

Eficiencia Síntesis Total

Más eficiente

A+++

A+++

A++

A+

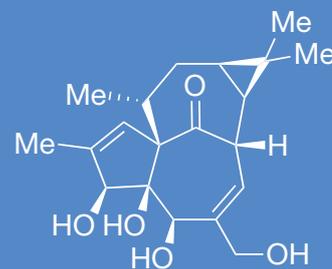
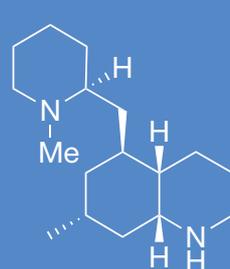
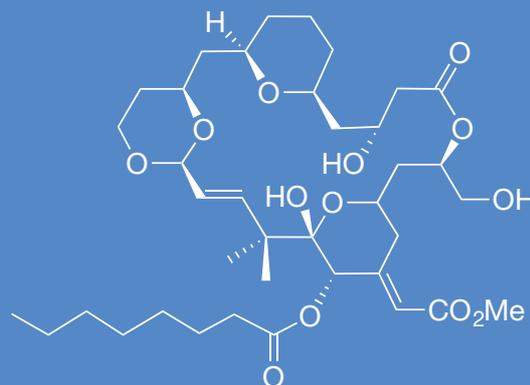
B

C

D

E

Menos eficiente



Eficiencia en la síntesis de productos naturales, por J. Bonjoch y B. Bradshaw

La Química Analítica en la química española, por M. Valcárcel

Ética en la investigación: buenas prácticas científicas, por P. Goya y M.^a L. Salas

Cien años de armas químicas, por M. Martín, G. Pinto, J. M.^a Hernández y M.^a T. Martín

Entidades colaboradoras



Socios Corporativos

- Aldrich Química
- 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

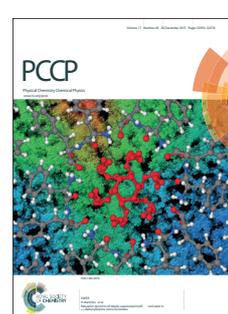
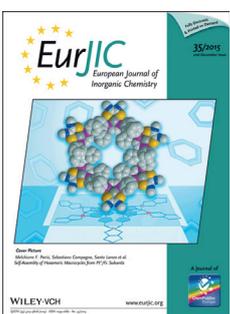
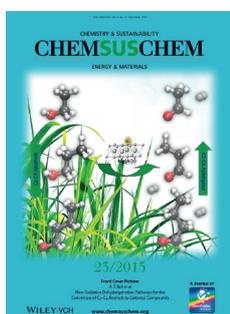
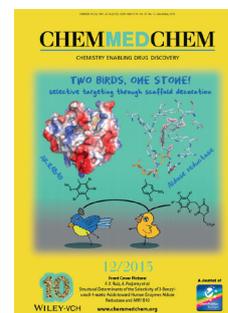
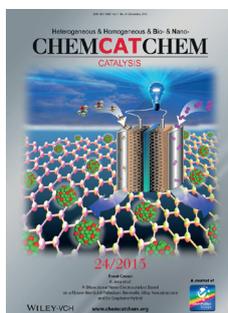
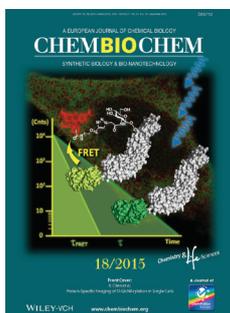
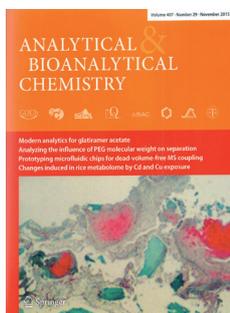
Secretaría Editorial

Patricia Yáñez-Sedeño
Real Sociedad Española de Química
www.rseq.org

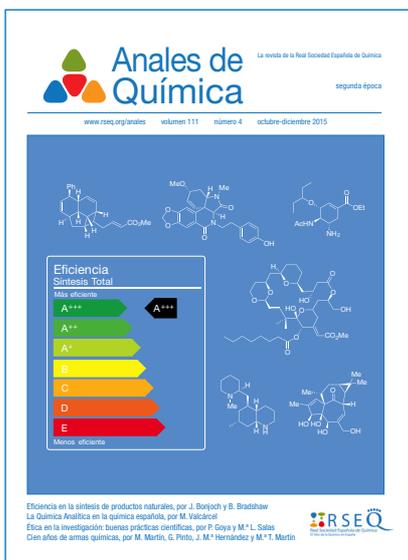
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense Ciudad Universitaria.
28040 Madrid
Tel (+34) 913 944 356. Fax (+34) 915 433 879



Revistas patrocinadas por la Real Sociedad Española de Química



Sumario



Composición y producción:

Moisés Fernández
 Edinnova Taller Editorial

Editorial	199
<i>Miguel Ángel Sierra</i>	
Carta del Presidente	200
<i>Jesús Jiménez Barbero</i>	
Cartas al editor	
La carne roja y la química por Jesús Jiménez Barbero y Fernando Cossío	201
Opinión	
La singularidad de la Química por José Elguero	202
Investigación Química	
Eficiencia en la síntesis total de productos naturales	203
<i>Ben Bradshaw y Josep Bonjoch</i>	
Ética en la Investigación: buenas prácticas científicas	212
<i>Pilar Goya y M.ª Luisa Salas</i>	
La Química española vista por sus protagonistas	
La Química Analítica en la química española	218
<i>Miguel Valcárcel</i>	
Historia de la Química	
Cien años de armas químicas	224
<i>Manuela Martín, Gabriel Pinto, José María Hernández y María Teresa Martín</i>	
La evolución histórica de la química y su utilidad didáctica	230
<i>Luis Moreno Martínez</i>	
Enseñanza de la Química	
Escuela de la Ciencias UJA. Nueva propuesta de la Universidad de Jaén para acercar la Ciencia a los escolares	239
<i>Antonio Marchal, Paloma Arranz, Alfonso Alejo, María A. Fontecha</i>	
La tabla periódica de los elementos químicos para niños y abogados	247
<i>Pascual Román Polo</i>	
Noticias de la RSEQ	254
Obituario	261
Reseñas de libros	263
Normas de publicación	265
Índice de autores	267

Miguel Ángel Sierra

Estoy loco de contento ¡Ya tenemos Agencia Estatal de Investigación (AEI)! Esto tiene que ser algo bueno porque según los medios de comunicación, a los que, en general, los temas relacionados con la investigación les preocupan bastante poco, han llenado paginas de prensa y horas de televisión con esta noticia, y eso en plena pre-campaña electoral. Además, la creación de esta AEI era, según parece, un clamor de toda la comunidad científica (y un logro de un grupo mediático, según ellos). Este clamor debe haber sido en círculos mucho más elevados que en los que yo me muevo. Yo oír el clamor, lo que se dice oír, no lo he oído. Lo que sí he mirado es el *BOE* (285-2015, RD 1067/2015) y lo de RD (Real Decreto) ya me ha puesto los pelos de punta. El que se decida crear una Agencia de la relevancia de ésta por RD es, cuando menos preocupante.

No voy a aburrirlos una vez más con la necesidad de pactos de estado para temas tan serios y decisivos como este, porque está claro que aquí no se gobierna así (no lo hubo para la Ley de la Ciencia de la que emana la creación de la AEI, para qué pactar entonces cosas menores). Tampoco voy a comentar otra vez el hecho llamativo de que la AEI dependa del MINECO (de la Secretaria de Estado de Investigación, claro está, pero del MINECO, no de un Ministerio de Educación y Ciencia como en los países civilizados). Lo que me pone la mosca detrás de la oreja es que la creación de esta agencia se hace a partir de las recomendaciones realizadas por un panel de expertos internacionales, en el informe denominado «European Research Area Committee (ERAC) Peer Review», durante el proceso de evaluación de las políticas de I+D+i en España llevado a cabo durante el primer semestre de 2014 a iniciativa del MINECO (esto está copiado literalmente del preámbulo del RD). Y qué queréis que os diga, sólo hay algo que me produzca más recelos que un panel de expertos, y es un panel de sabios.

Tengo que reconocer que con los años me he vuelto más ácido (como el mal vino). La Ciencia española no necesita más agencias o más leyes (aunque si ésta vale para algo bienvenida sea). Lo que necesita es dinero y más dinero y más dinero. ¿Dónde están los presupuestos que nos lleven al 3 % del PIB para inversión en I+D+i o en innovación tecnológica? Y, sobre todo, la Ciencia española necesita, además de fondos, una reestructuración completa. No de su forma de financiación (que también), sino de sus estructuras y organismos de investigación.

Debo ser un miope pero ¿va a solucionar la AEI la investigación universitaria o los problemas del CSIC y otros OPIs? ¿Y la fuga de talentos? ¿Y la casi nula inversión en Ciencia Aplicada? Podría seguir pero no creo que haga falta.



El que no se trata de una cuestión de leyes, sino de otro modo de gobernanza (y dinero, dinero y más dinero) lo tienen claro distintos gobiernos de la geografía nacional, que han sacado sus centros de élite de I+D+i de las Universidades y los OPIs (empobreciendo el sistema educativo universitario, algo que probablemente a la larga pagaremos, pero éste es otro tema). Los resultados de esta nueva (en España) forma de pensar en términos de captación de fondos, publicaciones y transferencia al sector productivo se pueden encontrar y valorar con dos golpes de tecla en la web.

Si la AEI contribuye a mejorar la Ciencia en España es algo que veremos en los próximos años (suponiendo que el siguiente gobierno no derogue esta Agencia, junto con la Ley de Ciencia, no nos olvidemos que la política en este país es como una manada de leones: cuando un macho dominante sustituye al antiguo, lo primero que hace es eliminar a todos los retoños del perdedor para poder sacar adelante a los suyos, como si el mundo empezara con ellos). Pero mucho me temo que la manía española de creer que los problemas se resuelven a golpe de RD, lo único que producirá será más de lo mismo pero con otros nombres (de momento dos consejos directores incorporando cada uno su cohorte de sabios, además de los políticos y expertos de turno).

Para terminar, no sé qué pensar cuando me dicen que el modelo de la AEI es el del British Council o el del European Research Council. A lo mejor esto significa que el Gobierno de España se propone tratar a sus investigadores como los gobiernos del Reino Unido y Alemania tratan a los suyos. ¿Ustedes se lo creen? Yo tampoco.

Felices Fiestas y gracias por leer.

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

Jesús Jiménez Barbero

Queridos amigos y colegas.

Simplemente unas líneas para despedir 2015. Os deseo muy Felices Fiestas y un excelente 2016.

Como Presidente de la RSEQ, me siento muy satisfecho de la evolución de nuestra sociedad en estos últimos años. Creo que, pese a la crisis, hemos mantenido, e incluso consolidado, nuestra posición en el ámbito de las sociedades científicas. Nuestras actividades, tanto jornadas como simposia, son recibidas con interés, nuestros premios y galardones han alcanzado un prestigio importante y nuestra reunión bienal goza de una excelente salud.

Por ello, os doy las gracias a todos vosotros, Junta Directiva, Grupos Especializados y Secciones Territoriales y, por supuesto, a los socios. Sois la fuerza que nos mantiene e impulsa.

Nos vemos en 2016,
Muchas gracias,

JESÚS JIMÉNEZ BARBERO

Presidente de la Real Sociedad Española de Química



La carne roja y la química

Jesús Jiménez Barbero y Fernando Cossío

Decía Emilio Lledó recientemente que la ignorancia es la enfermedad de nuestro tiempo. No podemos estar más de acuerdo. Editoriales como el que se publicó en el suplemento de Negocios de *El País* el 1 de noviembre, titulado “La carne no mata, los añadidos sí”, son un claro exponente de esta lamentable ignorancia. En este texto se afirma que “Cualquier formulación del tipo “la carne roja mata” confunde al ciudadano. Lo que mata es la química orgánica inorgánica con que se rocían las proteínas para conservarlas”. La lectura de la segunda frase causa estupor a cualquier persona que haya terminado el Bachillerato y, desde luego, confunde a la ciudadanía. Además de la duda que se genera sobre los métodos que pueda emplear

la industria alimentaria para conservar los alimentos, nos gustaría puntualizar que la química no mata.

Sugerimos a los editores responsables del texto que, en lugar de escribir sobre una rama de la química que no existe, “la química orgánica inorgánica”, intenten informarse de lo que son la química orgánica o la inorgánica, lo que aportan a la Sociedad y lo importante que son y serán para mejorar nuestra calidad de vida. Por supuesto que existen moléculas nocivas para la salud. Pero dudamos que sean empleadas por la industria alimentaria en la cantidad necesaria para que sean tóxicas. Por cierto, las proteínas son también “química”. Y la sal común que se emplea para curar el jamón, y las vitaminas, y las grasas, y...

© 2015 Real Sociedad Española de Química



III Biennial Meeting of the
Chemical Biology Group
XII Carbohydrate Symposium

14th-16th March 2016, CIB-CSIC, Madrid

<http://madrid2016.cib.csic.es>

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

La singularidad de la Química

José Elguero

Rodeado de profesionales de otras disciplinas, orgullosos de su saber, y así lo manifiestan alto y claro, noto una cierta incompreensión del lugar epistemológico de la química. Se trata de un problema de combinatoria.

Si Cajal no hubiese existido, el conocimiento neurológico hoy día sería muy parecido, aunque su historia fuese muy diferente. Lo que Cajal descubrió estaba en la naturaleza y, por lo tanto, sería encontrado un poco más tarde, probablemente por un grupo de personas en lugar de por un genio solitario, pero al cabo de los años, el resultado sería el mismo. Igual ocurre con la teoría de la relatividad, si Einstein no hubiera existido, otros (¿Poincaré?, ¿Lorentz?...) la hubiesen descubierto.

Si Freud no hubiese existido, no habría psicoanálisis ni las teorías de sus discípulos, Adler, Abraham, Jung, Klein... Habría otras exploraciones de la mente, de los sueños, de los chistes... pero diferentes. Porque el psicoanálisis no pertenece a las ciencias de la naturaleza situándose más cerca de la creación artística, de un Mann, de un Kafka.

La química es una ciencia experimental pero sus descubrimientos no se limitan a los productos naturales. Algún día los químicos conocerán la estructura y las propiedades de todos ellos y en eso se parecen a Cajal o a Einstein: no importa quien los descubra y como Hilbert podemos decir "Wir müssen wissen, wir werden wissen". Pero los compuestos posibles son muchísimos más (¿infinitamente más?) que los compuestos naturales y su síntesis y estudio **si dependen de cada químico**, y en eso se parecen a Freud, a Mann y a Kafka: sin Sternbach quizás no hubiese benzodiazepinas, sin Kwolek quizás no habría el Kevlar.

A los científicos de otras disciplinas le cuesta trabajo imaginarse las dimensiones del mundo de las moléculas posibles, el tremendo efecto de la explosión combinatoria. Recordemos una vez más: "un hidrocarburo de talla relativamente modesta, $C_{167}H_{336}$, tiene más isómeros, $> 10^{80}$, que partículas elementales hay en el Universo".

Hombres de ciencia y creadores: eso somos los químicos.



J. Elguero

Instituto de Química Médica. CSIC
C-e: iqmb17@iqm.csic.es

Recibido: 18/11/2015. Aceptado: 23/11/2015.



SEVILLE Spain
11th-15th September 2016
Organized by



Eficiencia en la síntesis total de productos naturales

Ben Bradshaw y Josep Bonjoch

Resumen: La síntesis total de productos naturales ha entrado en una nueva era en la que la eficiencia del proceso asume un papel preponderante, a fin de poder acceder de manera escalable a moléculas con potencial impacto en la sociedad. Se presenta un panorama general de propuestas para alcanzar una síntesis ideal, tales como las estrategias de diseño de síntesis (uso de reacciones tándem, reducción de etapas no productivas) y nuevos procedimientos operacionales (uso de reactivos anclados, agentes secuestradores y economía de recipiente / pot economy).

Palabras clave: eficiencia sintética, diseño de síntesis, economía de recipiente, síntesis total, productos naturales.

Abstract: The total synthesis of natural products is entering a new era in which efficiency is playing a central role in order to enable scalable syntheses of molecules with a potentially beneficial impact on society. An overview of proposals to reach an ideal synthesis, such as synthetic design strategies (using tandem reactions, cutting non-productive steps) and operational procedures (use of supported reagents and scavengers, and pot economy), is presented.

Keywords: synthetic efficiency, synthesis design, pot economy, total synthesis, natural products.

INTRODUCCIÓN

La síntesis total de productos naturales^[1] a lo largo del siglo xx acometió el acceso a compuestos cada vez más complejos, auspiciada por motivos estructurales o de actividad biológica de los mismos. Un ejemplo emblemático, desarrollado en el grupo de Kishi,^[2] es la síntesis de la palitoxina (Figura 1), cuya estructura contiene 71 elementos estereoquímicos ($5,4 \times 10^{20}$ estereoisómeros posibles). El resultado global de esta actividad fue el descubrimiento de modos de reactividad, la génesis de nuevos catalizadores y la validación de métodos de síntesis en entornos estructurales exigentes, consolidando así el avance de la síntesis orgánica. Esta actividad fecunda permitió el crecimiento de las interacciones con la biología^[3] y la química médica.^[4] Sin embargo, el optimismo derivado de los hitos sintéticos alcanzados no despejaba las dudas acerca de la traducción de los logros sintéticos en beneficios reales para la sociedad. La síntesis total del taxol (Figura 1b) puso de manifiesto que el estado del arte en la síntesis de

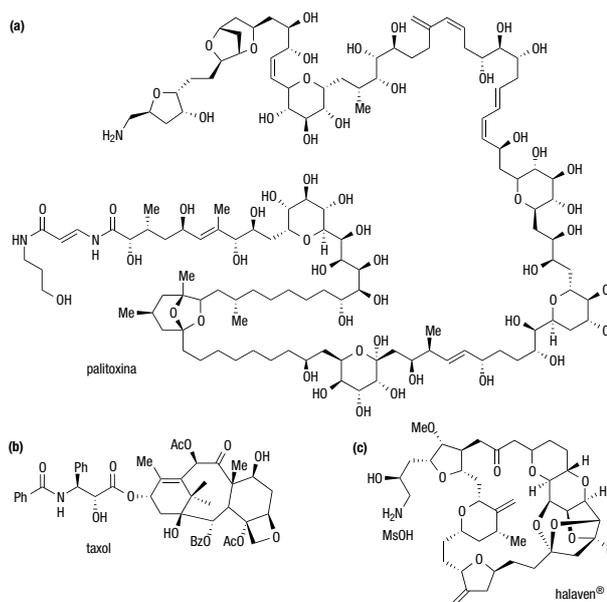


Figura 1. (a) Palitoxina; (b) Taxol; (c) Halaven®



B. Bradshaw



J. Bonjoch

Laboratori de Química Orgànica,
Facultat de Farmàcia, Universitat de Barcelona,
Av. Joan XXIII s/n, 08028-Barcelona
C-e: josep.bonjoch@ub.edu

Recibido: 14/11/2015. Aceptado: 15/12/2015.

compuestos de alta complejidad no era eficiente desde un punto de vista práctico.^[5] A pesar de los esfuerzos de diversos grupos de investigación, la síntesis total tan solo pudo proporcionar pequeñas cantidades de este valioso compuesto. Con la entrada del nuevo milenio, nuevas metodologías y tecnologías, y un enfoque holístico de la síntesis han convergido para dar un paso adelante al reto de la eficiencia. Así, algunos fármacos basados en productos naturales complejos se sintetizan a escala industrial^[6,7] (p. ej. el agente antimetabólico Halaven®,^[8] Figura 1c), demostrando que el acceso a la complejidad estructural no está fuera del alcance de la síntesis total.

