-Sayed, *Acc. Chem. Res.* **2013**, *46*, 1795-1805.
- [53] S. Linic, P. Christopher, H. Xin, A. Marimuthu, *Acc. Chem. Res.* **2013**, *46*, 1890-1899.
- [54] A. Eppler, G. Rupprechter, L. Guzzi, G. A. Somorjai, *J. Phys. Chem. B* **1997**, *101*, 9973-9977.
- [55] M. Sun, in *Catalysis by Nanoparticles* (Ed.: S. L. Sun), Elsevier Science Ltd., United Kingdom, **2013**, pp. 473-487.
- [56] S. Sarina, E. R. Waclawik, H. Zhu, *Green Chem.* **2013**, *15*, 1814-1833.
- [57] K. Ueno, H. Misawa, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* **2013**, *15*, 31-52; P. Wang, B. Huang, Y. Dai, M.-H. Whangbo, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2012**, *14*, 9813-9825.
- [58] X. Zhang, Y. L. Chen, R.-S. Liu, D. P. Tsai, *Rep. Prog. Phys.* **2013**, *76*, 016601.
- [59] M. González-Béjar, in *Silver Nanoparticle Applications: In the Fabrication and Design of Medical and Biosensing Devices*, Springer International Publishing, Cham, **2015**, pp. 71-92.
- [60] C. J. Bueno-Alejo, A. Arca-Ramos, J. L. Hueso, G. Barbillon, in *Nanoplasmonics - Fundamentals and Applications*, InTech, Rijeka, **2017**, p. Ch. 14.
- [61] H. Goesmann, C. Feldmann, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 1362-1395.
- [62] F. Tan, N. Wang, D. Y. Lei, W. Yu, X. C. Zhang, *Adv. Optical Mater.* **2017**, *5*.
- [63] K. G. Stamplecoskie, J. C. Scaiano, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 1825-1827.
- [64] R. J. Chimentão, I. Kirm, F. Medina, X. Rodríguez, Y. Cesteros, P. Salagre, J. E. Sueiras, *Chem. Commun.* **2004**, 846-847; R. Xu, D. Wang, J. Zhang, Y. Li, *Chem. Asian J.* **2006**, *1*, 888-893.
- [65] M. J. Landry, A. Gellé, B. Y. Meng, C. J. Barrett, A. Moores, *ACS Catal.* **2017**, *7*, 6128-6133.
- [66] G. L. Hallett-Tapley, M. J. Silvero, M. González-Béjar, M. Grenier, J. C. Netto-Ferreira, J. C. Scaiano, *J. Phys. Chem. C* **2011**, *115*, 10784-10790.
- [67] P. V. Kamat, *J. Phys. Chem. B* **2002**, *106*, 7729-7744; K. L. McGilvray, M. R. Decan, D. Wang, J. C. Scaiano, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 15980-15981.
- [68] G. L. Hallett-Tapley, M. J. Silvero, C. J. Bueno-Alejo, M. González-Béjar, C. D. McTiernan, M. Grenier, J. C. Netto-Ferreira, J. C. Scaiano, *J. Phys. Chem. C* **2013**, *117*, 12279-12288.
- [69] J. M. Campelo, D. Luna, R. Luque, J. M. Marinas, A. A. Romero, *ChemSusChem* **2009**, *2*, 18-45; A. Corma, H. García, *Chem. Soc. Rev.* **2008**, *37*, 2096-2126.
- [70] H. Zhu, X. Ke, X. Yang, S. Sarina, H. Liu, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 9657-9661.
- [71] S. Sarina, H. Zhu, E. Jaatinen, Q. Xiao, H. Liu, J. Jia, C. Chen, J. Zhao, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 5793-5801.
- [72] X. Chen, Y. Li, X. Pan, D. Cortie, X. Huang, Z. Yi, *Nat. Commun.* **2017**, *7*, 12273.
- [73] C.-H. Hao, X.-N. Guo, Y.-T. Pan, S. Chen, Z.-F. Jiao, H. Yang, X.-Y. Guo, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 9361-9364.
- [74] Y. Huang, Z. Liu, G. Gao, G. Xiao, A. Du, S. Bottle, S. Sarina, H. Zhu, *ACS Catal.* **2017**, *7*, 4975-4985.
- [75] M. González-Béjar, K. Peters, G. L. Hallett-Tapley, M. Grenier, J. C. Scaiano, *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 1732-1734.
- [76] G. Shore, W.-J. Yoo, C.-J. Li, M. G. Organ, *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 126-133; Y. Zhou, T. He, Z. Wang, *Arkivoc* **2008**, *xiii*, 80-90; B. Sreedhar, A. S. Kumar, P. S. Reddy, *Tetrahedron Lett.* **2010**, *51*, 1891-1895; M. L. Kantam, V. Balasubrahmanyam, K. B. S. Kumar, G. T. Venkanna, *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 7332-7334; B. Sreedhar, P. S. Reddy, C. S. V. Krishna, P. V. Babu, *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 7882-7886.
- [77] K. Zhang, J. I. Cutler, J. Zhang, D. Zheng, E. Auyeung, C. A. Mirkin, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 15151-15153; S. Zhang, K. L. Chandra, C. B. Gorman, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 4876-4877.
- [78] C.-J. Li, *Acc. Chem. Res.* **2010**, *43*, 581-590; L. Zani, C. Bolm, *Chem. Commun.* **2006**, 4263-4275; E. Ramu, R. Varala, N. Sreelatha, S. R. Adapa, *Tetrahedron Lett.* **2007**, *48*, 7184-7190.
- [79] J. Shi, M. Zhang, W. Du, W. Ning, Z. Hou, *Catal. Sci. Technol.* **2015**, *5*, 3108-3112.



# XXVII Reunión Bienal de Química Orgánica

[www.biqos2018.com](http://www.biqos2018.com)

Santiago de Compostela  
20-22/06/2018

## INVITED SPEAKERS

**Manuel Alcarazo**

Georg-August-Universität  
Göttingen, Germany

**Gonzalo Blay**

Universidad de Valencia

**Romen Carrillo**

IPNA-CSIC, Tenerife

**Aitziber L. Cortajarena**

CIC biomaGUNE, San Sebastián

**Arjan W. Kleij**

ICIQ, Tarragona

**Rodolfo Lavilla**

Universitat de Barcelona

**Luis A. López**

Universidad de Oviedo

**Belen Martín-Matute**

Stockholm University, Sweden

**Emilio M. Pérez**

IMDEA Nanociencia, Madrid

**Uwe Pischel**

CIQSO, Huelva

**Félix Serratosa Medal 2018**

**Ignacio Ribas Medal 2018**

## PLENARY SPEAKERS

**Takuzo Aida**

School of Engineering  
The Univ. of Tokyo, Japan

**Mercedes Amat**

Universitat de Barcelona, Spain

**Jeffrey Bode**

ETH Zurich, Switzerland

**Cynthia Burrows**

The University of Utah, USA

**Scott Miller**

Yale University, Connecticut, USA



# Aprender física y química “jugando” con laboratorios virtuales

Juan José Serrano Pérez

**Resumen:** Las nuevas tecnologías tienen un gran impacto en todos los aspectos de nuestra sociedad, incluyendo la enseñanza y el mundo académico en general. Por lo que respecta al proceso de enseñanza-aprendizaje, las modernas corrientes pedagógicas fomentan un rol más activo por parte del alumnado, junto con actividades motivantes que den lugar a un aprendizaje significativo. Y dado que una forma excelente de aprender es jugando, los videojuegos educativos están actualmente en boga. En este artículo se propone el uso de laboratorios virtuales que permita a los estudiantes desarrollar toda una serie de competencias clave.

**Palabras clave:** gamificación, laboratorios virtuales, constructivismo, aprendizaje significativo, simulaciones.

**Abstract:** New technologies have a great impact in our society, including learning and academia in general. Regarding the teaching and learning process, the new pedagogical trends foster a more active students' role, together with motivating activities which give rise to meaningful learning. And since learning through play is an excellent way of learning, educational videogames are currently in vogue. In this paper the use of virtual labs is suggested to allow students to develop several key competencies.

**Keywords:** gamification, virtual laboratories, constructivism, significant learning, simulations.

## INTRODUCCIÓN

La educación científica y tecnológica está experimentando un profundo cambio, tanto a nivel de medios como de estilos pedagógicos, así como de enfoque y perspectiva,<sup>[1-3]</sup> principalmente por la aplicación de las *Tecnologías de la Información y la Comunicación* (TIC) al proceso de enseñanza-aprendizaje. Cuando estas herramientas están adecuadamente integradas en el currículo, suelen denominarse *Tecnologías del Aprendizaje y del Conocimiento* (TAC).

No sólo la enseñanza presencial tradicional está siendo complementada con otras modalidades como *e-learning*, *b-learning* y *m-learning*,<sup>[4]</sup> sino que se ha asentado en las modernas corrientes pedagógicas un cambio de paradigma: pasar de un sistema educativo basado en la enseñanza a otro distinto basado en el aprendizaje, alejándose de la perspectiva “tradicional” según la cual “contar” algo en clase equivalía a “enseñar”. En otras palabras, la típica clase magistral se está convirtiendo en un concepto anacrónico.<sup>[5]</sup>

En la actualidad impera una corriente constructivista<sup>[6-8]</sup> en la cual el docente, más que un mero transmisor

de conocimientos, es un guía o facilitador cuyo trabajo consiste en diseñar entornos de aprendizaje adecuados para que el discente los haga suyos, y así pueda aprender a partir de sus conocimientos previos. En definitiva, se trata de fomentar el aprendizaje activo y significativo mediante el uso de estrategias metodológicas centradas en el estudiante.

Este tipo de aprendizaje está demostrando ser muy útil en el caso de la enseñanza de materias de ciencias.<sup>[9,10]</sup> En este sentido, la clave es conseguir que el estudiante no se muestre pasivo en el aula, sino que participe y actúe. Esto se expresa de forma muy adecuada con el *cono de la experiencia* de Dale,<sup>[10-13]</sup> que representa la profundidad del aprendizaje realizado con la ayuda de diversos medios. Básicamente muestra que cuanto más activamente implicado esté el alumno en el proceso de enseñanza-aprendizaje, más significativo le resultará dicho proceso. Esto está relacionado, a su vez, con la *taxonomía de Bloom*<sup>[14]</sup> de los objetivos didácticos, pudiendo llegar el discente a llevar a cabo actividades cognitivas de orden superior si su implicación es la adecuada.



J. J. Serrano Pérez

Universidad Europea de Valencia  
Departamento de Ciencias Biomédicas  
c/General Elío, 8, 46010 Valencia (España)  
C-e: [juanjose.serrano@universidadeuropea.es](mailto:juanjose.serrano@universidadeuropea.es)

Recibido: 24/07/2017. Aceptado: 04/12/2017.

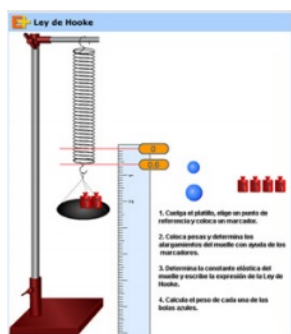
## LABORATORIOS VIRTUALES

Los laboratorios virtuales son plataformas interactivas que se adaptan a diferentes estilos y ritmos de aprendizaje.<sup>[4,15-19]</sup> De hecho, nos encontramos páginas web gratuitas con experiencias virtuales en todas las ciencias básicas, como física,<sup>[4,16,20-22]</sup> química<sup>[18,23-25]</sup> o biología<sup>[26-28]</sup> (véase Tabla 1 y Figuras 1-3). Su uso en asignaturas científicas está actualmente en boga por una serie



**Tabla 1.** Ejemplos de laboratorios virtuales en inglés y/o en español, válidos para diferentes niveles educativos (Primaria, Secundaria, Bachillerato y Universidad)

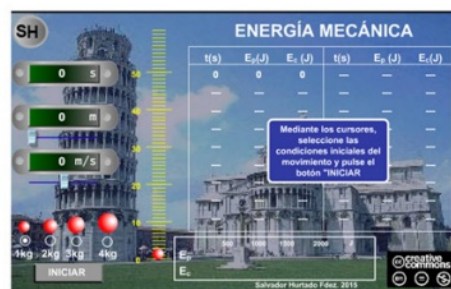
Título	Web	Materias	Áreas de Física y Química
Phet Interactive Simulations	<a href="http://bit.ly/1JZCOMn">http://bit.ly/1JZCOMn</a>	Física, Química, Biología, Matemáticas y Ciencias de la Tierra	Movimiento; Sonido y Ondas; Trabajo, Energía y Potencia; Calor y Termoelectricidad; Fenómenos Cuánticos; Luz y Radiación; Electricidad, Imanes y Circuitos; Química General; Química Cuántica.
Educaplus	<a href="http://bit.ly/1mwmN38">http://bit.ly/1mwmN38</a>	Física, Matemáticas, Química, Biología, Ciencias de la Tierra y Tecnología	Magnitudes; Cinemática; Dinámica; Energía; Termodinámica; Electroestática; Ondas; Cuántica; Elementos; Enlaces; Reacciones; Ionización; Gases; Formulaci6n.
Blog Laboratorio Virtual, de Salvador Hurtado Fernández	<a href="http://bit.ly/2zpB8M7">http://bit.ly/2zpB8M7</a>	Física y Química	Cinemática; Dinámica; Estática; Energía, Trabajo y Calor; Movimiento Armónico Simple; Estática de Fluidos; Ondas; Electroestática; Electrodinámica; Óptica; Física Cuántica; Física Nuclear.
Fisquiweb	<a href="http://bit.ly/2dAcrAM">http://bit.ly/2dAcrAM</a>	Física	Cinemática; Dinámica; Rozamiento; Energía; Ondas; Circuitos.
Virtual Amrita Labs	<a href="http://bit.ly/2zY008g">http://bit.ly/2zY008g</a>	Física, Química, Ingeniería y Biotecnología	Electricidad y Magnetismo; Calor y Termodinámica; Movimiento Armónico y Ondas; Física Moderna; Óptica; Mecánica; Circuitos Eléctricos; Mecánica Avanzada; Óptica de Láseres; Física del Estado Sólido; Química Física; Química Orgánica; Química Inorgánica; Química Analítica.



(a)



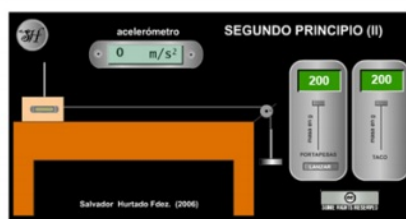
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 1.** Algunos laboratorios virtuales de física: (a) <http://bit.ly/2xYbBv>; (b) <http://bit.ly/2gUJCjg>; (c) <http://bit.ly/2zpxEch>; (d) <http://bit.ly/2h57NiC>; (e) <http://bit.ly/2imLYNH>; (f) <http://bit.ly/2xKyMDf>

de razones:<sup>[4,19,22-25,28-36]</sup> fomentan el trabajo en equipo, son motivantes, implican menos costes que los laboratorios tradicionales, fomentan la creatividad y un aprendizaje más autónomo, permiten repetir las experiencias tantas veces como sea necesario, disminuyen el miedo al error y al fracaso por parte del estudiante, facilitan la introducción de métodos híbridos de aprendizaje y actividades como el *flipped classroom* o “aula invertida” ([https://economia.elpais.com/economia/2015/10/30/actualidad/1446206875\\_723926.html](https://economia.elpais.com/economia/2015/10/30/actualidad/1446206875_723926.html)), son fácilmente “gamificables” (esto es, resulta relativamente sencillo im-

plementar mecánicas de juego con fines didácticos, tal y como se explicará más adelante) y permiten al docente llevar a cabo actividades de laboratorio sin tener que cambiar de aula.