En este artículo se muestran algunos de los caminos propuestos para lograr la eficiencia sintética y se esboza un marco para su aplicación. Previamente, se comentan los puntos débiles de la síntesis total en la búsqueda de procesos de producción que generen cantidades prácticas de material. Así, en una hipotética secuencia sintética ideal solamente deberían utilizarse reacciones constructivas que condujesen directamente al esqueleto de la molécula objeto sin requerir reacciones de refuncionalización. Además, la funcionalización de los productos intermedios debería ser la adecuada para el siguiente paso. Sin embargo, el análisis de la mayoría de las síntesis revela que esto no siempre es posible debido a que ciertas desconexiones del esqueleto molecular no se correlacionan con métodos de síntesis conocidos. Esto conduce inevitablemente a una secuencia sintética que comprende interconversiones de grupos funcionales (IGFs), que podríamos considerar como etapas improductivas (Figura 2a): (a) uso de grupos protectores para enmascarar una funcionalidad reactiva; (b) uso de las operaciones redox no productivas o no estratégicas; (c) introducción y eliminación de auxiliares quirales; (d) eliminación de grupos funcionales necesarios para la reactividad pero que no están presentes en la molécula final; (e) uso de transposiciones para corregir funcionalidades fuera de lugar o inversiones en elementos estereogénicos para corregir configuraciones. Teniendo en cuenta que, en general, una síntesis para ser eficiente debe contar como máximo con alrededor de 10-20 etapas, el solo uso de algu-

nos de los tipos de transformaciones mencionados ya puede consumir un número de etapas significativo.

La primera síntesis del potente anticancerígeno briostatina 7 por el grupo de Masamune en 1990 representa un hito en la síntesis total,^[9] aunque para ello se requirieran 82 etapas sintéticas (Figura 2b). El análisis de la secuencia sintética muestra que sólo en un 25% de las etapas se produce la formación de enlaces del esqueleto molecular, mientras que las restantes etapas implican la refuncionalización y manipulación de los grupos protectores. Generalizando, a partir de este ejemplo, se observa que aproximadamente la mayoría de las etapas de la síntesis no son esenciales, debido a que la mayoría de las reacciones disponibles en el arsenal sintético no permiten construir cualquier tipo de enlace de manera quimioselectiva y se recurre a vericuetos que implican transformaciones no productivas.

Otro obstáculo importante para acceder a cantidades viables de productos naturales complejos de manera rápida y económicamente sostenible es la aplicación de una aproximación "stop-and-go",^[6,7] en la que el proceso sintético avanza en una secuencia en la que cada transformación química lleva asociada una etapa de purificación antes de continuar el proceso (Figura 2b). Estas fases de purificación suponen la mayor inversión en tiempo y materiales en cualquier síntesis total y son una fuente importante de generación de residuos. Estas manipulaciones conducen también de manera inevitable a pérdidas de material en cada etapa del proceso y en último término disminuyen el

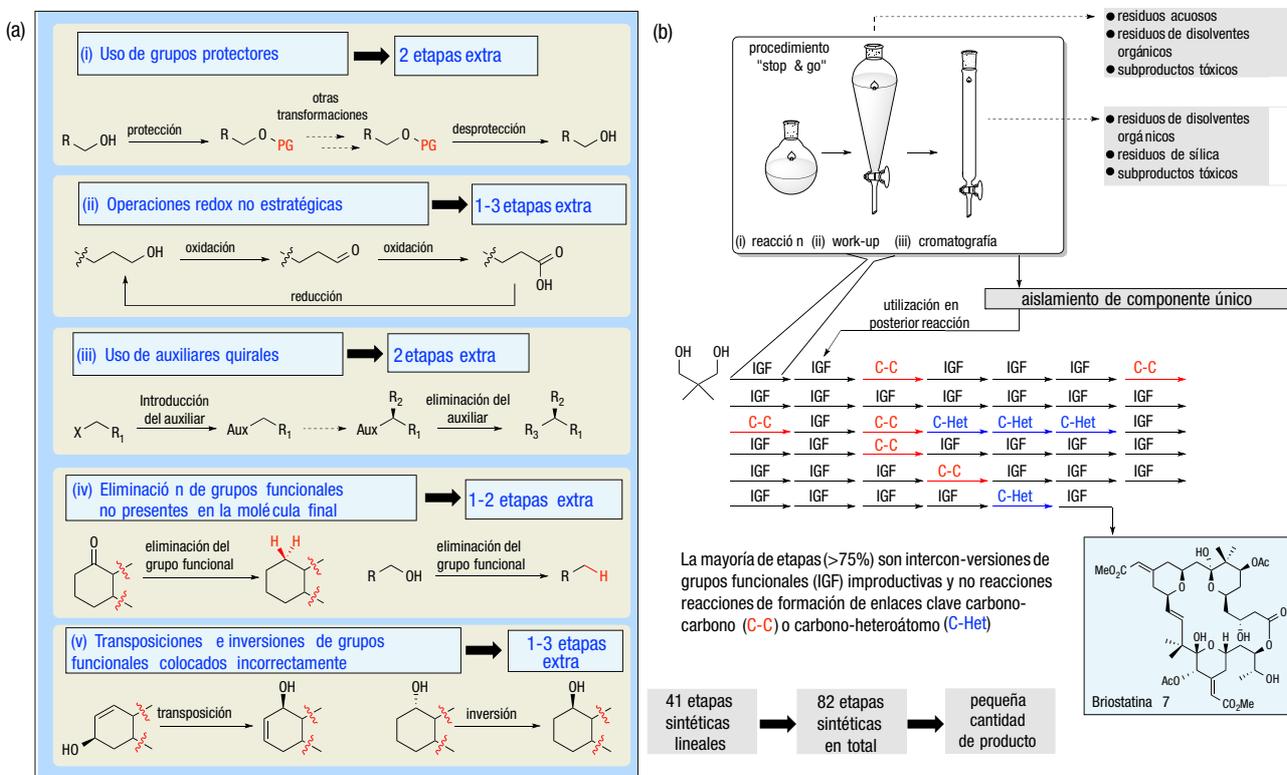


Figura 2. (a) Lista de transformaciones típicas no productivas. (b) Análisis de la síntesis de la briostatina 7 mostrando las etapas clave (formación C-C) y las etapas de interconversión de grupos funcionales (FGI) utilizando el clásico procedimiento stop-and-go

rendimiento global.^[11] Los gastos implicados en este tipo de síntesis hacen que el proceso sea prohibitivo para producir algo más que cantidades muy pequeñas de material.

ESTRATEGIAS GENERALES HACIA LA SÍNTESIS IDEAL

¿Cómo superar estas limitaciones en el camino hacia la síntesis “ideal”? Wender plantea, como una estela a seguir, una definición de síntesis ideal: “... una en la que la molécula diana se preparara a partir de materiales de partida fácilmente disponibles en una operación eficaz, simple, segura, aceptable medioambientalmente, que procede de forma rápida y cuantitativa^[12] (Figura 3a). ¿Cómo emprender una síntesis ideal en la práctica? ¿Cómo se puede desarrollar una estrategia coherente para sintetizar moléculas complejas? Para implementar una visión holística se plantean una serie de estrategias posibles (Figura 3b), que pueden agruparse en dos grupos:

(I) Diseño de estrategias sintéticas: Estas estrategias se basan en una serie de principios clave para lograr una ruta sintética para la molécula diana con la mínima cantidad de etapas posibles. Un elemento central es el uso de reacciones tándem (sección 1), que promuevan el mayor número de transformaciones posible con un único modo operacional y aseguren la formación de un producto con la funcionalidad requerida.

En segundo lugar el diseño debe tratar de evitar el uso de “etapas no productivas” (sección 2) empleando tanto como sea posible estrategias que evite la utilización de grupos protectores y de procesos redox, para evitar pasos innecesarios (economía de etapa). Por último, “diseñar mejores objetivos”, una estrategia en la que el diseño se focaliza más en la función biológica que en la estructura. En la síntesis orientada a la función (FOS) los aspectos computacionales son importantes y los objetivos sintéticos pueden derivar de la simplificación de productos naturales, mediante la eliminación de funcionalida-

des redundantes que sean difíciles de instalar y que no sean esenciales para la función (sección 3).

(II) Diseño de estrategias operacionales: Estas estrategias implican esencialmente de qué modo llevar a cabo una síntesis de manera que se evite el paradigma “stop-and-go”. Estas estrategias incluyen el uso de “reactivos anclados y agentes secuestradores” (sección 4), así como el uso del diseño de economía de recipiente (“pot-economy”) (sección 5). Asimismo, el diseño global debería adecuarse a los principios de la química sostenible.^[13]

A continuación se ofrece un panorama general de estrategias relevantes (1-5) que ilustran el progreso en el camino hacia la “síntesis ideal”.

1. USO DE REACCIONES TÁNDEM

Al plantearse la síntesis de una molécula compleja de manera “one-pot” en la búsqueda de un proceso global eficiente, el diseño sintético deberá basarse en el uso de reacciones tándem (o variaciones de tipo dominó o en cascada).^[14] Los beneficios innegables de esas reacciones están bien establecidos, e incluyen la economía atómica, de tiempo, trabajo, gestión de recursos y baja generación de residuos. Al llevar a cabo transformación múltiples en una sola reacción, se eliminan etapas de purificación que de otro modo deberían efectuarse en el transcurso de los pasos individuales.

En su definición más estricta, una reacción tándem es una reacción en la que varios enlaces se forman en secuencia sin aislar intermedios, sin cambios en las condiciones de reacción ni la adición de reactivos, y en la que las reacciones sucesivas resultan como consecuencia de la funcionalidad formada en la etapa previa. De acuerdo con esta definición, un sustrato con varias funcionalidades que se sometiera a transformaciones secuenciales en el mismo recipiente no se considera que haya experimentado una reacción dominó / tándem. Si obviamos el punto de vista mecanístico y nos fijamos en la eficiencia, el uso estricto

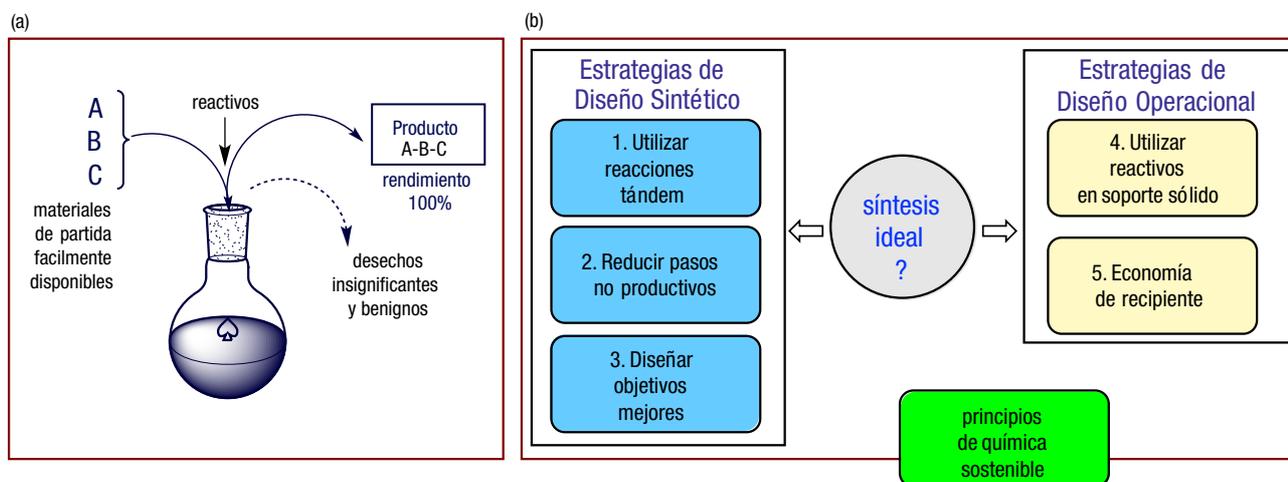


Figura 3. (a) Representación visual de la definición de una síntesis ideal según Wender (b) Panorama general de las estrategias para alcanzar al síntesis “ideal”

de reacción tándem podría ampliarse a reacciones que cumplen con sus objetivos, e incluir procesos que eviten el aislamiento de productos intermedios, reduzcan el tiempo operacional para una transformación dada y elaboren un alto grado de complejidad en una única operación. Así, por ejemplo, un proceso en el que una serie de reacciones podría ser iniciada *in situ* por la simple adición de un ácido o una base, después de una primera serie de reacciones, rompe la definición estricta de una reacción tándem, pero podría obedecer a los principios clave presentados anteriormente. En los procesos industriales existe esta similitud entre procedimientos telescópicos y reacciones tándem.

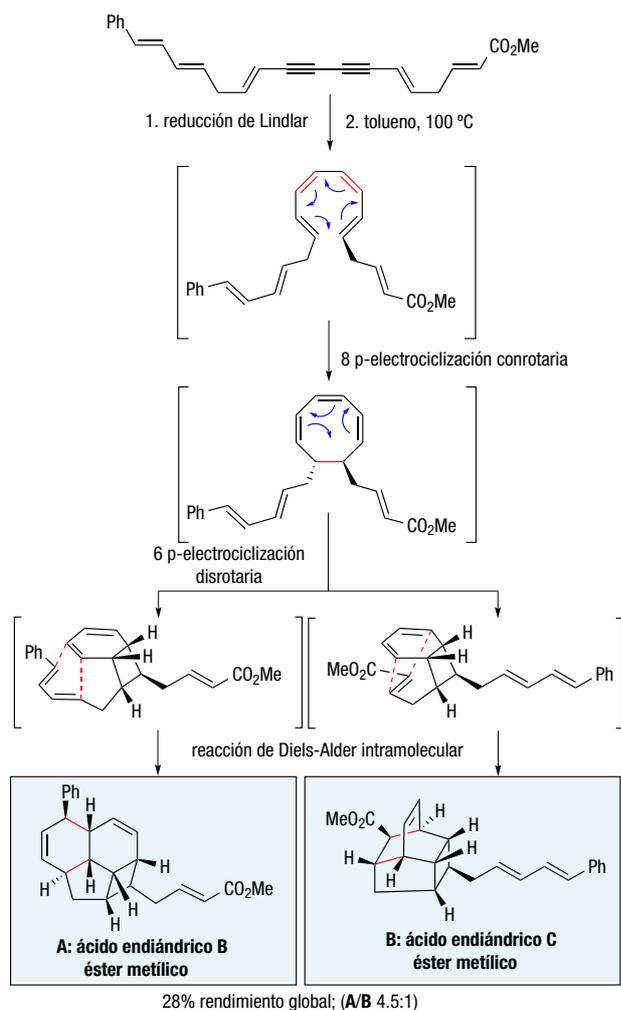
A través de estudios de biogénesis de productos naturales, se ha constatado la participación de reacciones tándem, lo que ha sido una fuente de inspiración para llevar a cabo procesos biomiméticos o bioinspirados en el curso de la síntesis de productos naturales. Un ejemplo elegante que implica reacciones tándem, es la síntesis de los ácidos endiátricos por el grupo de Nicolaou (Esquema 1).^[13] En este ejemplo inspirado por la naturaleza una cadena lineal poliinsaturada se hidrogena en las condiciones de Lindlar para proporcionar un sistema poliénico que mediante ca-

lefacción experimenta una ciclación 8 π conrotatoria que conduce a un compuesto que inmediatamente experimenta una electrociclación 6 π disrotatoria que conduce a un dieno que, a su vez, experimenta una reacción de Diels-Alder, que dependiendo de la selectividad proporciona los ésteres metílicos del ácido endiátrico B o del C. Fácilmente, puede imaginarse que la síntesis de estos compuestos por medios tradicionales sería hartamente complicada.

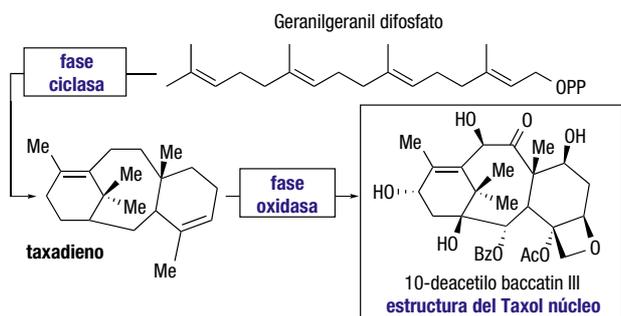
2. REDUCCIÓN DE ETAPAS NO PRODUCTIVAS

En la Figura 2 se exponían las etapas sintéticas no productivas más usuales que deberían evitarse en un planteamiento sintético ideal. A dicho fin, comentamos seis líneas de acción que se pueden aplicar en la planificación de una secuencia sintética para reducir estos pasos al mínimo.

- Elección correcta del material de partida:**^[16] Escoger el producto de partida, en base a motivos económicos y estructurales, no es trivial ya que la opción preferida dictará la estrategia y el curso de la síntesis. Asimismo tendrá influencia en los reactivos que se precisarán en las etapas iniciales, y consecuentemente en el costo del proceso tanto económico como medioambiental).
- Diseño de síntesis libre de grupos protectores:**^[17] Los grupos protectores han sido a la vez una bendición y una maldición para la síntesis. Por un lado, han permitido que muchas reacciones complejas y secuencias de reacción, que de otro modo no habrían sido posibles, se llevarán a cabo. Pero por otro lado, han inducido en muchos casos a una planificación sintética sub-óptima ya que las secuencias incompatibles con ciertos grupos funcionales podían llevarse a cabo mediante el enmascaramiento o protección temporal, lo que no estimulaba la búsqueda de una solución más óptima con el desarrollo de reacciones con mayor tolerancia funcional. Sin duda, el uso juicioso de grupos protectores seguirá siendo una herramienta en la planificación sintética durante algún tiempo, pero deberían utilizarse como último recurso.
- Economía redox:**^[18] el objetivo de la economía redox es reducir al mínimo, siempre que sea posible, el uso de manipulaciones de oxidación/reducción ya que las mismas no son estratégicas.
- Quimioselectividad:**^[19] Empleo de reactivos que puedan distinguir entre dos grupos funcionales similares. A medida que la complejidad molecular y los grupos funcionales aumentan, se incrementa la dificultad para alcanzar la quimioselectividad. El éxito en la síntesis total exige un alto grado de innovación, que permita el descubrimiento de reactividad nueva y principios para controlar la quimioselectividad.
- Activación C-H:**^[20] Durante la última década ha habido una explosión en esta área de investigación que permite la reacción quimioselectiva sobre un enla-



Esquema 1. Síntesis de Nicolaou de los ácidos endiátricos, via una secuencia de reacciones tándem



Esquema 2. Biosíntesis del taxol vía una aproximación en dos fases

ce C-H no funcionalizado. El uso de estrategias de activación C-H permiten insertar diversos grados de funcionalización en estados avanzados de la síntesis (p. ej. OH), evitando manipulaciones de tipo IGF. Sin embargo, a menudo es extremadamente difícil de aplicar en la práctica, aunque el proceso puede ser orientado mediante el uso de un grupo funcional dirigente en la reacción de activación C-H.

- f) **Estrategia ciclasa-oxidasa:**^[21] Baran ha llevado a su extremo lógico todos los anteriores conceptos al proponer una estrategia de síntesis que mimetic caminos biosintéticos para la preparación de productos naturales complejos. Utilizando el taxol como ejemplo^[21a] (Esquema 2): su biosíntesis puede diseccionarse en dos fases (i) “la fase ciclasa” en la que se forma el esqueleto carbonado a partir de productos de partida acíclicos y (ii) “la fase oxidasa”, donde los grupos funcionales son introducidos selectivamente en el esqueleto carbonado.

Baran ha demostrado mediante la síntesis altamente eficiente del ingenol el poder de esta estrategia de síntesis^[21b] (Esquema 3). A partir del 3-careno, de bajo costo, que ya contiene dos de los anillos, incluyendo la unidad de dime-

tilciclopropano, (elección correcta del producto de partida, *estrategia 2a*), el esqueleto tetracíclico se ensambló de manera muy directa con una reacción de Pauson-Khand como etapa clave (*estrategia 1*), que supone el punto final de la “fase ciclasa” de la síntesis. En la subsiguiente “fase oxidasa”, una serie de oxidaciones selectivas y una transposición pinacolínica abren paso a la obtención del ingenol de la manera más corta (17 etapas) y escalable, descrita hasta el presente.

3. DISEÑO DE MEJORES OBJETIVOS

Un aumento en la complejidad del objetivo inevitablemente induce el incremento del número de etapas para su síntesis, lo que puede conllevar que su síntesis total sea impracticable (Figura 4).^[22] Ya hemos comentado algunas formas de reducir el número total de etapas (diseño de nuevas reacciones que generen un gran incremento de complejidad en una etapa, nuevas estrategias y modos operacionales). Sin embargo, qué pasa con aquellas estructuras que puedan tener un alto valor añadido y se encuentren actualmente fuera de un alcance práctico en base a las actuales herramientas sintéticas.

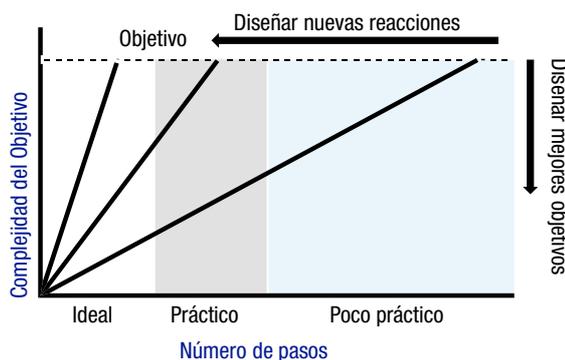
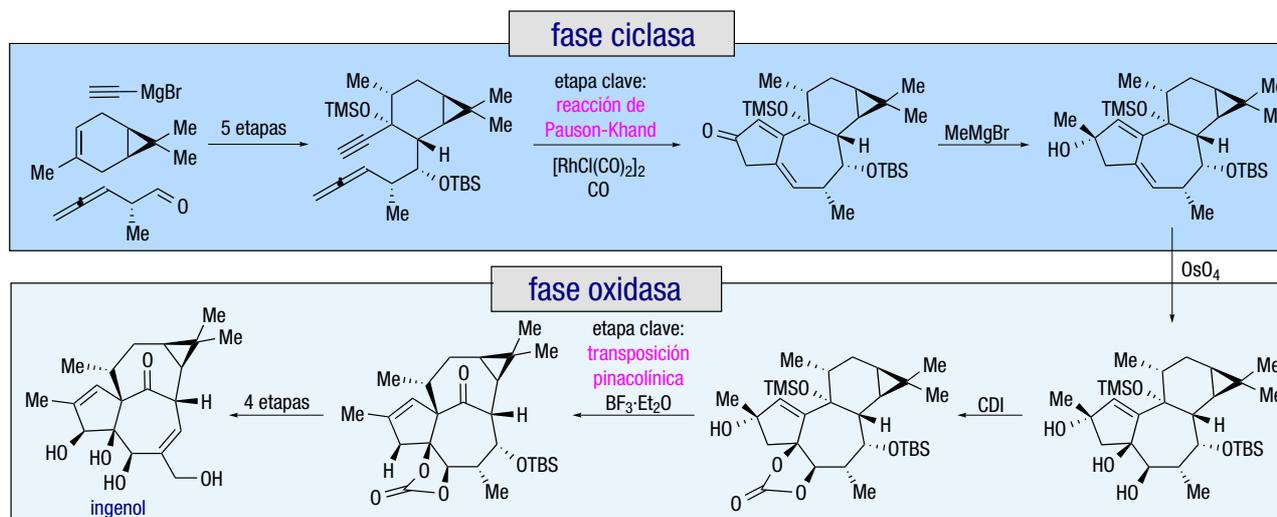


Figura 4. Diseño de nuevos objetivos mediante simplificación de la complejidad de productos naturales según Wender (ref. 22)



Esquema 3. Síntesis del ingenol por Baran basada en la estrategia ciclasa-oxidasa

Una forma de abordar el problema es poner el énfasis no en la estructura del producto natural, sino en la función biológica del compuesto.

Este cambio de orientación se basa en el hecho de que, en muchos casos, sólo se necesitan ciertas partes de la molécula de origen natural para la actividad funcional. La identificación de la subestructura molecular de la estructura arquetipo, que mantenga la actividad biológica, conlleva una considerable simplificación del proceso sintético del nuevo objetivo.

La aproximación de síntesis orientada a la función (FOS) ha sido aplicada con éxito a productos naturales con importante actividad farmacológica. Por ejemplo, la briostatina, cuyo potencial clínico como antitumoral se ha visto obstaculizado por el suministro limitado de fuentes naturales, era un candidato ideal para un diseño FOS ya que su actividad terapéutica está asociada tan sólo al fragmento sur de la estructura. Wender aprovechó este hecho para diseñar análogos simplificados de la briostatina que fuesen más accesibles sintéticamente.

La síntesis del producto diseñado (Figura 5) redujo el proceso de síntesis de 70 etapas a sólo 30 y los ensayos farmacológicos del mismo mostraron una actividad similar a la de la briostatina.^[22]

El fármaco Halaven, comentado en la introducción (Figura 1), es otro ejemplo de FOS ya que la molécula proviene de la simplificación estructural de un producto natural activo de alta complejidad.

Hasta ahora se han comentado estrategias encaminadas a la búsqueda de la síntesis ideal y la manera en que las reacciones o secuencias de reacción pueden convertir intermedios sintéticos en la molécula diana de la manera más eficiente posible. Sin embargo, estos aspectos sólo son una parte en una visión holística ya que también deben

contemplarse aspectos como la eliminación de reactivos en exceso, subproductos generados, material sin reaccionar, disolventes empleados... El proceso más recurrente es la técnica de “stop and go” (Figura 2b). En la búsqueda de la síntesis ideal, la optimización del modo operacional precisa de estrategias que puedan minimizar los procesos de purificación. Por supuesto, la aproximación requiere que no se comprometa la eficacia de las reacciones por los desechos generados en los pasos anteriores. A continuación se comentan dos “estrategias operacionales” para optimizar los procesos de síntesis.

4. USO DE REACTIVOS EN FASE SÓLIDA Y AGENTES SECUESTRADORES

Una forma de evitar purificaciones laboriosas es el uso de reactivos anclados en fase sólida.^[23] De esta manera la manipulación de la mezcla de reacción se facilita enormemente, requiriendo solamente la sencilla operación de filtración del soporte polimérico insoluble para eliminar los reactivos consumidos o en exceso. La adición de resinas con agentes secuestradores también se puede utilizar para eliminar cualquier reactivo estándar y subproductos no deseados mediante la cuidadosa elección de resinas ácidas, básicas, o de carácter nucleófilo o electrófilo. En este marco, la evaporación del disolvente en teoría proporciona el producto puro. Cabe señalar que si bien los reactivos más comunes están disponibles en soporte sólido, en muchos casos el precio sigue siendo un factor determinante para su uso generalizado, especialmente a gran escala. En contraprestación hay que valorar el ahorro en tiempo, materiales, residuos que estos reactivos proporcionan cuando se considera el coste total de un proceso.

Una de los ejemplos para mostrar la eficacia en la utilización de reactivos inmovilizados en el campo de la síntesis de productos naturales complejos es la síntesis total de la plicamina por el grupo de Ley.^[24] Utilizando una secuencia de varios pasos para la cual sólo se utilizaron reactivos y agentes secuestrantes anclados en soportes, se consiguió completar la síntesis de esta molécula con 40% de rendimiento global sin recurrir a ninguna técnica de purificación convencional (Esquema 4). Los pasos clave incluyen el uso de tirosina como fuente de quiralidad, una aminación reductora, posterior acoplamiento oxidativo fenólico y la ulterior aza-Michael intramolecular para ensamblar la estructura tetracíclica de una manera rápida. Finalmente, una serie de transformaciones estándar completó la síntesis. Los reactivos sólidos soportados tienen la ventaja importante de poder usarse en combinaciones que por lo general no son posibles, por ejemplo, ácidos y bases o agentes oxidantes y reductores en el mismo matraz. Así, se abren posibilidades interesantes para diseñar nuevas reacciones tándem (estrategia 1), que no serían posibles en condiciones homogéneas, debido a la mutua incompatibilidad.^[25] Además, los reactivos soportados en fase sólida tienen un papel relevante en la síntesis química en flujo y consecuentemente en la potencial automatización de los procesos de síntesis.^[26]

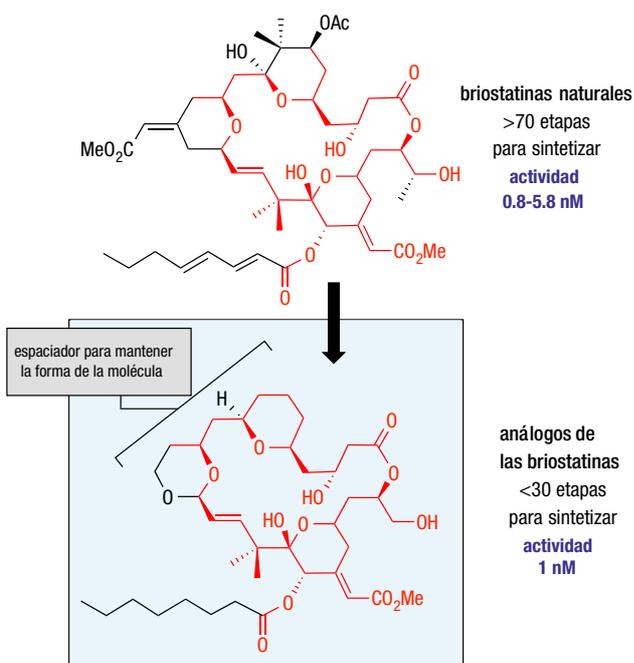
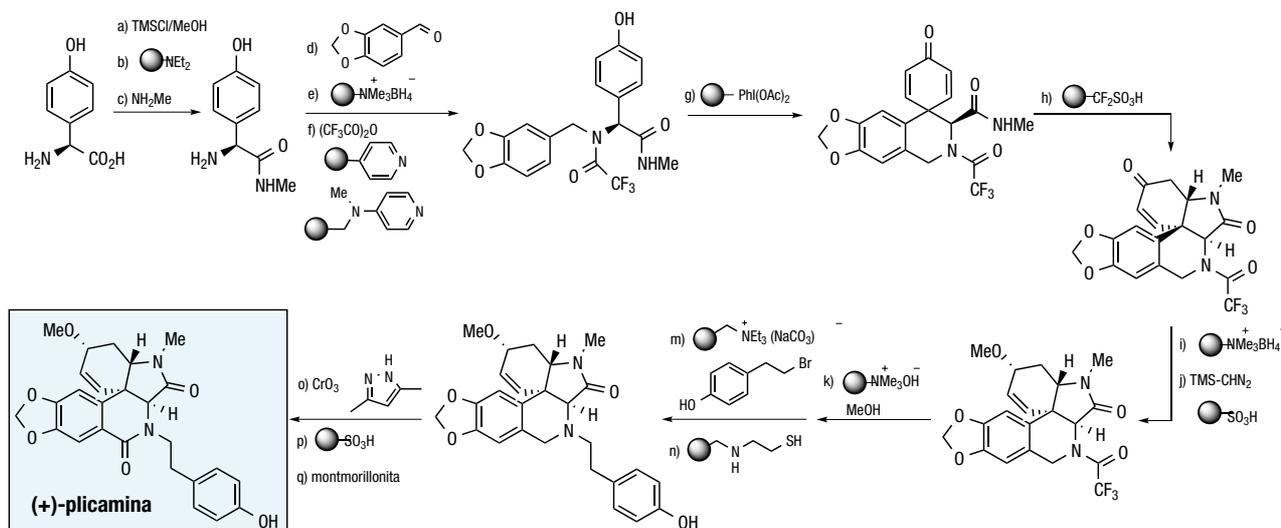


Figura 5. Modificación de la briostatina: más simple y más activo



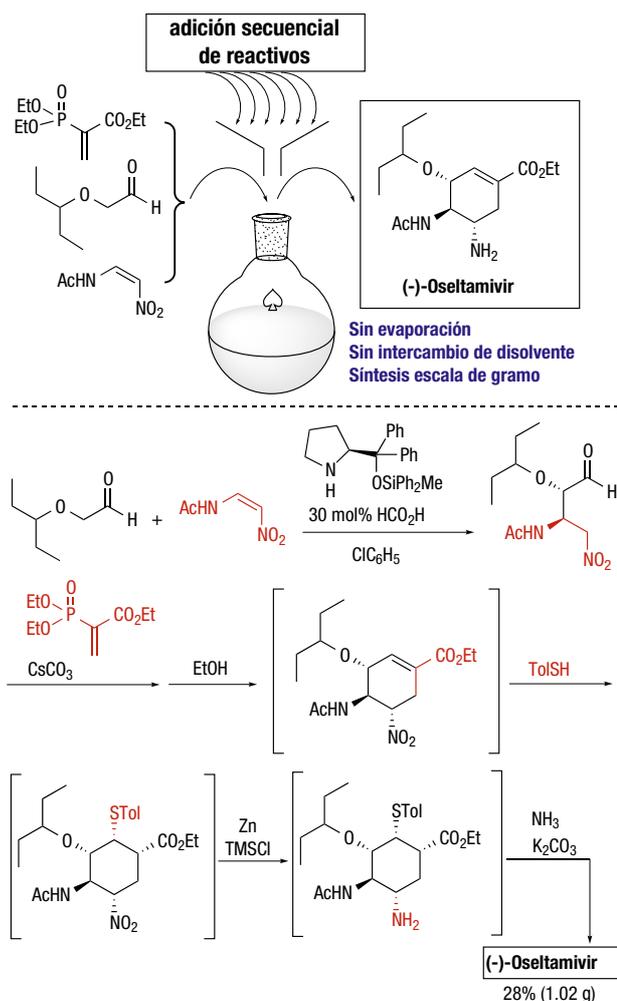
Esquema 4. Síntesis de la plicamina (Ley) utilizando solo reactivos soportados en fase sólida y agentes secuestradores anclados en resinas poliméricas

5. ESTRATEGIAS DE ECONOMÍA DE RECIPIENTE

Otro método para evitar los procedimientos de tratamiento y purificación clásicos es el concepto de economía de recipiente, que puede definirse como: “la unidad para completar tantas transformaciones sintéticas secuenciales en el mismo recipiente de reacción sin necesidad de elaboración y el aislamiento de productos entre etapas de síntesis sucesivas”.^[27] Los reactivos se añaden secuencialmente al matraz de reacción para iniciar la siguiente reacción y, explícitamente, la eliminación de volátiles del recipiente de reacción por destilación está permitida. En el diseño de una secuencia ininterrumpida de reacciones es ventajoso utilizar disolventes de bajo punto de ebullición y reactivos que sean volátiles o formen subproductos volátiles para evitar la acumulación de residuos. Para el éxito de esta estrategia son requisitos ineludibles un alto rendimiento en las transformaciones y elevada selectividad en las mismas.