Dentro de estas páginas web destaca *Phet Interactive Simulations*,<sup>[18,21,32,37-39]</sup> (fundada en 2002 por el ganador del Premio Nobel de Física Carl Wieman), *Educaplus* o el blog *Laboratorio Virtual* del profesor Salvador Hurtado Fernández, aunque navegando por Internet nos podemos encontrar muchos otros ejemplos útiles en mecánica cuántica,<sup>[39]</sup> química cuántica,<sup>[24]</sup> química orgánica,<sup>[25]</sup> o biofísica.<sup>[22]</sup>

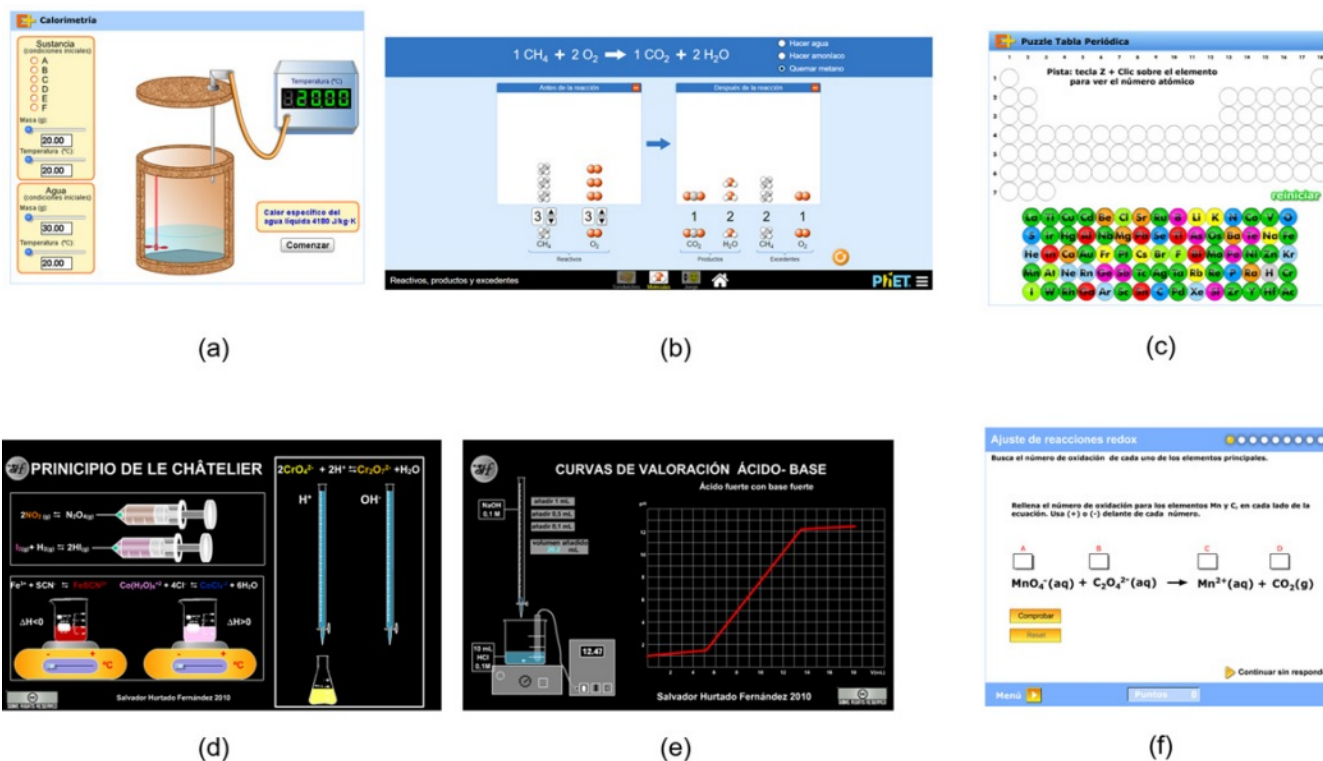


Figura 2. Algunos laboratorios virtuales de química: (a) <http://bit.ly/2zcN8zj>; (b) <http://bit.ly/1YnBli6>; (c) <http://bit.ly/2zYgVcB>; (d) <http://bit.ly/2xM6dY>; (e) <http://bit.ly/2iIxyI5>; (f) <http://bit.ly/2xLL6De>

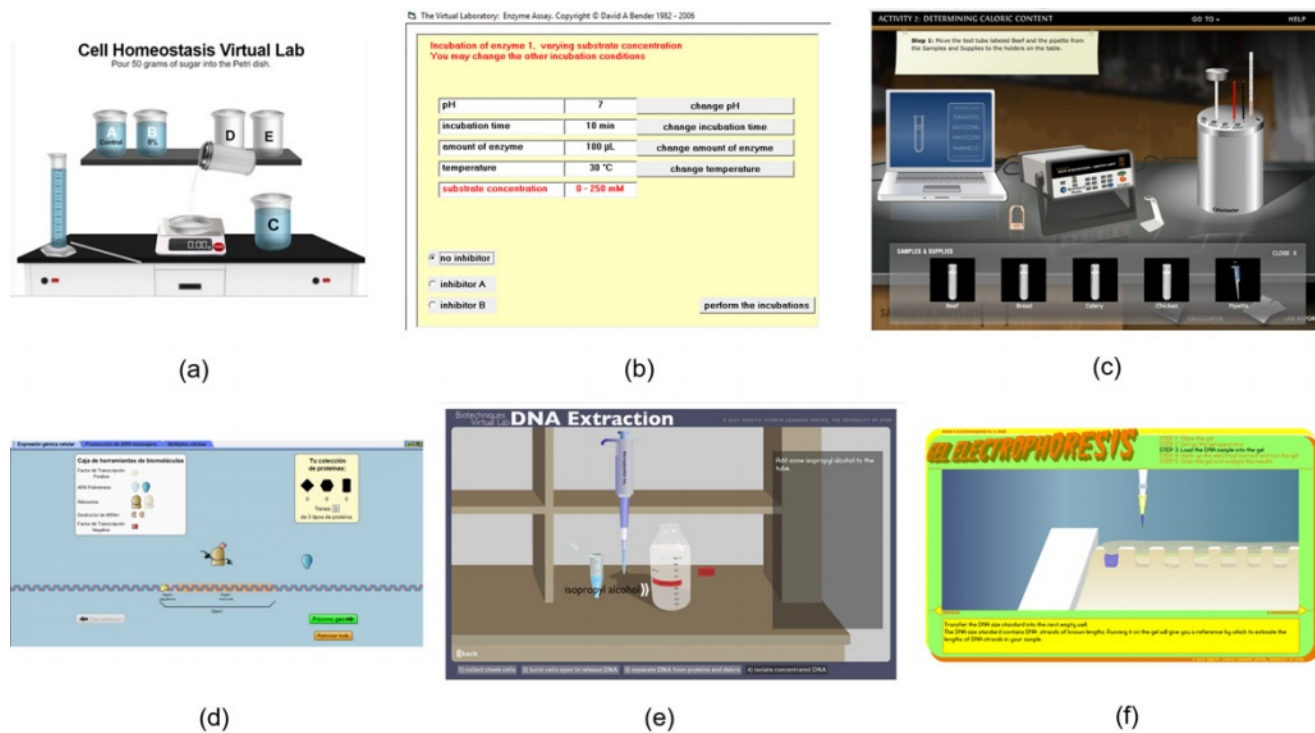


Figura 3. Algunos laboratorios virtuales de biofísica y bioquímica: (a) <http://bit.ly/2k6Jbqd>; (b) <http://bit.ly/2zoZ1Ud>; (c) <http://bit.ly/2h4wGeq>; (d) <http://bit.ly/2iUdPTD>; (e) <http://bit.ly/2A4RQgZ>; (f) <http://bit.ly/2hvhKTx>

## GAMIFICACIÓN, APRENDIZAJE BASADO EN JUEGOS Y USO DE VIDEOJUEGOS

La *gamificación*<sup>[40,41]</sup> se define como la utilización de mecánicas de juego en entornos no lúdicos para promover el desarrollo de ciertas habilidades (verbigracia: el uso de *Kahoot!* (<https://kahoot.com/>) para repasar conceptos mediante competiciones). Así, podemos tener diferentes mecánicas (retos, competición, cooperación, *feedback*, recursos, turnos, etc.) y componentes (premios, avatares, insignias, clasificaciones, niveles, puntos, equipos, etc.). Hay que destacar que, en este caso, los estudiantes no juegan a un juego, sino que usan dinámicas propias del juego. En cambio, el *aprendizaje basado en juegos* (*game-based learning*, GBL) consiste en la utilización de juegos como recursos didácticos en el proceso de enseñanza-aprendizaje. De este modo, tenemos diferentes aplicaciones de herramientas de gamificación en física y química,<sup>[42]</sup> en química física,<sup>[43,44]</sup> química general<sup>[45-47]</sup> y, en general, en todas las áreas de la química,<sup>[48-50]</sup> utilizando juegos de rol clásicos o programas de concurso como *Pasapalabra*, *¿Quiere ser millonario?*, puzles, *Tabú*...

Un paso más que aúna la gamificación y/o el GBL con las TIC es el uso de videojuegos con fines educativos.<sup>[51-53]</sup> Un videojuego es un juego electrónico que puede visualizarse en una pantalla, sea un televisor, una tableta o un *smartphone*. Nadie duda actualmente del gran impacto de los videojuegos en nuestra sociedad, siendo un fenómeno que, si bien tiene su origen en la década de 1950, empezó a tener más importancia a lo largo de la década de 1980 y despegó definitivamente con la entrada en el siglo XXI. Así, algunas sagas famosas de videojuegos ya forman parte del imaginario colectivo al mismo nivel que muchas películas, libros y canciones.

En los últimos años ha surgido un gran interés por los beneficios de los videojuegos a nivel cognitivo, motivacional, emocional y social, y su impacto positivo en la educación.<sup>[54-57]</sup> De hecho, su uso moderado puede tener grandes ventajas, aparte de su valor de entretenimiento, y ya deja de parecernos extraño, por ejemplo, que se pueda aprender química de polímeros a través de un videojuego.<sup>[58]</sup> Así, tenemos videojuegos muy útiles en ciencias,<sup>[58-60]</sup> como por ejemplo en química orgánica para repasar conceptos de estereoquímica.<sup>[61]</sup>

Cabe destacar que, en general, hay muy pocas diferencias de diseño y de dinámica entre un laboratorio virtual y un videojuego científico educativo. Iniciativas como *Phet* o *Educaplus* explotan esta idea (en la primera se nos anima directamente a "jugar con las animaciones").<sup>[38]</sup> Y, al igual que ocurre en los videojuegos, nos podemos encontrar laboratorios virtuales en "primera persona", que son la mayoría, y en los cuales podemos llevar a cabo un determinado experimento manipulando los componentes que nos ofrece la web, o en "tercera persona", en los cuales podemos ver a un avatar humano que se mueve por el laboratorio y que va siguiendo nuestras instrucciones, como en el caso de algunos de los labora-

torios virtuales de la Universidad Politécnica de Madrid (<https://3dlabs.upm.es/>).

Además, esta posibilidad lúdica podría animar a los estudiantes a que exploraran *motu proprio* los laboratorios virtuales, llevando a cabo experiencias diferentes a las propuestas en el aula, bien para repasar otros conceptos complementarios, bien por simple curiosidad, tanto de forma individual como grupal. En este sentido, constituyen un reto abordable para el estudiante, teniendo en cuenta sus competencias y su potencial, permitiendo que desarrolle su capacidad dentro de su *zona de desarrollo próximo*,<sup>[6-8]</sup> que es la distancia entre el nivel de desarrollo efectivo del alumno (aquello que es capaz de hacer por sí mismo) y su nivel de desarrollo potencial (aquello que sería capaz de hacer con la ayuda del docente o de un compañero más capaz).

### UN EJEMPLO SENCILLO

Una buena actividad interdisciplinar puede ser el estudio del metabolismo. Las reacciones metabólicas (catabólicas y anabólicas) no sólo tienen un gran interés en bioquímica, sino que también se relacionan con importantes conceptos de física y química general por su carácter energético y por la implicación de reacciones redox. El laboratorio "Comida y Ejercicio", disponible en *Phet Interactive Simulations* tanto en inglés como en español (véase Figura 4), puede resultar muy adecuado.

Los objetivos de la actividad son: (i) entender la relación entre alimentación y ejercicio físico en el funcionamiento del organismo, y (ii) diseñar diferentes tipos de dietas. El procedimiento experimental incluye los siguientes aspectos enfocados al discente:

Sigue los pasos desarrollados en la página web. Es mejor elegir la siguiente configuración de partida: sistema métrico; estilo de vida: elegir el que más convenga (muy sedentario/sedentario/actividad moderada/muy activo); edad: la de un miembro del grupo; altura: la de ese mismo miembro del grupo; grasa corporal: dejar la que determine automáticamente el programa.

En la simulación puedes ir modificando los alimentos ingeridos por el sujeto, así como la actividad física que realiza.

A continuación, tienes que hacer las siguientes simulaciones:

- En la primera, tienes que conseguir que el sujeto tenga un estilo de vida saludable alcanzando un equilibrio entre alimentación y actividad física.
- En la segunda, diseña un estilo de vida en la cual el sujeto adelgace continuamente. Cuando se acerque a un nivel crítico (o fallezca), intenta cambiar la dieta y el estilo de vida para recuperar un estado de salud óptimo.
- En la tercera, diseña un estilo de vida en la cual el sujeto engorde continuamente. Cuando se acerque

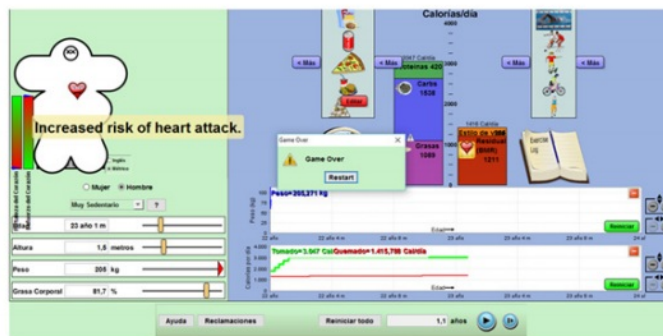
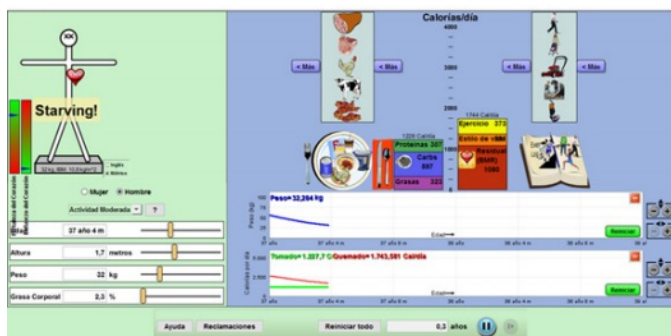
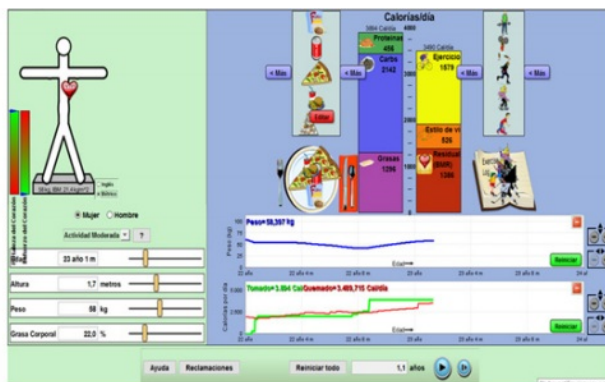


Figura 4. Imágenes del laboratorio “Comida y Ejercicio” (<http://bit.ly/2huDjUg>) disponible en Phet Interactive Simulations

© 2018 Real Sociedad Española de Química

a un nivel crítico, intenta cambiar la dieta y el estilo de vida para recuperar un estado de salud óptimo. Hay que tener cuidado porque el sujeto podría fallecer si no se cambia a tiempo el estilo de vida.

Para empezar cada simulación, pulsa PLAY. Durante la simulación, puedes ver cómo varía la forma del sujeto, así como el estado de su corazón. También puedes ver cómo varía su peso, la cantidad de calorías ingeridas y la cantidad de calorías quemadas. En todo momento puedes añadir o quitar alimentos y añadir o eliminar actividades físicas. Además, en la parte superior podrás ver desglosadas las calorías ingeridas (grasas, carbohidratos y proteínas) y las quemadas (residual, estilo de vida y ejercicio).

Por último, los estudiantes deben responder a una serie de cuestiones y debatir los resultados obtenidos y sus observaciones. Resulta interesante comparar cómo han resuelto los diferentes grupos de alumnos las situaciones críticas y quiénes han conseguido revertir la situación antes del fallecimiento del sujeto. Las preguntas son las siguientes:

- a) ¿En qué condiciones la masa de una persona se mantiene constante?
- b) En un estilo de vida saludable, ¿cuál es la relación entre la cantidad de calorías ingeridas y la cantidad de calorías quemadas?