Un ejemplo ilustrativo de este concepto es la síntesis en un solo recipiente en una escala multigramo del agente antiviral (-)-oseltamivir (Tamiflu) por el grupo de Hayashi (Esquema 5).

La primera síntesis publicada^[28] consistía en tres secuencias de reacción, cada una de ellas en modo “sólo un recipiente”, que era una mejora importante en los métodos existentes en el momento. Posteriormente se optimizó el proceso de la síntesis a dos secuencias de reacción de tipo “sólo un recipiente”^[29] y, finalmente, fue posible llevar a cabo la secuencia completa en un solo matraz, sin la necesidad de evaporación o intercambio de disolvente.^[30] La clave para la síntesis es el despliegue de una reacción organocatalítica tándem para construir rápidamente la estructura del núcleo en un solo paso (*estrategia 1*). La secuencia de síntesis optimizada comenzó con una reacción de Michael organocatalizada promovida por un difenilprolinol sililado, el nitroalcano resultante reacciona con un vinilfosfonato y, en forma tándem, a través de una reacción de Hor-



Esquema 5. Visión general de la síntesis “one-pot” del Tamiflu (Hayashi) utilizando los principios de la economía de recipiente

ner-Wadsworth-Emmons intramolecular, proporciona el anillo carbocíclico. Una sutil protección del doble enlace mediante una reacción tia-Michael, permite la reducción del grupo nitro a una amina, antes de la restauración del doble enlace mediante una reacción de retro-tia-Michael. El mismo grupo de investigación ha demostrado también la eficiencia de procesos con economía de recipiente en las síntesis de la dipeptidilpeptidasa IV, inhibidor de la ABT-3415^[31] y de prostaglandinas.^[32]

COMBINAR ESTRATEGIAS

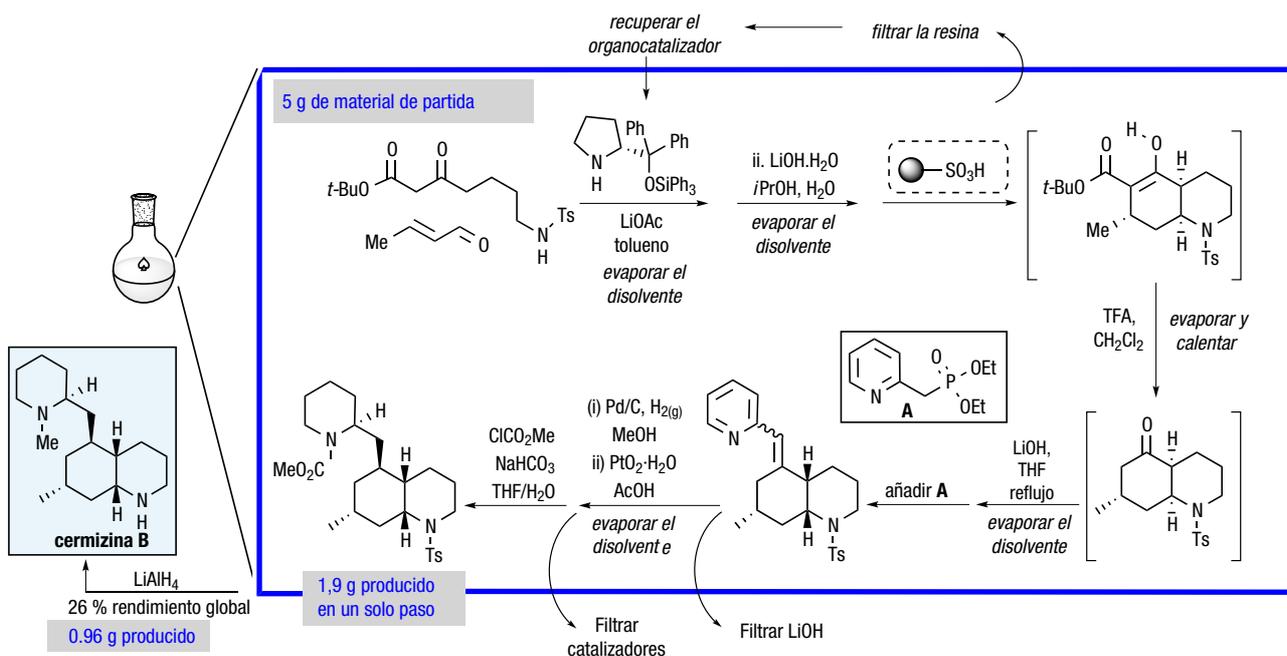
El uso combinado de las estrategias presentadas tiene un potencial más alto en el camino hacia la eficiencia sintética, lo que se ejemplifica con la síntesis de la cermizina B llevada a cabo en nuestro laboratorio (Esquema 6).^[33] Las síntesis previamente descritas para alcaloides flegmarina, compuestos clave en la biogénesis de los alcaloides lycopodium,^[34] habían requerido secuencias entre 20 y 25 etapas. Combinando varias de las estrategias comentadas fue posible la síntesis de un precursor directo de la cermizina B de manera muy eficiente en la escala de gramo. En el proceso de síntesis con economía de recipiente se eliminaron la mayoría de purificaciones, de manera que fue posible reducir el tiempo requerido, para la síntesis total a sólo 10 horas de operaciones manuales.

La síntesis tiene como base una reacción tándem (*estrategia 1*).^[35] El primer enlace clave se forma en un proceso organocatalizado que genera el primer centro estereogénico. La adición de LiOH al matraz de reacción promueve una bisi-clación tándem generando el sistema de decahidroquinolina. Los residuos inorgánicos y el organocatalizador se eliminan del medio de reacción mediante adición de una resina ácida que actúa como secuestrante de las especies bá-

sicas (*estrategia 4*). El posterior tratamiento con TFA induce la formación del cetoácido y la naturaleza volátil del ácido permite su eliminación por evaporación (*estrategia 5*). La adición de LiOH inicia un segundo proceso tándem consistente en una reacción de retro sulfa-Michael y ulterior reciclación para generar la cetona diastereomérica más estable termodinámicamente, que experimenta la subsiguiente reacción de Horner-Emmons para rendir el producto de acoplamiento de tipo vinilpiridina. La adición secuencial de catalizadores permite la sucesiva hidrogenación del alqueno y del anillo de piridina. Después de una filtración, evaporación y metoxicarbonilación se obtuvo una mezcla de carbamatos, fácilmente separable. Una etapa de reducción final convierte el carbamato sólido en la cermizina B mediante formación simultánea de la amina terciaria y eliminación del grupo to-silo. Así, en conjunto, la secuencia de síntesis evita el uso de etapas no productivas (*estrategia 2*).

CONCLUSIONES

Los productos naturales complejos, debido a su actividad biológica, son a menudo puntos de partida en la investigación de nuevos fármacos, así como pueden coadyuvar en el conocimiento de procesos biológicos. Sin embargo, con demasiada frecuencia, las limitaciones en su disponibilidad pueden constreñir el desarrollo de líneas de investigación. En esta visión general acerca de la eficiencia en síntesis se han puesto de manifiesto los obstáculos para su logro y, tomando como punto de partida el análisis de Wender acerca de la síntesis ideal, se han mostrado caminos que se están explorando para la innovación en síntesis total. Aunque todavía lejos de la realización de este ideal, se han presentado cinco estrategias dentro de un potencial marco conceptual que se puede utilizar para acercarse a



Esquema 6. Síntesis de la cermizina B mediante organocatálisis, reacciones tándem, agentes soportados, economía de recipiente y escalabilidad

este "idealidad" y para aumentar la eficiencia de una síntesis. La fusión y combinación de las estrategias sin duda requerirá un enfoque menos reduccionista y más holístico para acometer la construcción de moléculas complejas. Los grupos de síntesis total deberán ampliar su potencial, más allá de la metodología, diseño y estrategia de síntesis, para obtener un objetivo molecular complejo, incrementando el rango de cooperaciones con equipos expertos en química computacional, de aplicación de nuevas técnicas de laboratorio (reactivos anclados, química en flujo) y de diseño de síntesis orientada a la función biológica (FOS). Así pues, aunque la creatividad y productividad en síntesis orgánica ha sido extraordinaria en el último medio siglo, es probable que su rol frente a los nuevos retos^[36] deba ser más contributivo para continuar la investigación y desarrollo en la búsqueda de la piedra filosofal de la síntesis ideal.

Y al terminar, las ideas acerca de la potencialidad de la síntesis total ya estaban presentes desde su origen: Berthelot, en un artículo del 1875, escribía: "Así, la síntesis extiende sus conquistas desde los elementos hasta el dominio de las sustancias más complicadas, sin que seamos capaces de asignar ningún límite a su progreso".^[37]

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MINECO por el apoyo económico a través del proyecto CTQ2013-41338-P.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] (a) K. C. Nicolaou, S. A. Snyder, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2004**, *101*, 11929-11936; (b) K. C. Nicolaou, *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 951-972. (c) A. M. Armaly, Y. C. DePorre, E. J. Groso, P. S. Riehl, C. S. Schindler, *Chem. Rev.* **2015**, *115*, 9232-9276.
- [2] E. M. Suh, Y. Kishi, *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, *116*, 11205-11206.
- [3] (a) S. L. Schreiber, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2011**, *108*, 6699-6702. (b) S. Wetzel, R. S. Bon, K. Kumar, H. Waldmann, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 10800-10826. (c) J. Hong, *Chem. Eur. J.* **2014**, *20*, 10204-10212. (d) S. Rizzo, H. Waldmann, *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 4621-4639.
- [4] El premio Nobel de medicina de 2015 fue otorgado a tres investigadores que han desarrollado fármacos contra la malaria y enfermedades de origen parasitario, basados en los productos naturales artemisinina (Y. Tu) y avermectina (S. Omura), convertida en ivermectina (W.C. Campbell): (a) J. H. McKerrrow, *Nat. Prod. Rep.* **2015**, *32*, 1610-1611. (b) C. Hertweck, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 14622-14624.
- [5] A. M. Walji,; D. W. C. MacMillan, *Synlett* **2007**, 1477-1489
- [6] C. A. Kuttruff, M. D. Eastgate, P. S. Baran, *Nat. Prod. Rep.* **2014**, *31*, 419-432.
- [7] Acerca del papel de los productos naturales en el mercado farmacéutico actual, véase: C. Jiménez, *An. Quím.* **2013**, *109*, 134-141.
- [8] M. J. Yu, W. Zheng, B. M. Seletsky, *Nat. Prod. Rep.* **2013**, *30*, 1158-1164.
- [9] M. Kageyama, T. Tamura, M. H. Nantz, J. C. Roberts, P. Somfai, D. C. Whritenour, S. Masamune, *J. Am. Chem. Soc.* **1990**, *112*, 7407-7408. (b) K. J. Hale, M. G. Hummersone, S. Manaviazar, M. Frigerio, *Nat. Prod. Rep.* **2002**, *19*, 413-453.
- [10] N. J. Green and M. S. Sherburn, *Aust. J. Chem.* **2013**, *66*, 267-283.
- [11] M. Wernerova, T. Hudlicky, *Synlett* **2010**, 2701-2707.
- [12] (a) P. A. Wender, B. L. Miller, *Nature* **2009**, *460*, 197-201. (b) T. Gaich, P. S. Baran, *J. Org. Chem.* **2010**, *75*, 4657-4673. (c) P. A. Wender, *Tetrahedron* **2013**, *69*, 7529-7550.
- [13] C.-J. Li, B. M. Trost, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2008**, *105*, 13197-13202.
- [14] (a) C. Grondal, M. Jeanty, D. Enders, *Nature Chem.* **2010**, *2*, 167-178. (b) S. B. Jones, B. Simmons, A. Mastracchio, D. W. C. MacMillan, *Nature* **2011**, *475*, 183-188. (c) C. M. R. Volla, I. Atodiresei, M. Rueping, *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 2390-2431.
- [15] K. C. Nicolaou, N. A. Petasis, R. E. Zipkin, J. Uenishi, *J. Am. Chem. Soc.* **1982**, *104*, 5555-5557.
- [16] J. Miltzer, *Nat. Prod. Rep.* **2014**, *31*, 595-603.
- [17] I. S. Young, P. S. Baran, *Nature Chem.* **2009**, *1*, 193-205.
- [18] T. Newhouse, P. S. Baran, R. W. Hoffmann, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 3010-3021.
- [19] (a) R. A. Shenvi, D. P. O'Malley, P. S. Baran, *Acc. Chem. Res.* **2009**, *42*, 530-541. (b) J. C. Lo, J. Gui, Y. Yabe, C.-M. Pan, P. S. Baran, *Nature* **2014**, *516*, 343-348.
- [20] (a) K. Chen, P. S. Baran, *Nature* **2009**, *459*, 824-828. (b) W. R. Gutekunst, P. S. Baran, *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 1976-1991.
- [21] (a) Y. Ishihara, P. S. Baran, *Synlett* **2010**, 1733-1745. (b) L. Jorgensen, S. J. McKerrall, C. A. Kuttruff, F. Ungeheuer, J. Felting, P. S. Baran, *Science* **2013**, *341*, 878-882.
- [22] P. A. Wender, *Nat. Prod. Rep.* **2014**, *31*, 433-440.
- [23] S. V. Ley, I. R. Baxendale, R. N. Bream, P. S. Jackson, A. G. Leach, D. A. Longbottom, M. Nesi, J. S. Scott, R. I. Storer, S. J. Taylor, *J. Chem. Soc. Perkin 1* **2000**, 3815-4195.
- [24] (a) I. R. Baxendale, S. V. Ley and C. Piutti, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, *41*, 2194-2197. (b) I. R. Baxendale, S. V. Ley, M. Nesi, C. Piutti, *Tetrahedron* **2002**, *58*, 6285-6304.
- [25] A. W. Pilling, J. Boehmer, D. J. Dixon, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 5428-5430.
- [26] (a) J. C. Pastre, D. L. Browne and S. V. Ley, *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 8849-8869. (b) S. V. Ley, D. E. Fitzpatrick, R. M. Myers, C. Battilocchio, R. J. Ingham, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 10122-10136. (c) J. Hartwig, A. Kirschning, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 10412-10414.
- [27] (a) P. A. Clarke, S. Santos, W. H. C. Martin, *Green Chem.* **2007**, *9*, 438-440. (b) C. Vaxelaire, P. Winter, M. Christmann, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 3605-3607.
- [28] H. Ishikawa, T. Suzuki, Y. Hayashi, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 1304-1307.
- [29] H. Ishikawa, T. Suzuki, H. Orita, T. Uchimaru, Y. Hayashi, *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 12616-12626.
- [30] T. Mukaiyama, H. Ishikawa, H. Koshino, Y. Hayashi, *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 17789-17800.
- [31] H. Ishikawa, M. Honma, Y. Hayashi, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 2824-2827.
- [32] Y. Hayashi, S. Umemiya, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 3450-3452.
- [33] B. Bradshaw, C. Luque-Corredera, J. Bonjoch, *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 7099-7102.
- [34] X. Ma, D. R. Gang, *Nat. Prod. Rep.* **2004**, *21*, 752-772.
- [35] a) B. Bradshaw, C. Luque-Corredera, J. Bonjoch, *Org. Lett.* **2013**, *15*, 326-329. (b) B. Bradshaw, C. Luque-Corredera, G. Saborit, C. Catiuela, R. Dorel, C. Bo, J. Bonjoch, *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 13881-13892.
- [36] G. M. Whitesides, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 3196-3209.
- [37] F. Serratos, *Buill. Soc. Cat. Cièn.* **1993**, *14*, 33-46.

Ética en la Investigación: buenas prácticas científicas

Pilar Goya Laza y M.^a Luisa Salas García

Resumen: La integridad científica es un presupuesto esencial para el progreso y el avance del conocimiento. Las malas prácticas científicas –fabricación, falsificación y plagio–, así como las conductas cuestionables perjudican a la investigación, generan pérdida de confianza entre científicos, entre éstos y la sociedad, y dañan la imagen pública de la ciencia. Los agentes implicados deben promover la buena praxis en investigación mediante acciones formativas en integridad científica, y la formulación de principios y recomendaciones en códigos de buenas prácticas. En este artículo se tratarán las malas prácticas científicas, sus causas, incidencia, y efectos, así como acciones planteadas a nivel institucional e internacional para combatirlas.

Palabras clave: Integridad en la investigación, malas prácticas científicas, fraude, retractaciones.

Abstract: Research integrity is vital for the development and advance of science. Scientific misconduct such as fabrication, falsification and plagiarism is detrimental for research, undermines trust among scientists and damages the public image of science. The stakeholders involved, researchers, institutions and financing agencies should promote scientific integrity by means of developing and implementing guidelines and codes of conduct. This article deals with scientific misconduct, its frequency, causes, impact, and discusses some of the initiatives carried out at the institutional and international levels to promote research integrity.

Keywords: Research integrity, scientific misconduct, fraud, retractions.

INTRODUCCIÓN

La ciencia, en su concepción más general, ha contribuido tanto al avance del conocimiento como al progreso de la vida material. Ahora bien, la investigación científica, como cualquier otra actividad humana, se enmarca en un contexto ético-social y, por esta razón, los investigadores son responsables no sólo de la elección del objeto de su investigación, de sus efectos y aplicaciones, sino también del modo en que ésta se desarrolla.

En lo que se refiere a ciencia y ética se pueden establecer distintos tipos de consideraciones: las relativas a la naturaleza y finalidad de la investigación, que tienen una incidencia directa en la sociedad, y las derivadas de la manera concreta en que se lleva a cabo la actividad científica.

Pese a que en este artículo se van a considerar, primordialmente, los aspectos prácticos de ejecución de la inves-

tigación, no podemos dejar de recordar que este año, se ha conmemorado en Ypres, Bélgica, que en abril de 1915 se usaron armas químicas masivas por primera vez. Es cierto que si bien a lo largo de la historia se habían usado flechas envenenadas, plantas tóxicas para contaminar el agua, etc., nunca su utilización había causado tanto sufrimiento y devastación como en la primera guerra mundial donde se atribuyen al cloro y al gas mostaza 90.000 muertes. Por ello, EuCheMS, como representante de más de 160.000 químicos europeos, ha hecho un llamamiento a la “química responsable” y apoya a la Organización para la Prohibición de la Armas Químicas (OPCW).^[1]

Hecha esta imprescindible mención, sin entrar en reflexiones más profundas sobre ética y química, en este artículo trataremos la integridad en la realización de la investigación, así como diferentes vertientes de la mala conducta en investigación, en el orden que sigue:

- Integridad científica y conducta responsable en investigación.
- Mala conducta en investigación. Prácticas cuestionables.
- Incidencia de la mala praxis en investigación.
- Etiología de la mala praxis en investigación.
- Efectos y consecuencias de las malas prácticas en investigación.
- Actuaciones para el fomento y promoción de la integridad científica.
- Códigos de buenas prácticas.



P. Goya¹



M.ª L. Salas²

¹ Instituto de Química Médica, CSIC

² Departamento de Ética en la Investigación, CSIC

C-e: pgoya@iqm.csic.es y ml.salas@csic.es

Recibido: 04/11/2015. Aceptado: 13/12/2015.

Lamentablemente, según el Presidente de la Fundación Alexander von Humboldt^[2] hay que aceptar que, cada vez con más frecuencia, la comunidad científica tiene que hacer frente a problemas que, sin ser nuevos, tienen mayor alcance y repercusión, tales como el aumento del número de retractaciones de publicaciones, los escándalos científicos en la prensa, o que la reproducibilidad de datos deja mucho que desear.

Efectivamente, es un hecho contrastado el crecimiento del número de artículos que se retiran, y sobre esto volveremos más adelante con cifras. En cuanto a la resonancia en los medios de comunicación de la mala praxis científica, han tenido una amplia cobertura en prensa casos relacionados con células madre como el del coreano Hwang Woo-Suk, o el más reciente del Instituto Riken en el que uno de los implicados se suicidó. En un ámbito más próximo a la química cabe citar a Jan Hendrik Schön quien por prácticas fraudulentas tuvo que retractarse de siete artículos en *Nature* y seis en *Science*.^[3] Ahora bien, hay que decir que existen referencias anteriores como la del cráneo de Piltown, aparecido en 1912 como perteneciente al “eslabón perdido”, y desenmascarado como fraude casi cuarenta años después, o la referencia del matemático inglés Charles Babbage quien, en el siglo XIX, identificó ciertas malas prácticas con el esfuerzo intencionado de “cocinar” o “recortar” datos para sustentar una determinada hipótesis.

El tema de la reproducibilidad de datos y resultados preocupa considerablemente a la comunidad científica y fue, de hecho, la base del discurso del Presidente de la *US National Academy of Sciences*.^[4]

INTEGRIDAD CIENTÍFICA Y CONDUCTA RESPONSABLE EN INVESTIGACIÓN

En una sociedad en la que el conocimiento científico, el desarrollo tecnológico y la innovación son activos fundamentales para el progreso y el crecimiento económico sostenible, y tienen un impacto directo en la salud y el bienestar del ser humano, cobra un especial interés y significación el concepto de integridad científica y su directa correlación con la excelencia en la investigación.^[5]

La integridad en la práctica científica es consustancial a la actividad investigadora. En tanto que el conocimiento científico se cimenta en conocimientos previos, la fiabilidad, credibilidad y reproducibilidad del acervo científico constituyen el fundamento primario para el avance del conocimiento, así como para sustentar la confianza de la sociedad en la ciencia y en el quehacer de los científicos.

La investigación científica es una actividad esencialmente colaborativa y transfronteriza y, por ello, resulta indispensable que una serie de principios éticos tales como honestidad, objetividad, imparcialidad, independencia y responsabilidad informen no sólo la actitud del investigador como profesional de la ciencia, su metodología o el proceso de producción y difusión del conocimiento científico, sino también las colaboraciones que establece.

No existe actualmente una definición globalmente consensuada de integridad científica *-research integrity-* aun cuando ya se realiza investigación sobre este tema, son muchos los países que cuentan con estructuras u oficinas nacionales de integridad científica, existen redes y foros de carácter nacional y transnacional, y se celebran congresos y conferencias mundiales para reflexionar y debatir sobre esta materia. Sí existe, sin embargo, una aceptación generalizada de determinados principios y responsabilidades establecidos en distintas declaraciones, códigos o informes que pudiendo diferir en sus contenidos o desarrollos, comparten un mismo propósito. Merecen destacarse al efecto la Declaración de Singapur, la Declaración de Montreal, el *European Code of Conduct for Research Integrity*, los distintos informes de la OCDE que promueven las prácticas responsables en investigación, el *Statement of Principles for Research Integrity* del *Global Research Council* o el informe de título *Responsible Conduct in the Global Research Enterprise* del *InterAcademy Council*.^[6] En el ámbito nacional hay que señalar la reciente *Declaración Nacional sobre Integridad Científica*, suscrita y presentada conjuntamente por el CSIC, CRUE Universidades Españolas y la COSCE.

MALA CONDUCTA EN INVESTIGACIÓN. PRÁCTICAS CUESTIONABLES

Existen toda una serie de conductas no aceptables en el ejercicio y desarrollo de la investigación científica muy alejadas de la praxis rigurosa y responsable, esto es, de las buenas prácticas científicas.

Como ocurría en el caso de la integridad científica, tampoco existe una definición clara y comúnmente aceptada de mala conducta en investigación *-research misconduct-*. Podemos, no obstante, establecer una categorización de mala praxis atendiendo a la seriedad y trascendencia de los perjuicios y consecuencias de ella derivadas. Las claramente consideradas malas prácticas científicas, que revisten mayor gravedad y resultan incuestionablemente fraudulentas, incluyen la fabricación, la falsificación y el plagio *-FFP, fabrication, falsification, and plagiarism*. Fabricar datos significa inventarse datos, describirlos, y comunicarlos. La falsificación incluiría la manipulación de materiales, equipos, procesos y resultados. Por último, el plagio se corresponde con la copia y apropiación de ideas, procesos, resultados o creaciones intelectuales de otras personas sin otorgarles el debido crédito, dándolas como propias.

Adicionalmente a la fabricación, la falsificación y el plagio existen toda una serie de prácticas cuestionables *-Questionable Research Practices (QRPs)-*, más sutiles y, en ocasiones, difícilmente detectables, que sin llegar a falsear o tergiversar el registro de datos y resultados, devienen comportamientos irresponsables y se sitúan en una zona gris entre la deseable integridad científica y el fraude en la investigación. La OCDE ha clasificado las siguientes prácticas cuestionables en investigación, sin que las categorías establecidas constituyan ninguna lista cerrada:

- Mala conducta en la práctica de la investigación: diseño deficiente y pobre, uso inadecuado (perjudicial o peligroso) de métodos y procedimientos, y errores experimentales, analíticos o computacionales.
- Mala conducta relativa a los datos: no conservar ni registrar los datos, mala gestión de medios y datos o retener u ocultar los datos y resultados a la comunidad científica. En esta categoría debiéramos incluir también la interpretación abusiva de datos.
- Mala conducta relacionada con la publicación de resultados: reclamación de autoría inmerecida, denegación de autoría a contribuciones significativas y relevantes, aumento artificioso de publicaciones – fragmento de publicaciones–, revisión y evaluación insuficientes o fallidas.
- Mala conducta concerniente a la persona del investigador: inadecuado o negligente ejercicio del tutelaje y liderazgo, comportamiento personal inapropiado, hostigamiento o acoso, y falta de sensibilidad frente a las normas y usos sociales y culturales establecidos.
- Mala conducta en relación con la financiación de la investigación y otras: abusos e incumplimientos en el proceso de revisión por pares, o la no revelación de conflictos de intereses.

No se incluyen entre las malas prácticas los errores honestos y las diferencias de opinión.

INCIDENCIA DE LA MALA PRAXIS EN INVESTIGACIÓN

Respecto a la incidencia de la mala conducta en investigación, la primera cuestión que cabe plantearse es si está aumentando realmente el número de casos, si resulta más sencilla su identificación o si, simplemente, lo que es mayor es el grado de sensibilización frente a ellos, o su repercusión. Todo parece indicar que, como expondremos a continuación, la mala praxis va en aumento.

Hay que señalar que las cifras y datos relativos a las malas prácticas científicas que arrojan los distintos estudios sobre el tema, tienen que ser interpretadas y manejadas con cautela. Si reduccionista pudiera parecer la afirmación de algunos de que se trata tan sólo de unas cuantas “manzanas podridas” en la cesta, resulta todavía más perjudicial sospechar de todos y de todo.

Las cifras son muy subjetivas y pueden estar sesgadas, y así lo pone de manifiesto un metaanálisis publicado en *PLoS ONE*, según el cual casi el 2% de los investigadores admiten haber fabricado, falsificado o modificado datos al menos en una ocasión, mientras que cuando se les pregunta respecto a este mismo comportamiento por parte de colegas, el porcentaje supera el 14%. En lo que a prácticas cuestionables en investigación se refiere, las cifras son muy superiores; casi un 34% de los investigadores reconoce haber cometido alguna de ellas, y la cifra se eleva hasta al 72% cuando se les pregunta por la conducta de sus colegas.^[7]

Una encuesta realizada a millares de científicos estadounidenses arrojó como resultado que cuestionados so-

bre distintas malas prácticas priorizadas en una lista, un tercio de ellos aceptaba haber estado comprometido en alguna de ellas en los tres años anteriores a la formulación de la cuestión.^[8] Distintas estadísticas y estudios publicados en *Nature* concluyen la importancia de no desdeñar, y dispensar la debida atención a las prácticas cuestionables. En otro estudio también publicado en *Nature* en el año 2008, tras un proceso de evaluación a 2.212 investigadores, se determinó que había tres incidentes anuales de malas prácticas por cada cien investigadores.^[9]

Hay también distintos análisis que valoran la mala conducta en función de la disciplina objeto de la investigación, la edad o el género del investigador.^[10] Los incidentes de mala praxis en los ámbitos de la investigación clínica y farmacológica son especialmente preocupantes, hasta el punto de que en una referencia reciente son considerados una “enfermedad sistémica” (*A systemic malady: the pervasive problem of misconduct in the biomedical sciences*).^[11]

Se acepta, generalmente, que un indicador de que la mala conducta en investigación crece peligrosamente es que el número de retractaciones de artículos en revistas va en aumento, calculándose que desde 1975 hasta ahora, éstas se han multiplicado por diez. Aun teniendo en cuenta que el número total de publicaciones se ha incrementado notablemente, es un hecho cierto que es mayor el número de retractaciones motivadas por fraude u otras conductas inaceptables. Un estudio que analizó 2.047 artículos retractados en el ámbito de las ciencias de la vida señaló que el 43% de las retractaciones se debían a fraude, un 10% a plagio, el 14% a duplicidades y a error, sólo un 21%.^[12]

El aumento en el número de las retractaciones es potencialmente atribuible a una evaluación deficiente. El número de artículos que se publican en algunas revistas científicas es tan elevado que resulta ardua la gestión de la evaluación por pares de acreditada solvencia y, por ende, imposible garantizar la calidad de todos los contenidos. Por otra parte, el progresivo aumento del número de autores en los artículos científicos, y el hecho de que muchas publicaciones multiautor sean también pluridisciplinares dificulta la tarea de evaluación. Por un lado, no siempre están claras las contribuciones y responsabilidades de los autores y, por otro, aunque los revisores puedan ser especialistas de renombre en una disciplina no lo son en todas las que compromete la publicación multidisciplinar.

En un estudio aparecido en *PLoS Medicine*, llama poderosamente la atención la posible relación establecida entre el aumento en el número de retractaciones y la asunción de una mayor responsabilidad por parte de científicos y las revistas, considerando que el aumento en las retractaciones puede ser una buena señal de que los científicos y las revistas son cada vez más rigurosos y responsables en sus procesos de producción y difusión del conocimiento.^[13]

Hay que señalar que revistas con alto índice de impacto como *Science*, *Nature* o *PNAS* aparecen entre las que registran un mayor número de retractaciones. Esto puede deberse a distintos motivos como el que los artículos publicados en estas revistas despiertan más interés y se leen con mayor atención, y a que tales publicaciones resultan más tentadoras y atractivas para los defraudadores.

ETIOLOGÍA DE LA MALA PRAXIS EN INVESTIGACIÓN

La mala conducta en investigación es atribuible a distintas causas y razones. Muy probablemente, la más importante de las razones explicativas de las desviaciones de las buenas prácticas en el quehacer científico sea la cada vez mayor presión a la que están sometidos los investigadores para obtener nuevos datos y resultados, y publicarlos.

Hay quien piensa que las malas prácticas científicas están tan directamente vinculadas con el sistema de evaluación, reconocimiento y financiación de la investigación, que habría que pensar en cambiar el paradigma y plantear nuevos parámetros de valoración y subvención. Publicar no implica garantía de calidad, pero el viejo adagio *publish or perish* –cantidad *versus* calidad–, aparecido en los Estados Unidos en los años cincuenta, y tan censurado en ese momento, se ha impuesto, aun cuando el descrédito y perjuicios irrogados son palmarios, particularmente si nos fijamos en la inflacionaria producción científica de países como India o China. No es aconsejable que el número de publicaciones sea utilizado como criterio primordial para la promoción y consolidación de la posición de los investigadores en sus instituciones de adscripción. La *DFG* (Fundación Alemana de Investigación Científica), entre otras instituciones, limita a cinco el número de artículos utilizados para determinar la calidad de la investigación de un solicitante.

Tampoco parecen la solución las métricas y así, Ernst-Ludwig Winnacker, fundador y primer secretario general del *European Research Council*, advierte del peligro de conceder demasiada importancia a los índices y factores de impacto, olvidándonos de la calidad científica.^[2b] En este contexto, numerosas instituciones han firmado la *San Francisco Declaration On Research Assessment (DORA)*^[14] en la que se insiste en la valoración de la investigación en función de su calidad y no con base exclusivamente en índices de impacto.

Otra presión, en absoluto despreciable, es la obtención, en régimen de concurrencia competitiva, de una financiación cada vez más escasa. No olvidemos que los porcentajes de éxito (*success rates*) de muchas solicitudes son del orden del 20%, pudiendo reducirse hasta el 10% en algunos de los programas del Horizonte 2020.

Para terminar, además de las expuestas, existen otras razones promotoras de conductas inadmisibles en la práctica científica, como pudieran ser el perfil de personalidad del investigador, la satisfacción de necesidades y carencias de carácter personal –deseo de notoriedad, reconocimiento o éxito– o familiar, obtención de financiación, problemas económicos, psicológicos o de salud, formación insuficiente, negligencia, exceso de premura, etc.

EFFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LAS MALAS PRÁCTICAS EN INVESTIGACIÓN

La mala conducta en investigación genera multitud de efectos adversos y consecuencias negativas, que pueden afectar, además de al investigador como sujeto activo de la

mala práctica, a su grupo de investigación, a su disciplina o campo de especialización, a su institución de adscripción, a su país, y a la sociedad, en general.

Dependiendo de la gravedad o alcance de la mala praxis, y sin entrar a considerar que determinadas malas conductas pueden ser sancionables administrativa o penalmente, la carrera profesional, la imagen y el crédito del investigador pueden quedar indeleblemente dañados, de manera que pierda su trabajo o le sean revocados los títulos acreditativos de su formación.

Los daños y perjuicios que pueden ocasionar los científicos desacreditados a la carrera de los jóvenes investigadores cuya formación tutelan, o a sus grupos de investigación, tampoco son menores. Si previsible y altamente probable será el deterioro de las relaciones con los científicos de su grupo, y el desmedro de la calidad de la investigación producida, los menoscabos y quebrantos causados en el futuro profesional de sus tutelados y doctorandos pueden tener incalculables consecuencias. Los hasta entonces méritos y éxitos compartidos con los líderes de sus grupos o directores de sus tesis, pueden devenir demérito y democión, obligando a quienes están iniciando su carrera a la retracción de publicaciones, reformulación de planteamientos metodológicos, repetición de experimentos, reescritura de capítulos de la tesis doctoral, etc.

La comisión de una mala conducta por parte de investigadores de reputada capacidad y solvencia puede, incluso, irrogar daños, a su área de especialización, distorsionar la marca de las instituciones, proyectar una imagen muy negativa de éstas que puede resultar de difícil reparación, originar coste económico derivado de la desviación o dilapidación de recursos, o quebrar la confianza de la sociedad en la ciencia y en los científicos. La resonancia de las malas prácticas en el ámbito de la investigación biomédica puede ser tan extraordinaria, y la confusión generada de tan inusitada propagación, que se llegue a crear alarma social. Asimismo, pueden crearse falsas expectativas o se puede hacer concebir la existencia de soluciones inmediatas o inexistentes.

ACTUACIONES PARA EL FOMENTO Y PROMOCIÓN DE LA INTEGRIDAD CIENTÍFICA

El fomento de los principios y valores intrínsecos a la integridad científica debe suponer un reto para instituciones de producción y difusión de conocimiento científico, entidades financiadoras, editores, comités de ética, políticas científicas, etc.

La implicación de las instituciones debiera ser cada vez mayor, y la actitud que adopten en el impulso de la conducta responsable en investigación debe ser proactiva y no meramente reactiva, diseñando e implementando políticas claras de integridad científica que incluyan la redacción o adopción de códigos de buenas prácticas científicas y la programación continua de actividades formativas. Asimismo tendrían que asumir el compromiso de crear entornos adecuados para la investigación, formular pautas y recomendaciones que faciliten la prevención, identificación y

gestión de los conflictos de intereses, y amparar la revelación de prácticas y conductas reprobables ofreciendo respaldo a los denunciantes –*whistleblowers*–.

Los investigadores deben colaborar con sus instituciones de adscripción en la promoción de la investigación ética y responsable. En el ejercicio del liderazgo, se comprometerán a supervisar los planteamientos, procesos y resultados obtenidos por sus tutelados, así como a estimular la independencia de juicio, la comunicación franca y el contraste de pareceres, procurando ambientes de trabajo apacibles, y manteniendo una conducta profesional ejemplarizante y una persistente actitud orientadora y didáctica. En las colaboraciones que sostengan con colegas asumirán las obligaciones y responsabilidades previamente aceptadas, debatirán abierta y transparentemente, e intentarán una solución ágil a cuantos conflictos y desacuerdos surgieran.

Otras posibles acciones para el fomento de la integridad científica, podrían ser las auditorías independientes de los resultados de la investigación y la repetición aleatoria de experimentos. Ambas medidas resultarían casi impracticables habida cuenta de la dificultad de encontrar financiación o investigadores que las llevaran a cabo y, en ocasiones, casi inviables (v. gr. ensayos clínicos).