- c) ¿Qué sucede si el sujeto adelgaza sin parar durante un tiempo determinado?
- d) ¿Qué sucede si el sujeto engorda sin parar durante un tiempo determinado?
- e) En ambos casos, ¿cuánto tiempo puede sobrevivir la persona? ¿Cuál ha sido la esperanza de vida en nuestro caso particular?
- f) ¿Crees que es posible, al menos en teoría, mantener un estilo de vida saludable sin apenas hacer ejercicio físico?
- g) Viendo los resultados, ¿qué suele tener un impacto mayor en la masa y la salud de la persona: la dieta o el ejercicio físico?

Por mi experiencia personal, al hacer esta actividad en clase he podido constatar un aumento de motivación por parte de los estudiantes, lo cual considero muy positivo porque, en ocasiones, el aprendizaje activo funciona mejor con estudiantes ya motivados de entrada, ya que los estudiantes poco motivados suelen preferir adoptar una actitud muy pasiva en el aula. Para “convencerles” de las ventajas de participar en el proceso de enseñanza-aprendizaje, este tipo de experiencias de laboratorio presentadas como un videojuego pueden ser muy estimulantes. Por otro lado, el enfoque lúdico de la actividad puede animar a los estudiantes a experimentar por ellos mismos (fomentando al aprendizaje autónomo) y llevando a cabo experimentos alternativos que no están incluidos en el guion de prácticas. Así, algunos estudian-

tes se sorprenden de que el sujeto adelgace sin parar y no se quede en un peso constante si no le dan comida ni le fuerzan a hacer ejercicio, y a partir del debate en clase ya no se les olvida el concepto de *metabolismo basal* ni su importancia.

## CONCLUSIONES

La enseñanza no puede ser ajena a los cambios en la sociedad actual, y por ello es muy importante aprovechar las oportunidades que nos brinda la tecnología. Además, no hemos de olvidar que los estudiantes del siglo XXI viven en una sociedad muy diferente a la de las postrimerías del siglo pasado, y por tanto los profesores actuales no deberíamos enseñar ciencias exactamente del mismo modo en que nos la enseñaron a nosotros. El uso de laboratorios virtuales a modo de videojuegos presenta grandes ventajas que podrían ser aprovechadas para aumentar el nivel de motivación y de implicación del alumnado, no sólo en enseñanzas medias sino también en estudios universitarios. Además, dado el carácter "abierto" que suelen tener estas simulaciones, es posible utilizarlos de diferentes formas para alcanzar objetivos didácticos muy variados, y también permiten que el estudiante explore por su cuenta diferentes alternativas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Sanmartí, I. Marchán, *Inv. y Cien.* **2015**, Octubre, 30-38.
- [2] J. S. Moore, P. A. Janowicz, *Nat. Chem.* **2009**, 1, 2-4.
- [3] I. Jérez, F. Gómez-Bravo, *Rev. Esp. Fís.* **2011**, 25, 40-46.
- [4] A. Franco, A. Beléndez, J. Ablanque, *Rev. Esp. Fís.* **2013**, 27, 49-56.
- [5] E. Mazur, *Science* **2009**, 323, 50-51.
- [6] C. Coll, E. Martín, T. Mauri, M. Miras, J. Onrubia, I. Solé, A. Zabala, *El constructivismo en el aula*, Editorial Graó, Barcelona, 18ª ed., **2007**.
- [7] J. I. Pozo, M. A. Gómez, *Aprender y enseñar ciencia: del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*, Ediciones Morata, Madrid, 7ª ed., **2006**.
- [8] N. Sanmartí, *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria*, Editorial Síntesis, Madrid, 7ª ed., **2009**.
- [9] S. Freeman, S. L. Eddy, M. McDonough, M. K. Smith, N. Okoroafor, H. Jordt, M. P. Wenderoth, *P. Natl. Acad. Sci.* **2014**, 111, 8410-8415.
- [10] G. Pinto, P. Escudero, M. Martín, *An. Quím.* **2008**, 104, 211-214.
- [11] G. Pinto, *An. Quím.* **2001**, 97, 29-36.
- [12] M. T. Oliver-Hoyo, F. Alconchel, G. Pinto, *Rev. Esp. Fís.* **2012**, 26, 38-44.
- [13] C. F. Herreid, *J. Chem. Educ.* **2012**, 90, 256-257.
- [14] D. R. Krathwohl, *Theory Into Practice* **2002**, 41, 212-264.
- [15] C. A. Alejandro Alfonso, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* **2004**, 3, 202-210.
- [16] N. D. Finkelstein, W. K. Adams, K. K. Perkins, C. Wieman, *Journal of Online Learning and Teaching* **2006**, 2, 110-121.
- [17] A. Franco, *Rev. Esp. Fís.* **2003**, 17, 63-66.
- [18] E. B. Moore, J. M. Chamberlain, R. Parson, K. K. Perkins, *J. Chem. Educ.* **2014**, 91, 1191-1197.
- [19] A. Pontes, P. Martínez, M. S. Climent, *An. Quím.* **2001**, 97, 44-50.
- [20] N. D. Finkelstein, W. K. Adams, C. J. Keller, P. B. Kohl, K. K. Perkins, N. S. Podolefsky, S. Reid, R. LeMaster, *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* **2005**, 1, 010103.
- [21] K. Perkins, W. Adams, M. Dubson, N. Finkelstein, S. Reid, C. Wieman, R. LeMaster, *The Physics Teacher* **2006**, 44, 18-23.
- [22] J. M. Deutsch, *Am. J. Phys.* **2014**, 82, 442-450.
- [23] Z. Tatli, A. Ayas, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **2010**, 9, 938-942.
- [24] J. H. Jensen, J. C. Kromann, *J. Chem. Educ.* **2013**, 90, 1093-1095.
- [25] M. P. García Armada, D. Fernández-Avilés Pedraza en *IV Congreso de Docentes de Ciencias: Experiencias docentes y estrategias de innovación educativa para la enseñanza de la Biología, la Geología, la Física y la Química* (Eds.: M. González, A. Baratas, A. Brandi), Santillana, Madrid, **2016**, pp. 229-238.
- [26] A. Sanz, J. Martínez, *Tecnología Química* **2005**, 25, 5-17.
- [27] T. A. Stuckey-Mickell, B. D. Stuckey-Danner, *Journal of Online Learning and Teaching* **2007**, 3, 105-111.
- [28] D. Moreno Mediavilla, V. Pascual López, A. Palacios Ortega en *IV Congreso de Docentes de Ciencias: Experiencias docentes y estrategias de innovación educativa para la enseñanza de la Biología, la Geología, la Física y la Química* (eds.: M. González, A. Baratas, A. Brandi), Santillana, Madrid, **2016**, pp. 257-268.
- [29] G. Amaya Franky, *El Hombre y la Máquina* **2009**, XXI, 82-95.
- [30] J. Jiménez, A. M. Llitjós, *An. Quím.* **2005**, 101, 47-53.
- [31] M. Maurel, N. Dalfaro, H. Soria, en *Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación* (2014), pp. 677-671 - 677-616.
- [32] K. Perkins, W. Adams, M. Dubson, N. Finkelstein, S. Reid, C. Wieman, R. LeMaster, *The Physics Teacher* **2005**, 44, 18-23.
- [33] M. I. Suero, A. L. Pérez, P. J. Pardo, G. Martínez, J. Gil, F. L. Naranjo, F. Solano, E. Cordero, *Rev. Esp. Fís.* **2013**, 27, 65-67.
- [34] C. Tüysüz, *International Online Journal of Educational Sciences* **2010**, 2, 37-53.
- [35] J. Monge Nájera, V. H. Méndez Estrada, *Revista Educación* **2012**, 31, 18.
- [36] K. J. Kim, C. J. Bonk, *Educause Quarterly* **2006**, 4, 22-30.
- [37] R. Khatri, C. Henderson, R. Cole, en *Physics Education Research Conference 2013* (IACSIT Press, Portland, OR, 2013), Vol. 12, pp. 205-208.
- [38] C. E. Wieman, K. K. Perkins, W. K. Adams, *Am. J. Phys.* **2008**, 76, 393-399.
- [38] S. B. McKagan, K. K. Perkins, M. Dubson, C. Malley, S. Reid, R. LeMaster, C. E. Wieman, *Am. J. Phys.* **2008**, 76, 406-417.
- [40] S. E. Grady, K. M. Vest, T. J. Todd, *Currents in Pharmacy Teaching and Learning* **2013**, 5, 263-268.
- [41] M.-C. Li, C.-C. Tsai, *Journal of Science Education and Technology* **2013**, 22, 877-898.
- [42] F. Quintanal Pérez, *Education in the Knowledge Society* **2016**, 17, 13-28.
- [43] T. Daubefeld, D. Zenker, *J. Chem. Educ.* **2015**, 92, 269-277.
- [44] M. Antunes, M. A. R. Pacheco, M. Giovanela, *J. Chem. Educ.* **2012**, 89, 517-521.