Son distintas y cada vez más numerosas las iniciativas de carácter transnacional que, trascendiendo fronteras, y desde estructuras heterogéneas, fomentan la conducta responsable en investigación y lideran esfuerzos conducentes a estrechar la colaboración y definir marcos comunes de actuación.

La primera Conferencia Mundial sobre el tema de la integridad científica, organizada por la *European Science Foundation (ESF)* y el *US Department of Health and Human Services Office of Research Integrity (ORI)*, se celebró en Lisboa en el año 2007. Como resultado de la segunda conferencia mundial (Singapur, 2010) se emitió una Declaración sobre Integridad en la Investigación, en la que se determinaron una serie de principios básicos y responsabilidades exigibles en la práctica científica. Fruto de la tercera conferencia (Montreal, 2013) es la Declaración de Montreal que incide en las colaboraciones transfronterizas. La cuarta conferencia mundial (Río de Janeiro, 2015) incidió en los sistemas para promover la investigación responsable.

En el ámbito europeo, la *European Science Foundation* y *ALLEA (All European Academies)* presentaron en 2011, el “*Código Europeo de Conducta para la Integridad en Investigación*”. Otras redes y grupos de expertos como pueden ser *ENRIO –European Network of Research Integrity Offices–*, el *Working Group on Research Integrity* que trabaja en el marco de *Science Europe*, en los que el CSIC es el único miembro español, o el Grupo de Expertos sobre Integridad en la Investigación de la Liga de Universidades de Investigación Europeas (LERU) debaten, reflexionan y estrechan la colaboración para definir normas y procesos de común aceptación.

En el ámbito comunitario europeo, resulta relevante que el Horizonte 2020 sea el primer programa marco cuyo *Grant Agreement* contiene un artículo específico sobre integridad científica –artículo 34–.

A nivel nacional, los países funcionan de distinta manera; en algunos hay oficinas nacionales de integridad en la investigación, *Office for Research Integrity –ORI–* (EE. UU., Noruega, Dinamarca, Austria...), en otros países como Alemania existen figuras como el *ombudsman*, y en el caso de España, si bien la ley 14/2011, de 1 de junio, de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación –artículo 10– ha creado el Comité Español de Ética de la Investigación, no se tiene constancia, hasta la fecha, de su funcionamiento efectivo.

En este contexto puede resultar muy ilustrativa y aclaratoria la lectura del artículo de título “*Guidance on research integrity: no union in Europe*”, aparecido en *Lancet*,^[15] en el que se pone de manifiesto que no existe homogeneidad en la Unión Europea a la hora de estructurar los mecanismos para abordar el problema.

CÓDIGOS DE BUENAS PRÁCTICAS

Las instituciones no pueden ser tolerantes con la falta de integridad o la mala conducta en investigación, deben enfrentar el problema para evitar consecuencias indeseables, adoptar las oportunas medidas conducentes a su erradicación.

En el marco de las políticas de integridad de las instituciones, un instrumento extremadamente útil para la orientación de la buena praxis en investigación son los códigos de buenas prácticas científicas. Estos códigos son un conjunto de principios, declaraciones, pautas y compromisos sistemáticamente recopilados que regulan la práctica de la investigación imponiendo responsabilidades a investigadores e instituciones.

Los códigos de buenas prácticas científicas trascienden el ámbito de la legalidad, pero no la sustituyen. Pueden cubrir aspectos no regulados o, eventualmente, desarrollar disposiciones legales o reglamentarias pero, en todo caso, tienen carácter complementario.

Otra diferencia sustancial respecto a los códigos legales es que los códigos de buenas prácticas científicas no siempre tienen carácter imperativo, los criterios y reglas de comportamiento que en ellos se recogen pueden resultar exigibles y de obligado cumplimiento, o estar formulados como meras recomendaciones, a modo de guía.

Si bien todos los códigos de buenas prácticas científicas amparan y defienden la integridad científica, no existe un único paradigma. Por otra parte, estos códigos deben ser instrumentos vivos que, en función de la experiencia acumulada, se corrijan o actualicen.

Los códigos de buenas prácticas científicas son de clara tradición anglosajona y hasta hace relativamente poco tiempo eran escasos los organismos públicos de investigación o universidades españolas que, en un ejercicio de autorregulación y organización, habían elaborado o adoptado este tipo de códigos.

A modo de ejemplo basten unas pinceladas del contenido del Código de Buenas Prácticas Científicas del CSIC,^[16] que junto con el del PRBB (Parc Recerca Biomèdica Barcelona) fue uno de los pioneros en España de entre los de su categoría. Los cuatro grandes títulos del documento están

referidos a los principios de la actividad investigadora, el investigador como profesional de la ciencia, las publicaciones científicas y demás difusión oral y escrita de resultados y el entorno institucional. En definitiva, se pauta el ejercicio de la actividad científica desde su concepción y planificación hasta la gestión de medios y recursos, se orienta el ejercicio del liderazgo, las colaboraciones científicas, el proceso de creación –autoría–, protección, difusión y evaluación de resultados, y se imponen responsabilidades a la Institución.

CONCLUSIONES

Todos los agentes implicados en los sistemas de investigación y desarrollo deben apostar firme y decididamente por una práctica científica íntegra y responsable que garantice una ciencia de calidad. Al ser la investigación una actividad necesariamente cooperativa y transnacional resulta esencial consensuar el establecimiento de normas y la definición de procedimientos de alcance global. Iniciativas como la recientemente sugerida en *Nature*^[17] que aboga por el afianzamiento de unas buenas prácticas institucionales –*Good Institutional Practices*– de común y universal aceptación, análogas a las ya consolidadas *Good Laboratory Practices*, caminan en la dirección adecuada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *EuCheMs Newsletter*, september 2015.
- [2] H. Schwarz, *Humboldt Kosmos*, 2015, 104, 2a. p.17 y 2b. p. 23.
- [3] F. Service, *Science*, 2003, 299, 31.
- [4] R. Cicerone, Presidential Address, april 2015, *Annual Meeting US National Academy of Sciences*.
- [5] N. H. Steneck, *EMBO reports*, 2011, 12, 745.
- [6] Singapore Statement on Research Integrity (2011) 2nd World Congress on Research Integrity.
<http://www.singaporestatement.org/statement.html>
- Montreal Statement on Research Integrity in Cross-Boundary Research Collaborations (2013) 3rd World Congress on Research Integrity.
<http://www.researchintegrity.org/Statements/Montreal%20Statement%20English.pdf>
- European Charter for Researchers. European Commission
<http://ec.europa.eu/euraxess/index.cfm/rights/european-Charter>
- European Code of Conduct for Research Integrity. European Science Foundation/All European Academies (2011).
http://www.esf.org/fileadmin/Public_documents/Publications/Code_Conduct_ResearchIntegrity.pdf
- OECD (2008) Best Practices for Ensuring Scientific Integrity and Preventing Misconduct.
<http://www.oecd.org/sti/sci-tech/40188303.pdf>
- Statement of Principles for Research Integrity. Global Research Council.
http://www.globalresearchcouncil.org/sites/default/files/pdfs/grc_statement_principles_research_integrity%20FINAL.pdf
- [7] D. Fannelli, *PLoS One*, 2009, 4, e5738.
- [8] B. C. Martinson, M.S. Anderson, R. De Vries, *Nature*, 2005, 435, 737-738.
- [9] S. L. Titus, J. A. Wells, L. J. Rhoades, *Nature*, 2008, 453, 980-982.
- [10] F. C. Fang, J. W. Bennett, A. Casadevall, *MBio*, 2013, 4, e00640-12.
- [11] G. H. Lushington, R. Chaguturu, *Drug Discovery World*, 2015, Part 1 (spring edition 79-90), Part 2 (summer edition 70-82).
- [12] F. C. Fang, R. G. Steen, A. Casadevall, *PNAS*, 2012, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1212247109>; Z. Corbyn, *Nature*, 2012, 490, 21.
- [13] D. Fannelli, *PLoS Medicine*, 2013, 10, e1001563.
- [14] <http://am.ascb.org/dora>
- [15] S. Goderchale, B. Nemery, K. Dierickx, *The Lancet*, 2013, 381, 1097-1098.
- [16] Código de Buenas Prácticas científicas.
<http://www.csic.es/etica-en-la-investigacion>
- [17] C. G. Begley, A. M. Buchanan, U. Dirnagl, *Nature*, 2015, 525, 25-27.



La Química Analítica en la química española

Miguel Valcárcel

INTRODUCCIÓN

Nadie es poseedor de la verdad absoluta. Los que se la atribuyen están absolutamente equivocados. Generalmente excluyen los que no son de su “casta” con argumentos poco fundamentados, con extrapolaciones superficiales y erróneas, lejos de la realidad y típicos de los prepotentes. No son capaces de la más mínima autocrítica, se creen modelos a seguir y no son capaces de reconocer un elefante a tres metros. Estas personas también existen en el contexto de la Ciencia y Tecnología, como en otros muchos. Una tarea primordial es desarticular a los mismos con argumentos objetivos y bien fundamentados. Este es el principal motivo que me ha lanzado a escribir este artículo por la amable invitación del editor de *Anales de Química* sobre el papel de la Química Analítica en el ámbito de la Química, obviamente huyendo de planteamientos tanto defensivos como ofensivos, con un enfoque alejado de la posesión de la verdad. Es una apuesta sólida, objetiva y basada en realidades y no en situaciones pasadas, que han sido heredadas lamentablemente hasta la actualidad.

En el ámbito científico, el refrán “nada es verdad o es mentira, todo es según el color del cristal con que se mira” sorprendentemente es una realidad, cuando la objetividad debería ser una característica esencial de un científico. No se entiende que en este contexto existan deformaciones por ignorancia o por interés, pero lamentablemente las hay. Además, la condición humana tiende a la descalificación rápidamente y con poco fundamento, lo que debería estar lejos del ámbito científico. Así se cumple el refrán “no hay peor sordo que el que no quiere oír”.

Pese a su título, en este artículo no se pretende describir la historia y los logros de la Química Analítica española en las últimas y fecundas siete décadas. El enfoque es más profundo, ya que se intenta analizar críticamente el papel de esta disciplina en la química española. Para ello, se comentará la imagen global distorsionada, a veces pobre, de la Química Analítica en España y Europa y los responsables de la misma, lo que permitirá vislumbrar una visión correcta de la disciplina, hoy y mañana. Después se evaluará la si-

tuación real de la Química Analítica tanto en España como en el seno de la Real Sociedad Española de Química, así como las previsiones de futuro.

LA IMAGEN DISTORSIONADA DE LA QUÍMICA ANALÍTICA

La objetividad permite reconocer que la Química Analítica en España y algunos países de Europa es considerada, en algunas ocasiones, como una hermana menor entre las disciplinas de la Química, en claro contraste con países desarrollados como Japón y EE. UU. donde tiene la consideración correcta. Posiblemente el gran error de la Química ha sido la parcelación de sus componentes en compartimientos estancos, lo que es contrario a sus principios básicos.

La imagen distorsionada y, a veces pobre, de la Química Analítica tiene a tres grupos de personas responsables de la misma^[1].

En *primer lugar*, los propios químico-analíticos somos causantes de esta imagen debido a una amplia serie de razones: *a)* muchos tienen un complejo de inferioridad absolutamente infundado causado, por ejemplo, por la desconsideración de otros colegas químicos (ej. en la confección de planes de estudio, en el reparto de fondos competitivos, etc.); *b)* pocos se involucran y se esfuerzan en el cambio de imagen de la Química Analítica; *c)* la investigación en Química Analítica no ha estado, en general, bien orientada en el pasado, lo que ha propiciado un cierto desprestigio, y *d)* la dejación de funciones a la hora de asimilar en su momento los nuevos instrumentos que han revolucionado a la Química en las últimas décadas del siglo pasado y que otras disciplinas de la Química asimilaron (ej. Espectroscopia de Rayos X por la Química Inorgánica, y Espectrometría de Masas y RMN por la Química Orgánica); y *e)* La enseñanza de la Química Analítica en los estudios de Grado no ha sido, en muchos casos, la adecuada y así los alumnos en Química y otros estudios confunden a la Química Analítica con “equilibrios iónicos”, “cálculos”, “valoraciones”, “gravimetrías”, “balanzas y buretas”, “instrumentos”, etc., mientras que sus principios, sus objetivos y fines son soslayados sistemáticamente por mantener una tradición equivocada pero acomodaticia: la innovación docente profunda que la hagan otros, yo sigo con mis apuntes heredados generación tras generación.

En *segundo lugar*, se encuentran los colegas químicos de otras disciplinas que firmemente no creen que la



M. Valcárcel

Departamento de Química Analítica. Universidad de Córdoba
Campus de Rabanales. 14071 Córdoba (Spain).
C-e: qa1vacam@uco.es

Recibido: 16/11/2015. Aceptado: 10/12/2015.

Química Analítica sea una disciplina clave de la Química, seguramente porque tienen una imagen totalmente equivocada debido a la pobre o errónea educación en nuestra disciplina, tal como se ha comentado en el párrafo anterior. Conseguir que el peso de la Química Analítica en los Planes de Estudio haya tenido una importancia similar a las demás disciplinas de la Química ha sido una lucha de titanes en casi todas las universidades españolas. En los últimos años muchos químicos analíticos se han puesto las pilas y compiten favorablemente para conseguir fondos competitivos nacionales e internacionales, lo que supone un problema, ya que la tarta financiera de la Química debe compartirse y no dar migajas como hace pocos años. Este hecho ha favorecido también, en algunos casos, la animadversión y se han puesto cortafuegos para que los químicos analíticos tengan pocas opciones.

En *tercer lugar*, los responsables de la mala imagen de la Química Analítica son profesionales como médicos, bioquímicos, físicos, ingenieros etc., que minimizan la importancia del papel de los químicos analíticos con el peregrino argumento de que todos los instrumentos y analizadores originan datos de forma cada vez más fácil y asequible y, por tanto, un técnico de laboratorio puede gestionar los equipos y adquirir los datos. No son conscientes de que hay que transformar los datos en información y conocimiento, que hay que asegurar que los resultados corresponden a la realidad y que la investigación analítica es esencial para resolver nuevas demandas informativas. Estas tres labores no están al alcance de un técnico.

LA QUÍMICA ANALÍTICA, HOY Y MAÑANA

La Química Analítica es el tercer componente básico de la Química, además de la Teoría y la Síntesis y, por tanto, diferente al de las Aplicaciones de la misma. Es una disciplina metrológica que tiene a su cargo la generación de la información (bio)química de calidad, que es su principal aspecto diferencial respecto a otras disciplinas de la Química^[2].

Los *pilares esenciales* de la misma, formulados sucintamente, son:

- Las *metas* (alta calidad metrológica y resolución de demandas informativas) y sus *objetivos* mayorizantes (más y mejor información (bio)química) y minorizantes (reducción de material, tiempo, esfuerzos humanos, riesgos en el proceso analítico). La contradicción entre los dos objetivos por una parte y la de las metas por la otra implica la necesaria definición de los *compromisos de calidad* al diseñar los procesos analíticos.
- La información requerida es su nuevo estándar básico, además de los clásicos patrones tangibles y los escritos (ej. normas, guías, métodos oficiales, etc.), ya que es esencial para planificar los procesos analíticos.
- La consistencia entre la Química Analítica y la jerarquía datos primarios-información-conocimiento^[3] es esencial en la disciplina informativa de la Química, ya que corresponden a las señales que generan los instrumentos, a los resultados y a los informes, respectivamente.



Foto 1. El profesor Valcárcel en el laboratorio de investigación del grupo que dirige en la Universidad de Córdoba

- La Química Analítica del presente y futuro tiene que concebirse en el ámbito de la interdisciplinariedad, estableciendo fructíferas interfaces internas con las otras disciplinas de la Química, y externas con otras áreas como Biología, Matemáticas, Física, Ingeniería, etc. La Química del futuro está en las interfases^[4] y la Química Analítica no puede ser ajena a esta tendencia.
- La Química Analítica no sería una disciplina científica independiente si no tuviera un sistema eficiente de I+D propio, que puede tener tanto un objetivo básico de incrementar en general las capacidades de análisis desarrollando herramientas tangibles e intangibles, como práctico, que implica la satisfacción de los requisitos informativos.
- La Química Analítica tiene que romper moldes y dedicarse a la transferencia de conocimientos y tecnologías analíticas^[5] desde los centros de investigación a los productores de herramientas analíticas con fines comerciales, los laboratorios de rutina y en, algunos casos especiales, a los que requieren la información (bio)química.
- La Responsabilidad Social de la Química Analítica^[6] es un pilar esencial de la misma, al igual que en Ciencia y Tecnología^[7,8] y el soporte básico de otros pilares. Se trata de la consideración sistemática del impacto en la sociedad en general y en el de la salud, medio ambiente, agricultura, alimentación, etc. y, en particular, del conocimiento (bio)químico generado por el análisis de objetos o sistemas tanto naturales como artificiales. La connotación interna es la producción fiable y sostenible de la información (bio)química y la externa el aseguramiento de que este conocimiento corresponde a la realidad.
- Una nueva orientación en la enseñanza de la Química Analítica es esencial para abordar su futuro, tal como se ha indicado. La enseñanza de nuestra disciplina debe tener otros ritmos, otros contenidos, eliminando las tradiciones negativas para ser coherente con la realidad y mejorar la imagen de la misma. Así debe empezar, en el primer contacto con los estudiantes, abordando sus principios, peculiaridades, sus metas y objetivos y su rol en el contexto de la Química y en la Ciencia y Tecnología. Este cambio de rumbo docente tipo *bottom-up* se aborda ya en algunos libros de textos publicados en el siglo XXI.^[9,10]

Muy posiblemente a muchos químicos esta aproximación genérica a la Química Analítica les va a sorprender, ya que su idea está basada en paradigmas de la disciplina ya obsoletos cuyo relato no cabría en la extensión razonable de este artículo. Si es necesario resaltar los *cuatro paradigmas generales de una Química Analítica*^[11] en el sitio que le corresponde como disciplina básica de la Química:

1. Su consideración sistemática como disciplina generadora de la información (bio)química, siendo

ésta su principal característica que la hace independiente.