- [45] A. J. Franco-Mariscal, J. M. Oliva-Martínez, Á. Blanco-López, E. España-Ramos, *J. Chem. Educ.* **2016**, *93*, 1173-1190.
- [46] T. W. Stringfield, E. F. Kramer, *J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 56.
- [47] F. A. Esteve-Turrillas, S. Armenta, M. L. Cervera, M. De la Guardia, A. Pastor, A. Morales-Rubio, S. Garrigues, en *Congreso In-Red 2016: Congreso Nacional de Innovación Educativa y de Docencia en Red* (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2016), pp. S.P.
- [48] P. L. Granath, J. V. Russell, *J. Chem. Educ.* **1999**, *76*, 485.
- [49] J. V. Russell, *J. Chem. Educ.* **1999**, *76*, 487.
- [50] J. V. Russell, *J. Chem. Educ.* **1999**, *76*, 481.
- [51] H. F. O'Neil, R. Wainess, E. L. Baker, *The Curriculum Journal* **2005**, *16*, 455-474.
- [52] A. Domínguez, J. Saenz de Navarrete, L. de Marcos, L. Fernández-Sanz, C. Pagés, J. J. Martínez-Herráiz, *Computers & Education* **2013**, *63*, 380-392.
- [53] M. N. Giannakos, *Computers & Education* **2013**, *68*, 429-439.
- [54] I. Granic, A. Lobel, R. C. M. E. Engels, *American Psychologist* **2014**, *69*, 66-78.
- [55] T. M. Connolly, E. A. Boyle, E. MacArthur, T. Hainey, J. M. Boyle, *Computers & Education* **2012**, *59*, 661-686.
- [56] L. A. Annetta, *Theory Into Practice* **2008**, *47*, 229-239.
- [57] M. Griffiths, *Education and Health* **2002**, *20*, 47-51.
- [58] R. A. Smaldone, C. M. Thompson, M. Evans, W. Voit, *Nat. Chem.* **2017**, *9*, 97-102.
- [59] M. Schrope, *P. Natl. Acad. Sci.* **2013**, *110*, 7104-7106.
- [60] S. A. Barab, B. Scott, S. Siyahhan, R. Goldstone, A. Ingram-Goble, S. J. Zuiker, S. Warren, *Journal of Science Education and Technology* **2009**, *18*, 305.
- [61] J. N. da Silva Júnior, M. A. Sousa Lima, J. V. Xerez Moreira, F. S. Oliveira Alexandre, D. M. de Almeida, M. d. C. F. de Oliveira, A. J. Melo Leite Junior, *J. Chem. Educ.* **2017**, *94*, 248-250.

[www.unioviedo.es/mmmschool2018](http://www.unioviedo.es/mmmschool2018)

**XI**

**INTERNATIONAL SCHOOL ON  
ORGANOMETALLIC CHEMISTRY  
MARCIAL MORENO MAÑAS**

**June 6-8<sup>th</sup>, 2018  
Oviedo (Spain)**

## Toma de posesión de los nuevos miembros de la Junta de Gobierno

El pasado 19 de enero tuvo lugar la toma de posesión de los nuevos miembros de la Junta de Gobierno: Antonio M. Echavarren (Presidente), Sonsoles Martín Santamaría (Secretaria General), Mariona Sodupe (Vicepresidenta), Miguel Ángel Sierra (Editor), Pedro J. Pérez (Vocal), Joan Bosch (Vocal), Juan Casado (Vocal), José Manuel Costa (Vocal), Mar Gómez Gallego (Vocal).

Se agradeció al equipo saliente su dedicación y los resultados excelentes de la misma, como se deduce de la modernización de la RSEQ y del incremento sobresaliente en el número de socios. El nuevo equipo agradece el apoyo recibido en la votación de la candidatura presentada y se propone continuar impulsando la Química en España.



De izquierda a derecha, José Manuel González (Secretario General saliente), Jesús Jiménez Barbero (Presidente saliente), Sonsoles Martín Santamaría (Secretaria General), Antonio M. Echavarren (Presidente), Mariona Sodupe (Vicepresidenta), Nazario Martín (Presidente 2006-2012) y Miguel Ángel Sierra (Editor General)

Todas las noticias deberán enviarse a la Secretaría de Publicaciones [pyanezs@ucm.es](mailto:pyanezs@ucm.es)  
Su publicación es discrecional al Comité Editorial de *Anales*.

## La Asociación Japonesa de Fotoquímica premia la labor investigadora del catedrático de la UCLM Abderrazzak Douhal

**A**bderrazzak Douhal, catedrático de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), ha sido galardonado con el Premio de Cátedra Elsevier en Fotoquímica (Elsevier Lectureship Award) que otorga la Asociación Japonesa de Fotoquímica (Japanese Photochemistry Association, [JPA]).

El galardón le será entregado el próximo mes de septiembre en la Universidad de Kwansei Gakuin, en el transcurso del próximo congreso de la JPA.

Su investigación reciente en nanociencia (nanofónica, nanomedicina y nanocatálisis) se enfoca en el estudio de los eventos moleculares a escala atómica en bolsillos y canales moleculares como proteínas, micelas, zeolitas, nanomateriales basados en sílice y puntos cuánticos, usando varias técnicas de espectroscopia láser de femto segundo hasta milisegundo y microscopia de fluorescente para moléculas individuales.

El premio de Cátedra Elsevier, patrocinado por Elsevier y JPA, se entrega desde el año 2014 a científicos



Abderrazzak Douhal

extranjeros. Abderrazzak Douhal es el segundo científico europeo premiado con este galardón.

## Los socios María Escudero y Guillermo Mínguez, premios Princesa de Girona de Investigación Científica

**L**a Fundación Princesa de Girona ha premiado a los químicos María Escudero y Guillermo Mínguez en la categoría de Investigación Científica.

La doctora María Escudero ha sido distinguida por su trabajo en el desarrollo de catalizadores electroquímicos basados en nanopartículas metálicas, con la finalidad de sustituir metales nobles para reducir los costes y aumentar la eficiencia en procesos de obtención de energía limpia. Se destaca el impacto científico, tecnológico, energético y social que contribuirá a frenar el cambio climático.

Por su parte, al doctor Guillermo Mínguez, se le reconoce su trabajo en el diseño de tamicos moleculares híbridos, que permite la síntesis de materiales nano-estructurados a la carta. Se destaca el impacto de sus trabajos en MOF (*Metallic Organic Frameworks*) magnéticos, desde su estudio fundamental hasta su aplicación en sensores y en catálisis.

Estos galardones, dotados con 10.000 euros, están dirigidos a jóvenes de 16 a 35 años y buscan reconocer su



María Escudero



Guillermo Mínguez

actitud emprendedora e innovadora en las categorías de social, investigación científica, mundo empresarial, artes y letras.



## Firma del acuerdo anual de colaboración con la compañía farmacéutica Lilly

El pasado 9 de febrero tuvo lugar la firma del acuerdo anual de colaboración con la compañía farmacéutica Lilly para el patrocinio de la Conferencia Lilly 2018 y otras actividades científicas de nuestra Sociedad.

La firma tuvo lugar en el Centro de Investigación de Lilly en Alcobendas por parte del doctor Juan Velasco, director del centro, y del doctor Antonio Echavarren, presidente de la RSEQ.



De izquierda a derecha, el doctor Antonio Echavarren, presidente de la RSEQ y Juan Velasco, director del Centro de Investigación de Lilly en Alcobendas

## Reseña de la XVII Escuela Nacional de Materiales Moleculares, Torremolinos, 2018

**D**urante los días 11 al 16 de febrero de 2018 se ha celebrado la XVII Escuela Nacional de Materiales Moleculares (ENMM) en Torremolinos (Málaga) bajo el auspicio de la Universidad de Málaga y con el apoyo del grupo especializado de Nanociencia y Materiales Moleculares (GENanoMatMol) de la RSEQ/RSEF, la sección territorial de Málaga de la RSEQ y la propia Universidad de Málaga. Después de 3 años de espera, la Escuela ha sido acogida con gran entusiasmo con la participación récord de 119 asistentes entre alumnos y profesores. El comité organizador lo han integrado los profesores Juan Casado (de la Universidad de Málaga y Vicepresidente del GENanoMatMol) y Juan T. López Navarrete (Vicerrector de Investigación de la Universidad de Málaga), mientras que las estudiantes Samara Medina y Nadia Boughaba han actuado como secretarías. La escuela fue inaugurada por la Teniente Alcalde de Torremolinos, Maribel Tocón, que dio la bienvenida a Torremolinos a los participantes.

Los principales científicos de este campo se han dado cita en Torremolinos. La ENMM se ha caracterizado por su multidisciplinariedad, acogiendo temáticas entorno a la relevancia de las moléculas en el desarrollo de nuevas propiedades y nuevos materiales y en sus aplicaciones tecnológicas.

En particular, se han impartido conferencias de física teórica, física de superficies, magnetismo molecular, espectroscopia y difracción, química de grafeno y sistemas de carbono, química cuántica, síntesis orgánica, sistemas supramoleculares, dispositivos optoelectrónicos, sistemas biológicos, etc. Como es habitual, la presentación de 32 comunicaciones cortas por parte de alumnos de doctorado y máster, todas de altísimo nivel, ha dado el punto de frescura a la reunión.

El domingo 11 de febrero se celebró, por primera vez en el formato de la escuela, una sesión de pósters con 35 comunicaciones que durante la tarde se expusieron en el agradable entorno de la “Casa de los Navajas” en Torremolinos. El miércoles 14 de febrero tuvo lugar la reunión del grupo especializado de Nanociencia y Materiales Moleculares, la cual estuvo precedida por la entrega de los premios a las mejores Tesis Doctorales del año 2016. La Escuela puso su clausura el día 15 de febrero con una cena de gala en el propio Hotel Sol Don Pablo de Torremolinos, en la que la diversión por parte de los alumnos y profesores dio la mejor clausura posible a la reunión. El testigo lo recoge la Universidad de Santiago de Compostela que acogerá la próxima edición de la Escuela Nacional de Materiales Moleculares en 2020.

© 2018 Real Sociedad Española de Química



Participantes de la Escuela en el hotel Sol Don Pablo con la bahía de Málaga al fondo

## Sexto encuentro de dendrímeros, EDEN VI

El pasado 22 de febrero se celebró en Sevilla el sexto encuentro de dendrímeros, EDEN VI. Este encuentro tuvo lugar en un marco incomparable, el Pabellón del Perú de la exposición universal de 1929, sede de la Casa de la Ciencia y de la Delegación del CSIC en Andalucía. Durante dos jornadas, los mayores expertos nacionales en este ámbito presentaron los últimos avances en el campo de los dendrímeros. Tuvimos la ocasión de ver las numerosas e interesantes aplicaciones de los dendrímeros, tanto en el tema de materiales, como muy especialmente en el ámbito de la biomedicina. Se ha puesto claramente de relieve el potencial que tienen estas estructuras como herramientas en diferentes aplicaciones que van desde su uso en la resonancia de imagen para la detección temprana de tumores, la regeneración de cartílagos, su aplicación en el desarrollo de vacunas sintéticas frente a procesos alérgicos, su actividad antiviral o antibacteriana, su uso para procesos de transfección génica, hasta su potencial en el desarrollo de materiales con carácter de cristal líquido, entre otros muchos.

Además de las contribuciones del grupo de dendrímeros, el encuentro contó con dos conferencias plenarias que complementaron perfectamente el encuentro. La primera, a cargo del profesor José Manuel García Fernández del Instituto de Investigaciones Químicas del CSIC en Sevilla, que fue una gran oportunidad de conocer de primera mano sus

investigaciones en el ámbito de la química biológica con numerosos ejemplos y aplicaciones en biomedicina donde las estructuras dendríticas tuvieron un papel destacado. La segunda conferencia plenaria, a cargo del Dr. Pedro Serena, del Instituto de Materiales de Madrid (CSIC), nos adentró de manera muy divulgativa en el mundo de la nanociencia y la nanotecnología, campo en el que se incluyen los dendrímeros, donde se presentaron las oportunidades, los peligros, así como el futuro de esta ciencia.

Como colofón del congreso, y aprovechando algunas preguntas que habían quedado en el aire tras la conferencia del Dr. Serena, tuvimos una mesa redonda donde se debatió sobre el futuro de los dendrímeros. Para ello contamos con un moderador de lujo, D. José María Montero Sandoval, un experto en divulgación científica y director de los programas “Tierra y Mar” y “Espacio Protegido” de la RTVA. Las diferentes posturas que aparecieron abrieron un debate muy interesante que fue un cierre perfecto para este encuentro.

Tras la clausura del encuentro, se invitó a todos los presentes a volver a ver en el próximo encuentro, EDEN VII, que tendrá lugar en Málaga en el año 2020.

F. JAVIER ROJO

Presidente del comité organizador de EDEN VI



Participantes del sexto encuentro de dendrímeros, EDEN VI

## Jorge Wagensberg, excelente divulgador de la ciencia y apasionado de la química

*In memoriam*

El pasado 3 de marzo falleció Jorge Wagensberg Lubinski. Nació en Barcelona en 1948, en el seno de una familia de judíos polacos que había huido a España en la década anterior. Se doctoró, con premio extraordinario, en Física y fue profesor de Teoría de los Procesos Irreversibles en la Universidad de Barcelona. Destacó por su labor innovadora en la dirección de CosmoCaixa (Barcelona) entre 1991 y 2013, que convirtió en referencia para otros museos de ciencia. Ha sido uno de los divulgadores científicos más relevantes de las últimas décadas, con una prolífica colección de libros y artículos sobre temas interdisciplinares.

Entre otras aportaciones innumerables, ha destacado por sus cientos de aforismos, como el que señala que “cambiar de respuesta es evolución, cambiar de preguntas es revolución”. Precisamente en forma de este género literario, escribió dos contribuciones sobre la importancia de la química que merecen ser conocidas por profesores y otros profesionales de este ámbito del saber. Ambas fueron publicadas en el diario El País, donde ha sido colaborador habitual. La primera, publicada hace más de veinte años con el título de “Breve elogio de la química”, fue fruto de un proyecto conjunto de museos científicos europeos para divulgar de modo accesible al público en general (especialmente entre los jóvenes) el papel de la química en la vida cotidiana. Se recogió ya en *Anales de Química*: G. Pinto, “Didáctica de la Química y Vida Cotidiana”, *An. Quím.* 99(1), 44-52 (2003).

En la segunda contribución citada, publicada el 20 de octubre de 2017 y titulada “La química en aforismos”, incluía un subtítulo que posee especial actualidad en la cercanía del Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, en 2019: “Con los elementos químicos se escribe la naturaleza de todo lo que existe, de todo lo que puede llegar a existir”. De alguna manera, profundiza en las ideas expuestas en el primer trabajo y, tras una



Fotografía de Jorge Wagensberg en 2015

maduración de años, resume en breves sentencias su visión de la química:

1. Todo es química: el planeta es química, el cosmos es química..., ¡tú eres química!
2. No todo es química: los miles de cuatrillones de átomos de nuestro cuerpo se renuevan cada cinco años y sin embargo nos consideramos hoy la misma persona que fuimos al nacer...
3. No existen sustancias tóxicas, solo dosis tóxicas.
4. Newton, Bach, Homero, Velázquez, Stradivarius... ¡Lavoisier!
5. Una molécula de cloruro sódico a la deriva en pleno océano y una molécula de cloruro sódico vibrando en la lágrima de un niño son indistinguibles.