2. Su ubicación en un contexto interdisciplinar dentro y fuera de la Química para ser permeable a los avances científico-técnicos y contribuir a los mismos.
3. Su propio sistema eficiente de investigación y desarrollo, tanto básico y aplicado.
4. La transferencia de conocimiento y tecnología analíticos como actividad ordinaria.

De los mismos se derivan paradigmas específicos^[11], muchos de ellos ya indicados a lo largo de este artículo.

LA QUÍMICA ANALÍTICA EN LA QUÍMICA ESPAÑOLA

Hay que reconocer que la consideración de la Química Analítica por parte de otros colegas químicos españoles no es buena en general debido a los hechos narrados anteriormente. Es cierto que la Química Analítica en los años sesenta-setenta del pasado siglo no tuvo entre sus responsables, salvo honrosas excepciones, mentes con apuestas a la innovación y dispuestas a enviar posdoctorales al extranjero como tuvieron otras disciplinas de la Química (ej. la Química Orgánica con los eminentes profesores Lora-Tamayo y Pascual Vila en Madrid y Barcelona, respectivamente). Esta deficiencia ha sido un lastre para la Química Analítica española. El que suscribe este artículo envió sus dos primeros trabajos a publicar en el extranjero en el año 1970 pagándose todos los gastos que eran de mucha importancia relativa dada su condición de Ayudante de Clases Prácticas. En mi generación los que salimos al extranjero nos buscamos nuestras becas y ayudas por nuestra cuenta. No nos enseñaron el camino, lo tuvimos que abrir nosotros sin apoyo moral y material. Aquellos pioneros lideran hoy la Química Analítica en España y por supuesto apuestan sistemáticamente por la innovación y la internacionalización.

Pero actualmente se extrapola automáticamente del pasado al presente de forma equivocada, sin mucho fundamento, sin considerar el esfuerzo ímprobo de muchos químico-analíticos españoles en las últimas décadas. No se tiene en cuenta el crecimiento científico exponencial de la Química Analítica española y su contribución, mucho más relevante de lo que se pueda creer, en la evolución positiva de la química española, sea cual sea el indicador bibliométrico que se utilice.

Es curioso indicar que, más allá de nuestras fronteras, las aportaciones de la Química Analítica española han sido calificadas de espectaculares y han despertado admiración.

En un reciente congreso internacional (Euroanalysis XVIII, Bordeaux, 6-10/09/2015), se reconoció explícitamente el liderazgo de España en muchas líneas de investigación de la Química Analítica. Pero claro, la carga negativa del pasado vuelve "ciegos o tuertos" a nuestros colegas que no le dan el sitio que le corresponde a nuestra disciplina en el contexto español, por conveniencia o por ignorancia. En este año 2015, M. Whitesides (Universidad de Harvard, EE. UU.) en el interesante artículo sobre

“Reinventing Chemistry”, publicado en la revista *Angewandte Chemie*^[11] ha reconocido explícitamente tanto la importancia de la información (bio)química como que “Analytical Chemistry is a more important area than it may seem”. Menciona también que F. J. Dyson en *Science*^[12] y en otras publicaciones “[...] has argued convincingly that one of the most important steps in opening new areas of science is developing new analytical techniques that make possible relevant measurements [...]”. No es esa precisamente la imagen que se tiene de la Química Analítica en España. En los centros de “élite” se trabaja mucho en nanosensores sin que ni en sus publicaciones ni en la divulgación científica se mencione para nada a la Química Analítica, cuya aportación a los mismos es imprescindible, pues generan información (bio)química de la que debe asegurarse su calidad. Puede ser que sólo interese la publicación.

En el casi medio siglo de mi vida académica y científica me he dedicado denodadamente a que la Química Analítica supere esta energía de activación pleiteando con todos tanto a nivel nacional como europeo. Recuerdo con angustia la eliminación como independiente de nuestra disciplina en la primera lista provisional de las “Áreas de Conocimiento” hace más de 30 años y como Alfredo Pérez Rubalcaba nos salvó “in extremis” en una reunión en el Ministerio de Educación con los profesores Siro

Arribas, Jesús Hernández y el que suscribe este artículo. Este hecho fue clave en nuestro desarrollo posterior. Así pues, un químico orgánico nos salvó del K.O. técnico. Las nuevas generaciones de químicos analíticos ni siquiera conocen este trascendental hecho que ha tenido repercusiones muy positivas para nosotros (¡Gracias Alfredo!).

Comparativamente, los contratos Ramón y Cajal y Juan de la Cierva son muy deficitarios para los candidatos químico-analíticos al utilizarse un baremo que nada les favorece aunque tengan CVs de excelencia. Es necesario cambiar el sistema de evaluación existente para potenciar la igualdad de oportunidades entre los candidatos de todas las disciplinas de la Química (incluidas la Química Analítica y la Química Física) así como entre las Universidades y los Centros “de elite” recién creados. ¿Por qué no se utiliza la normalización por deciles en los listados del JCR (ISI), que es más discriminatoria y justa que la de los cuartiles? Otras disciplinas y las universidades también existen como dicen los habitantes de la hermosa ciudad de Teruel. Además hay que tener en cuenta las ingenierías curriculares que logran que un candidato tenga 8-12 JACs con sólo 2-4 años postdoctorales en artículos con muchísimos autores, como he visto reiteradamente cuando era evaluador primero y responsable después de la evaluación de los contratos Ramón y Cajal. Llevo muchos años evaluando, y cada vez



Foto 2. Componentes del grupo de investigación del profesor Valcárcel con motivo de su investidura como Doctor Honoris Causa por la Universidad de Valencia en marzo de 2011

estoy más convencido que los aspectos cualitativos son muy relevantes. La evaluación puramente numérica (número de artículos, índices de impacto, índice Hirsh, etc.), no es, ni mucho menos, lo único en un enfoque correcto e integral del *peer review*. Este es el enfoque de las evaluaciones científicas en países avanzados.

LA QUÍMICA ANALÍTICA EN EL SENO DE LA RSEQ

La consideración de la Química Analítica en la Real Sociedad Española de Química es un fiel reflejo de su situación en la química española y por tanto manifiestamente mejorable. Los socios químico-analíticos de la RSEQ estamos atónitos de cómo se nos trata. Pongamos dos ejemplos. En el amplio listado de Grupos especializados de la RSEQ es desolador comprobar que no se encuentra ni la Química Analítica ni la Química Física (aunque sí muchas ramas específicas de la misma), pero sí la Química Orgánica y la Química Inorgánica que además tienen varios Grupos especializados afines. Además, existe también un grupo de Ingeniería Química. Desde hace 29 años no se concede la Medalla de la RSEQ a un químico analítico; el porcentaje de químicos analíticos que han recibido la Medalla es inferior al 6% de las concedidas desde los años cincuenta. El autor de este artículo ha renunciado a ser propuesto de nuevo por dignidad, después de dos estrepitosos fracasos. Que nadie interprete que este comentario es una solicitud de reconsideración. Afortunadamente, en otros contextos (ej. Premio Nacional de Química y Real Academia de Ciencias) no interviene la RSEQ.

En los años 80, el profesor Pérez-Bustamante intentó en la Junta Directiva de la RSEQ tanto que éste apoyara la celebración en España del evento internacional "Euroanalysis V", como que se creara el Grupo Especializado de Química Analítica. De manera incomprensible y lamentable estas solicitudes no fueron atendidas^[13]. Esto espoleó a los químicos analíticos a crear la Sociedad Española de Química Analítica en la misma década, que en estos años ha desarrollado una gran labor ampliamente reconocida en Europa. No cabe duda que ahora es una dificultad añadida que exige un mayor esfuerzo para que la Química Analítica tenga el sitio que le corresponde en la RSEQ. Es obvia la necesidad de una reflexión profunda que lleve a la cooperación leal y real, sin paternalismos ni desde posiciones descalificadoras enmascaradas.

Es importante hacer constar que las "Analytical Divisions" de Sociedades Químicas de países avanzados como la ACS (EE. UU.), RSC (UK), GDCh (Alemania) y la Asociación Europea EuCheMS tienen gran prestigio y un peso específico muy relevante en el seno de estas Sociedades. En España no es así ya que somos los más avanzados del mundo y los que poseemos la verdad absoluta de la Química.

Tengo una antigüedad de casi 40 años en la RSEQ y si no he causado baja como socio ha sido por la esperanza (lamentablemente vana) de lograr que una o dos áreas de la Química no sean dueñas casi exclusivas de la Sociedad (no me atrevo ni a decir *nuestra* Sociedad). Me jubilo el

próximo año y creo que será difícil que áreas como la Química Física y la Química Analítica tengan una consideración y oportunidades semejantes a la Química Orgánica e Inorgánica en el seno de la RSEQ. Poner pantallas para desorientar no engaña más que a los que se dejan engañar o no les importa el rumbo de la RSEQ.

Recientemente los que no somos químicos orgánicos hemos recibido un aldabonazo de mi amigo Prof. José Font al publicar en Anales un artículo sobre la "Química en España", ya que solo contiene referencias a la Química Orgánica, lo que es fiel reflejo de lo que piensan muchos socios^[14]. En el mismo número de Anales^[15] mi amigo y compañero de la Academia de Ciencias, Prof. José Elguero, vuelve a descalificar duramente a la Química Analítica reproduciendo su intervención en un simposio en la UIMP de Santander en 1985, sin reconocer los espectaculares avances de la Química Analítica en estas últimas tres décadas.

CONSIDERACION FINAL

Se ha pretendido dar argumentos objetivos y referencias recientes de prestigiosas revistas científicas^[11,12] para que la Química Analítica tenga la consideración que le corresponde en el seno de la química española. Ello supone un cambio de actitud de muchos químicos españoles, lo que es difícil de lograr con un solo artículo. El autor ha fracasado en esta tarea durante décadas. Espera que la situación cambie en un futuro no muy lejano y se logre la igualdad de oportunidades entre todas las disciplinas de la Química en España, empezando en la RSEQ.

DEDICATORIA

A aquellos químicos analíticos españoles que han contribuido a que la Química Analítica en España tenga un alto nivel, no reconocido internamente pero sí externamente.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Miguel Á. Sierra, editor de *Anales de Química*, que ha tenido la deferencia de invitar a un químico analítico a expresar su opinión en esta nueva sección sobre la Química vista por sus protagonistas, después de haber participado en la misma varios eminentes químicos orgánicos españoles.

A la señora Patricia Yáñez-Sedeño por su inestimable ayuda en la confección de este artículo.

NOTA DEL AUTOR

Las opiniones vertidas en este artículo son de exclusiva responsabilidad del autor del mismo, que no representa a nada ni a nadie. Los comentarios al contenido del mismo serán bienvenidos (qalvacam@uco.es)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Valcárcel. "Quo Vadis, Analytical Chemistry?". *Anal. Bioanal. Chem.*, **2015**, DOI: 10.1007/s00216-015-9148-6.
- [2] M. Valcárcel. "La Química Analítica, hoy y mañana". *Servicio de Publicaciones. Universitat de Valencia*, **2011**.
- [3] M. Valcárcel, B. M. Simonet. "Types of analytical information and their mutual relationships". *Trends Anal. Chem.*, **2008**, *19*, 593-598.
- [4] S. Matlin, G. Mehta, H. Hopf. "Chemistry embraced by all". *Science*, **2015**, *347*, 1179-1180.
- [5] M. Valcárcel, B.M. Simonet, S. Cárdenas. "Bridging the gap between analytical R&D products and their use in practice". *Analyst*, **2007**, *132*, 97-100.
- [6] M. Valcárcel, R. Lucena. "Social Responsibility in Analytical Chemistry". *Trends Anal. Chem.*, **2013**, *31*, 1-7.
- [7] M. Valcárcel, R. Lucena. "La Responsabilidad Social en la Ciencia y Tecnología". *An. Quim.*, **2012**, *108*, 156-159.
- [8] P. Krogsgaard-Larsen, P. Thstrup, F. Besenbacher. "Scientific Social Responsibility: A call to arms". *Ang. Chem. Int.*, **2011**, *50*, 2-4.
- [9] M. Valcárcel. "Principles of Analytical Chemistry". *Springer-Verlag*, Berlín, **2000**.
- [10] R. Kellner, J. M. Mermet, M. Otto, M. Valcárcel, H. M. Widmer. "Analytical Chemistry" (2nd edition). *Wiley-VCH* (Weinheim), **2004**.
- [11] G. M. Whitesides. "Reinventing Chemistry". *Ang. Chem. Int.*, **2015**, *54*, 3196-3209.
- [12] F. J. Dyson. "Is Science mostly driven by ideas or by tools?". *Science*, **2012**, *338*, 1426-1427.
- [13] Actas de la Junta Directiva de la RSEQ, **1982**, nº 2 y 4.
- [14] J. Font-Cierco. "Química 1950-2000". *An. Quim.*, **2015**, *111*, 21-24.
- [15] J. Elguero. "La química española vista por sus protagonistas". *An. Quim.*, **2015**, *111*, 25-28.



Cien años de armas químicas

Manuela Martín, Gabriel Pinto, José María Hernández, María Teresa Martín

Resumen: Teniendo en cuenta que el año 2015 se conmemora el centenario de la utilización de las armas químicas nos ha parecido interesante que en *Anales de Química* apareciera un resumen de lo que han supuesto estos cien años de empleo de dichas armas. Explicamos cómo se fueron utilizando los distintos gases en la Primera Guerra Mundial y cómo durante el espacio entre las dos guerras mundiales se descubrieron gases más mortíferos que se han seguido utilizando hasta nuestros días. En 1997 se constituyó la OPCW, "Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons", que ha permitido llegar a acuerdos de la destrucción de las armas químicas almacenadas por distintos países. Dichos acuerdos, sin respetar la fecha límite de 2012, se están cumpliendo en un alto porcentaje. No obstante, la destrucción en la mayoría de los casos no es fácil, pues se debe evitar la formación de residuos también tóxicos.

Palabras clave: Gases de Guerra, Historia de la Química, Enseñanza de la Química, Insecticidas organofosforados, Desastres con productos químicos, OPCW.

Abstract: Taking into account the fact that the year 2015 marks the anniversary of the use of chemical weapons, we have considered interesting that *Anales de Química* would include a summary addressing the implications of the use of this type of chemical weapons throughout these hundred years. We explain how the various gases were used in the First World War, and how other more lethal gases were discovered, over the space of time between the two World Wars, which have continued being used up to today. We point out how the "Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons", OPCW, was established in 1997 and how it has allowed to reach agreements for destruction of chemical weapons stored by different countries. Such agreements, without respecting the deadline of 2012, are being achieved in a high percentage. However, the destruction in most cases is not easy, therefore should also prevent the formation of toxic waste.

Keywords: Gases for War, History of Chemistry, Chemical Education, Organophosphate insecticides, Disasters by chemicals, OPCW.

INTRODUCCIÓN

En el año 2015 se ha cumplido el centenario de la utilización de las armas químicas a gran escala. Fue en 1915, durante la segunda batalla de Ypres (Bélgica) en la Primera Guerra Mundial, cuando se usó cloro en un enfrentamiento entre fuerzas del Imperio Alemán contra tropas francesas coloniales e inglesas.

Las armas químicas han producido en estos cien años millares de muertos y heridos.

Revisando en la bibliografía el alcance que ha tenido la conmemoración del centenario hemos encontrado un amplio reportaje en el número de *Chemical and Engineering News* del 23 de febrero de 2015^[1] y dos vídeos: uno de la

American Chemical Society, de la serie Historia^[2] y otro de *Periodic Videos* del famoso Sir Martyn Poliakoff.^[3] También cabe destacar la conmemoración en Argentina de un acto (22 de abril de 2015) y de varios talleres titulados "Química para la paz" en distintos centros.^[4] En internet aparece un documento titulado *Haber Teacher's resources* dirigido a estudiantes de los grados 9-12 y publicado como complemento a los vídeos de Chrétien Schouteten.^[5]

Nuestro trabajo es un resumen de los hechos más significativos de estos cien años.

LAS ARMAS QUÍMICAS EN LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL (1914-1918)

Alemania en 1914, según A. Gibson,^[6] estaba planteándose si era lógico que siguiera en la contienda, porque los británicos le habían cortado la posibilidad de importar nitratos desde Chile para obtener explosivos, sus reservas eran limitadas, aunque la situación era ligeramente mejor gracias a que pocos años antes, Fritz Haber (1868-1934) (véase Figura 1), que sería Premio Nobel de Química en 1918, había conseguido fijar el nitrógeno de la atmósfera para obtener nitratos. El propio Haber, en una conferencia que impartió a oficiales en 1920 y que recogió traducida al inglés, unos años después, el *Journal of Chemical Education*, hace todo un alegato de cómo era la situación sobre las reservas de nitratos, por lo que era necesario buscar otra solución para tener una superioridad en las batallas.^[7]

En 1915 los alemanes, ante la falta de reservas de productos básicos como los nitratos, pensaron que los químicos podían ser la solución y recurrieron a Haber, que les recomendó utilizar bromo-m-xileno, en enero de 1915, cerca de



M. Martín¹

G. Pinto^{1,2}

J. M. Hernández^{1,3}

M. T. Martín¹

¹ Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química, Reales Sociedades Españolas de Química y de Física, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

² E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 28006 Madrid.

³ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca. C-e: mmartins@edu.ucm.es

Recibido: 10/09/2015. Aceptado: 10/12/2015.



Figura 1. Fritz Haber

Bolimów (Polonia) que no tuvo éxito porque, en esa fecha y en esa zona, las temperaturas eran muy bajas y no llegó a evaporarse. La siguiente recomendación fue utilizar cloro. Así se procedió a las cuatro de la tarde el 22 de abril de 1915, en Ypres. De esta forma murieron miles de soldados de distintas nacionalidades (véase Figura 2). No tuvieron en cuenta que habían firmado la Convención de la Haya el 4 de septiembre de 1889^[8] en la que se comprometían a no utilizar este tipo de recursos porque eran inhumanos y contrarios a las leyes de la civilización y lo único que hicieron como prohibía el uso de proyectiles de gas fue utilizar bombonas de gas.

Aunque la utilización supuso una victoria de los alemanes, como los militares no creían que aquello llegara a ser efectivo, no habían movilizado tropas suficientes para mantener la supremacía y cuando quisieron reaccionar el enemigo ya se había provisto de este tipo de armas y habían recuperado su posición.