6. Los átomos son letras; las moléculas, palabras, y un árbol, un poema.
7. La tabla periódica de Mendeléiev, el alfabeto de la materia.
8. La química inventa materiales a la carta que no existen espontáneamente en la naturaleza.
9. Química es una palabra del lenguaje cotidiano con dos reputaciones contrapuestas: “Esto tiene química, allá tú si te lo comes” (1) y “entre los dos hubo química desde el primer momento” (y 2).
10. No sería nada raro que mi cuerpo contenga esta mañana una molécula de agua que en algún momento de la historia transitara por el cuerpo de Sócrates.
11. Hay moléculas que se enamoran entre sí para proponer combinaciones gloriosas: las aceitunas rellenas de anchoa, el café con leche, el pan con tomate, la tortilla de patatas, el requesón con miel...
12. El todo puede ser más que la suma de las partes: la pólvora, las aceitunas rellenas de anchoa, el café con leche, el pan con tomate, la tortilla de patatas, el requesón con miel...
13. La química tiene voz y voto en cualquier otra disciplina científica: física, biología, geología, medicina, farmacia...
14. Muchos problemas de salubridad para las personas y el ambiente nacen de manipulaciones químicas, pero en ellas suelen estar también las soluciones.
15. La química ha enterrado la alquimia, pero la astrología convive con la astronomía y la homeopatía sobrevive en las farmacias.
16. Un hilo de tela de araña del grosor de un lápiz aguantaría el peso de cuatro ballenas azules y se estiraría un 30% sin romperse.
17. Un cristal es un objeto accesible a los sentidos que conserva las propiedades de una molécula, el clímax de la síntesis química.
18. La pureza es una mezcla de referencia.
19. La química es el soporte físico del espíritu.

Todo este elogio de la química encuentra más mérito en el hecho de que Wagensberg poseía una formación universitaria en física, como ya se ha indicado. En este sentido, produce una sensación similar a la lectura de uno de los libros más apasionantes y apasionados sobre la devoción por la química, *El tío Tungsteno. Recuerdos de un químico precoz*, escrito por el neurólogo británico, y también de ascendencia judía, Oliver Sacks.

Aparte de toda la obra realizada por Wagensberg en pro de la difusión de la ciencia, que con seguridad será reseñada en múltiples foros y publicaciones, desde estas líneas hemos querido agradecer su afán por resaltar el papel de la química. Descanse en paz; su obra será recordada durante años por los entusiastas de la divulgación científica y su labor se verá reflejada en la formación en ciencias de las nuevas generaciones.

GABRIEL PINTO CAÑÓN  
Grupo Especializado de Didáctica e Historia  
de las Reales Sociedades Españolas  
de Física y de Química.

## *Las medicinas de la historia española en América* *Medicines of Spanish History from America*

El libro del profesor Raviña es un magnífico viaje a través de la historia de las plantas encontradas en América por los españoles, su impacto en la terapéutica a través de los siglos y su importancia en el comercio entre Europa y las Indias. Adicionalmente, con un sentido químico realmente afinado, el autor disecciona tanto los fármacos originales como su evolución a los fármacos modernos, todo ello desde un punto de vista didáctico y sumamente entretenido.

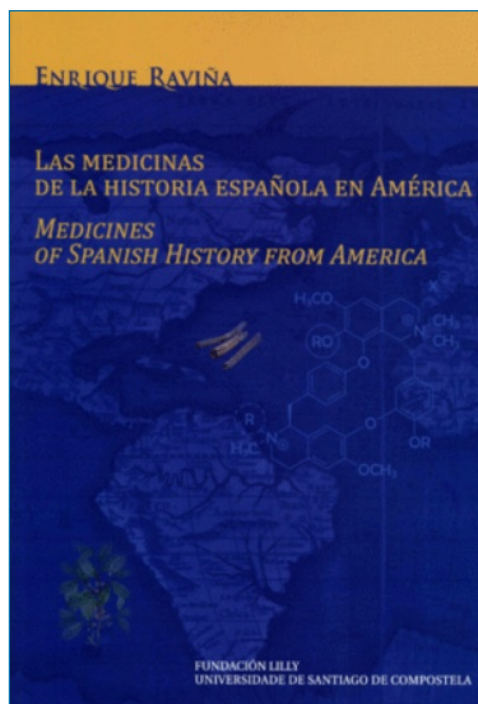
Después de una generosa introducción histórica en la que se repasan las especias, aceites esenciales y extractos de plantas medicinales (todo ello en un contexto histórico, con los nombres y hechos de los protagonistas), el autor aborda la historia del curare, aprovechando para introducir al lector en los alcaloides de *Strychnos*, y continuar con la descripción de agentes con actividades análogas. Dentro del nivel histórico-divulgativo del texto, el rigor químico con el que se tratan diferentes aspectos está al nivel de los mejores libros de química terapéutica.

El siguiente capítulo trata de alcaloides de la corteza de la quina, desde sus raíces históricas a los nuevos anti-maláricos sintéticos. De nuevo, el contexto histórico está perfectamente integrado con la discusión química. Lo mismo ocurre con el Capítulo 4, dedicado a la cocaína. Especialmente interesante es la conexión de la cocaína con la procaína y otros anestésicos locales.

Como atractivo adicional, el libro está profusamente ilustrado con reproducciones de documentos y fotografías que ilustran de una forma muy adecuada el texto. Muchos de los documentos y fotografías incluidos merecerían un texto por sí mismos.

Un aspecto controvertido del libro, es la inclusión del texto en español e inglés. Sin embargo, la integración “back to back” está hecha de forma más que correcta y puede resultar de interés para los no especialistas. Muchas de las palabras que se incluyen en la parte inglesa no son de uso común. El disponer de una traducción al español puede ayudar en muchas ocasiones a entender diferentes textos ingleses.

En definitiva, se trata de un texto excelente que combina el rigor científico e histórico con una presentación impecable,



Autor: Enrique Raviña  
318 págs.

Edita: Fundación Lilly / Universidad de Santiago de Compostela  
Edición de 2017

ble, tanto en la parte tipográfica como en la reproducción de documentos y fotografías. El libro es altamente recomendable para pasar un excelente rato con su lectura. Por último, tanto como base para conferencias divulgativas o en asignaturas específicas el libro puede ser de gran ayuda.

No hay que olvidar que el precio es realmente asequible, lo que le hace todavía más atractivo.

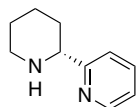
MIGUEL Á. SIERRA  
(Universidad Complutense)

MARÍA C. DE LA TORRE  
(CSIC)



## New Building Blocks for Chemical Synthesis

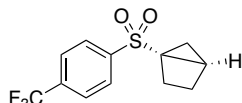
To complement the myriad building blocks we offer synthetic chemists, we have collaborated with academic and industrial innovators to bring you the newest building blocks to explore new chemical and synthetic space. New scaffolds, reactivities, and dimensional orientations open the possibilities for synthesis.



**900589**

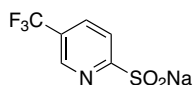
### Explore 3D Chemical Space

Interrogate 3D chemical space with our offering of new chiral building blocks from Liverpool ChiroChem. These enantioenriched heterocycles contain a variety of interesting substituents and chemical handles to allow for easy synthetic manipulation and elaboration during hit identification (**900589**).



**ALD00574**

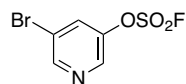
Incorporate the privileged propellane 3D motif to your hits and leads with propellamine (**ALD00504**), popularized for synthetic use by Prof. Phil Baran. Strain-release chemistry developed in the same lab also allows for incorporation of cyclobutyl- and enantioenriched cyclopentyl motifs (**ALD00574**).



**900760**

### Cross-Couple 2-Pyridyl Nucleophiles with Ease

Prone to protodeboronation, 2-pyridyl boronic acid derivatives have always required special consideration in Suzuki-Miyaura type cross-coupling. Working with Prof. Michael Willis, we introduced a collection of 2-pyridyl sulfonates (**900760**) that undergo cross-coupling at high yield under moderate reaction conditions.



**ALD00580**

### SuFEx: Building Blocks for the 'Next Click Reaction'

In collaboration with Prof. Barry Sharpless and Lyn Jones, we have introduced over 100 sulfonyl fluoride-containing building blocks (**ALD00580**) for the SuFEx reaction. These stable reagents react chemoselectively with nucleophiles, and their context-selective reactivity make them ideal warheads for chemical probes.

To view these and other new products, visit [SigmaAldrich.com/newchemistry](http://SigmaAldrich.com/newchemistry).