A partir de ese momento, Haber se implicó en todo lo referente a la guerra química y también participó en el desarrollo de las máscaras antigás con filtros apropiados. Reclutó a otros físicos y químicos, que pertenecieron a las llamadas “Tropas de gas” entre 1914 y 1915, como James Franck (1882-1964) y Gustav Hertz (1887-1975), galardonados con el Nobel de Física en 1925; y Otto Hahn (1979-1968), que sería Premio Nobel de Química en 1944.

F. Haber estaba orgulloso de su colaboración en la guerra aunque le trajo muchos problemas familiares. Entre otros, el suicidio de su mujer (Clara Immerwahr) cuando se dio cuenta de la horrible tragedia que estaba suponiendo la guerra. Él mismo, de ascendencia judía (aunque estaba exento de las leyes antisemitas por haber colaborado en la Primera Guerra Mundial), abandonó Alemania, cuando Hitler llegó al poder, y falleció en Suiza. Por otra parte, Hitler, que se había opuesto a la utilización de los gases de guerra en la Segunda Guerra Mundial porque los había sufrido en



Figura 2. La segunda batalla de Ypres pintada por Richard Jacks y vista actual del cementerio donde yacen muchos de los soldados caídos allí

sus propias carnes en la Primera, no tuvo ningún problema en utilizarlos en los campos de concentración.

F. Haber en una discusión con Victor Grignard sobre la paz y la guerra, le dijo: “Durante la paz un científico pertenece al mundo pero durante la guerra pertenece a su país”.

Después de Ypres los ingleses no tardaron en provisionarse de este tipo de armas y el 25 de septiembre las utilizaron en Loos (Artois, norte de Francia) aunque parece que con dudoso éxito.

En 1916 la armada británica abrió en Porton Down una estación experimental para estudiar y buscar armas químicas, fundamentalmente cloro, fosgeno (dicloruro de carbonilo) y gas mostaza [bis (2-cloroetil) sulfano]. Allí también se fabricó un casco antigás.

La utilización de gases como el fosgeno supuso una nueva complicación porque sus efectos no se notaban de forma inmediata y tenían que pasar varias horas desde que se sufría el ataque, lo que hacía que fuera después muy difícil localizar dónde estaba situado el foco.

Francia e Inglaterra buscaron nuevos gases que impidieran la absorción de oxígeno en la sangre que no tuvieron demasiado efecto en la batalla.

El gas mostaza, mucho más devastador, fue obtenido en 1822 por César-Mansuète Despretz (1798-1863), y utilizado por los alemanes el 12 y 13 de julio de 1917 en Ypres, que produjo muchas bajas en las tropas británicas. Aunque no es correcto llamarlo gas, pues se trata de un líquido que en contacto con la piel produce ampollas, des-

pués de un período de latencia de 24 horas o más, que aparecen, sobre todo, en las zonas donde se acumula el sudor: pliegues de la piel, axilas, genitales, etc. Es muy destructivo, ataca todo el organismo y no existe un antídoto. Como el período de latencia es muy grande, pasa mucho tiempo hasta que la persona atacada es consciente de ello para poner remedio.

Las tropas de Estados Unidos tardaron en producir armas químicas y las utilizaron por primera vez, en apoyo de la Armada Británica, el 13 de octubre de 1918. Uno de los heridos en esa batalla fue Hitler que como ya hemos indicado durante toda su vida odió el uso de las armas químicas en el campo de batalla.

LAS ARMAS QUÍMICAS A PARTIR DE 1919

Varios tratados se firmaron después de la Primera Guerra Mundial para impedir el desarrollo y uso de armas químicas: en 1919 en Versalles, en 1921 y 1922 en Washington, en 1925 en Ginebra, etc. Sin embargo, sobre todo los alemanes siguieron trabajando en la busca de nuevos productos.

Entre 1919 y 1923 Haber continuó trabajando en el desarrollo de armas químicas (véase Figura 3) junto con el químico alemán Hugo Gustav Adolf Stoltzenberg (1883-1974). Este último firmó un convenio con el Gobierno de España para montar una planta de armas químicas en La Marañosa (localidad próxima a Madrid, junto al Jarama) con la participación de Alemania y la Unión Soviética que, entre otros, incluía fosgeno y gas mostaza. Estos gases se utilizaron entre 1923 y 1927 en Marruecos, en la Guerra del Rif, también llamada la Segunda Guerra de Marruecos o, simplemente, la Guerra de África. Stoltzenberg se hizo ciudadano español y pasó a ser el ingeniero jefe de la planta.

A este tipo de gases se conocen como armas de destrucción masiva, normalmente denotados por las siglas WMD (*Weapons of Mass Destruction*), nombre propuesto por Cosmo Gordon Lang, Arzobispo de Canterbury, en un artículo que apareció en la revista *Times* el 28 de diciembre de 1937.^[9]



Figura 3. Haber junto a las bombonas con los gases

Entre los años 1920 y 1930 el desarrollo de nuevos productos químicos altamente tóxicos como insecticidas supuso una nueva fuente de armas de guerra de todo tipo. A esto contribuyó de una manera importante Gerhard Schrader (1903-1990), químico alemán, que tenía la esperanza de luchar con el hambre en el mundo mediante el descubrimiento de nuevos insecticidas más “tóxicos” y de forma completamente accidental descubrió agentes nerviosos como el sarín y tabún (Agente GA) que son derivados organofosforados mucho más potentes. De esta forma obtuvo en la ciudad de Leverkusen (Alemania) lo que se llamó Le-100 que era tan tóxico que no se podía utilizar como insecticida. Él mismo se intoxicó con estos compuestos y siguiendo una orden que tenía del Gobierno lo pasó al Departamento de Guerra, donde comprobaron que era adecuado como gas de guerra, lo denominaron tabún (etil N,N- dimetilfosforamidocianato), y comenzaron su producción a nivel industrial.

Schrader volvió a Leverkusen y buscó nuevos productos utilizando flúor, llegando al conocido sarín (agente GB) $[(CH_3)_2CHO] CH_2P(O)F$. Nombre que procede de los científicos más relacionados en la obtención: Schrader, Ambros, Rüdiger y van der Linde.

Richard Kuhn (químico austriaco, 1900-1967, Premio Nobel de Química 1938), también de forma completamente inesperada y lo que como en el caso anterior conoceríamos como serendipia, descubrió en 1944 el somán o agente GD (metilfosfonofluoridato de o- pinacolilo), mientras trabajaba para el ejército alemán sobre la farmacología del tabún y del sarín (véase Figura 4).^[11-12]

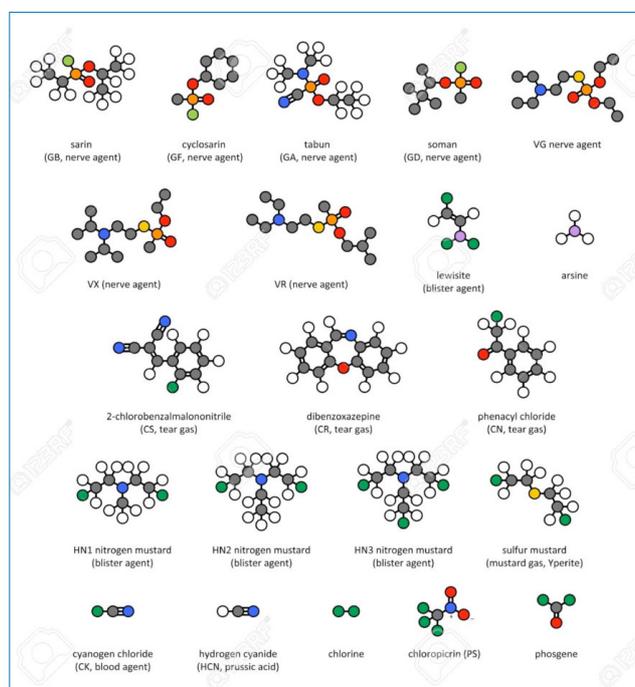


Figura 4. Estructuras de algunas sustancias empleadas como armas químicas. <http://es.123rf.com/clipart-vectorizado/cloro.html?mediapopup=19374801> http://es.123rf.com/profile_molekuul

En Alemania se siguió trabajando en este tipo de sustancias durante la Segunda Guerra Mundial para intentar mantener la supremacía sobre los aliados. Aunque estos también buscaron nuevos gases nunca llegaron a la potencia del sarín y el tabún hasta que en 1944 los británicos localizaron en los terrenos conquistados almacenes con municiones fabricadas en Alemania.

De hecho, la utilización de estos gases en la Segunda Guerra en el campo de batalla se produjo solo en casos puntuales y casi siempre fuera de Europa, como la utilización del gas mostaza en 1937 por los japoneses en la invasión de Manchuria. El único caso de utilización en Europa fue en 1942 en Alemania, que reconoció que en 1939 había lanzado algunas bombas de gas mostaza sobre Varsovia por error.

Los nazis utilizaron este tipo de armas para matar a los judíos en los campos de concentración. Especialmente el zyklon-B derivado de cianuro que se utilizó en Auschwitz, en verano de 1941 contra miembros de la familia de Haber.

Cuando los rusos ocuparon Alemania Oriental se encontraron enormes almacenes de armas químicas así como dos plantas dedicadas a la producción de tabún que desmontaron y se llevaron a Rusia. Estados Unidos y Gran Bretaña ocuparon las fábricas de sarín descubiertas en Leipzig y Hamburgo.

En 1949 Estados Unidos y Gran Bretaña obtuvieron el ciclosarín o agente GF (metilfosfonofluoridato de ciclohexilo) que es posible que lo descubrieran los alemanes durante la Segunda Guerra y que no siguieron fabricando porque resultaba muy caro.

A partir de 1950 se descubrieron toda la serie de compuestos que se conoce como agentes V (veneno) por su toxicidad, de las cuales el más estudiado es el VX (o- etil-diisopropilamino-etilmetilfosfonotioato).

Varias compañías y científicos ingleses buscando insecticidas descubrieron al principio de los años cincuenta ésteres de 2- aminoetanotioles, organofosforados similares a los anteriores que aunque se llegaron a usar como insecticidas cuando se comprobó su alta toxicidad se pasaron al departamento militar de Porton Down que los incluyó entre los gases de guerra. Entre estos está el que se conoce como amitón.

A pesar de que con frecuencia se han firmado acuerdos de no utilización, por desgracia, este tipo de armas se han seguido utilizando. Como ejemplos podríamos citar la utilización en Egipto en su guerra contra el Yemen, en 1980 y aún mucho más reciente en la Guerra de Iraq (algunas bombas lanzadas por este país contenían gas mostaza y tabún). En agosto de 2013 en Siria se utilizó sarín.^[9-14]

En las tablas que incluimos en la Figura 5, tomadas de la referencia^[15] se recoge un resumen de la composición, los efectos y la utilización de armas químicas.

Robert Jonhston también ha resumido en una tabla la utilización de las armas químicas y biológicas, fechas, lugares, etc.^[16]

S. Jiménez^[17] en su trabajo hace una interesante clasificación de los agresivos químicos utilizados en terrorismo como fumígenos, incapacitantes, vesicantes, lacrimógenos, estornudógenos y eméticos, y afirma que “organismos internacionales cualificados estiman que, en la actualidad, se comercializan muchísimas especies químicas distintas, de

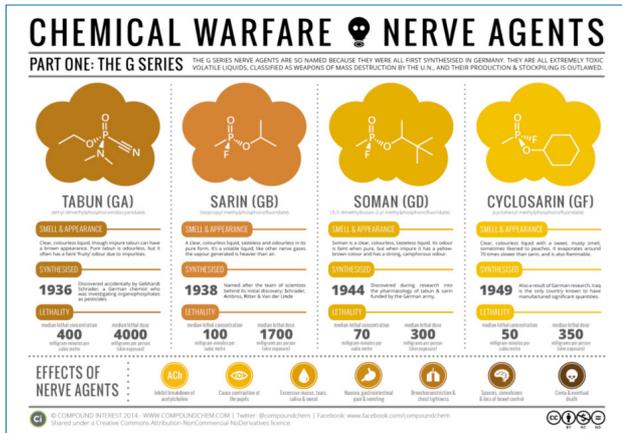
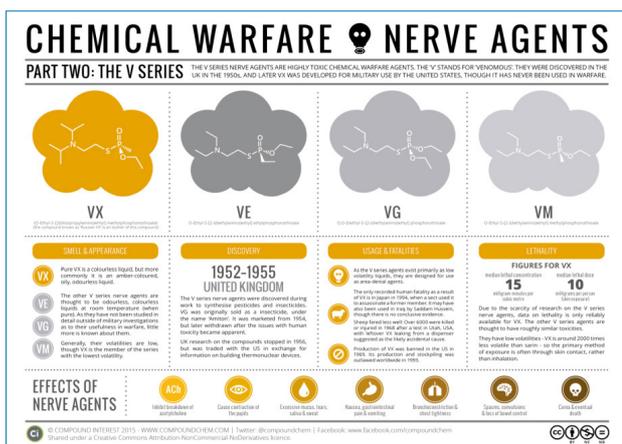


Figura 5. Tablas donde se resumen datos químicos e históricos de algunas de las armas químicas más relevantes^[15] <http://www.compoundchem.com/content-usages-guidelines/> Copyright 2015 Andy Brunning/Compound Interest

las cuales un considerable número se producen en cantidades superiores a una tonelada”.

Evidentemente se trata de una situación preocupante a la que habrá que buscar una solución por la utilización que se puede hacer de ellos en casos de conflictos.

Según Villalonga^[10] los más peligrosos serían los neurotóxicos: tabún, sarín, somán, GF y VX, porque son los más dañinos para el hombre y los que tienen mayores efectos psicológicos. Además tienen otro inconveniente que es más fácil disponer de ellos.

DESTRUCCIÓN DE LAS ARMAS QUÍMICAS

Como ya hemos indicado, a lo largo de la historia y, sobre todo después de las guerras mundiales, se han realizado distintas reuniones con objeto de llegar a un acuerdo de la prohibición del uso de estas armas, creándose organismos que han ido cambiando de nombre y aumentando el número de sus miembros.^[18] En la reunión de 1980 se decidió que la presidencia fuera rotatoria y se llamó Conferencia para el Desarme. En 1992, en el seno de esa conferencia, comenzó a funcionar un comité dedicado a las armas químicas. El 13 de enero de 1993 se firmó en París la Convención, firmando ciento treinta países durante los dos primeros días, poste-

riormente se depositó en la ONU en Nueva York. La primera sesión tuvo lugar en la Haya del 8 al 12 de febrero de 1993. El 29 de abril de 1997, entró en vigencia como OPCW y ciento ochenta días más tarde se estableció la CWC (*Chemical Weapons Convention*) ratificada por sesenta y cinco países.

La CWC es un tratado multilateral que prohíbe las armas químicas y exige su destrucción en un plazo determinado de tiempo. Se decidió que la destrucción de este tipo de armas, que muchos países tenían almacenadas, la mayoría desde el Segunda Guerra Mundial, debía de ser efectiva para 2007 y se acordó que cada cinco años se haría una reunión para vigilar el cumplimiento de estos acuerdos. Posteriormente y dadas las dificultades se prorrogó la fecha límite hasta el 29 de abril de 2012.

Para destruirlas se prohibía quemarlas o lanzarlas al mar. Estados Unidos, Rusia, Libia e Iraq eran incapaces de cumplir este acuerdo por razones de tipo técnico, financiero y político. Estados Unidos declaró 311.000 toneladas y en 2012 ya había destruido el 90%. Rusia declaró 40.000 toneladas y en 2012 había destruido el 60% y se comprometía a terminar en diciembre de 2015.

La destrucción se debe hacer en espacios habilitados con construcciones y contenedores especiales para poderla llevar a cabo: eso ha hecho que en países con posibilidades económicas como Estados Unidos hayan centrado la destrucción en dos lugares concretos Blue Grass (Kentucky) y Pueblo (Colorado). Todas las armas químicas que tenían las han desplazado a uno de esos dos puntos.

También se ha utilizado con este fin un navío colocado en aguas internacionales conocido con el nombre de “Cape Ray” (Figura 6) y posteriormente los efluentes se han destruido en plantas de descontaminación situadas en Alemania, Finlandia y USA.

Rusia ha habilitado espacios en Chapayevsk (región de Samara), Gorny (región de Saratov), Kambarka (Udmurtia), Arys (Kazajistán) y Leonidvka (Penza).

Un nuevo problema surgió cuando en Siria, el 21 de agosto de 2013, se utilizaron armas químicas muriendo más de mil quinientas personas, la mayoría civiles y muchos de ellos niños. La OPCW consiguió con gran esfuerzo y después de múltiples reuniones que Siria se adhiriera a la CWC. La situación de esta nación por seguridad no permitía la destrucción en su territorio y por otra parte no podía pagar los gastos. El acuerdo internacional fue que se realizaría antes del 30 de junio de 2014, en los espacios adecuados de Estados Unidos, Finlandia y Reino Unido, lo que suponía que primero las tenían que llevar al puerto sirio de Lakatia y después debían viajar a lo largo de todo el mar Mediterráneo. Estados Unidos afirmó, en agosto de 2014, que había terminado la destrucción del DF (difloruro del ácido metilfosfónico) procedente de Siria en el buque Cape Ray y los residuos se enviarían a Finlandia y Alemania para que completaran la destrucción^[21] (Figura 6).

Una gran complicación se añade para destruirlas cuando las armas químicas están almacenadas junto con otro tipo de armamento explosivo, en estos casos es necesario el auxilio de “robots” o brazos mecanizados para desactivar los detonadores y retirar los explosivos.

El gas mostaza se puede destruir por hidrólisis y después neutralizar el ácido clorhídrico resultante con una



Figura 6. Navío *Cape Ray* para la destrucción de armas químicas. https://images.vessel-tracker.com/images/foto_popup.html?ship_photo_id=Cape-Ray-1292359

disolución de hidróxido sódico caliente. El residuo es tioglicol o sulfuro de bis (2-hidroxietyl) que es un producto industrial y, por otra parte, los microbios lo convierten en dióxido de carbón, agua y sales. Este ha sido el método empleado por Estados Unidos.

En el Reino Unido se comenzó oxidando con Ag^{2+} , que se obtenía por electrólisis del nitrato de plata en medio de ácido nítrico. El catión Ag^{2+} es un potente oxidante que puede destruir toda la materia orgánica. Es una técnica eficaz pero muy compleja y cara. Se optó por introducir los compuestos en bidones de acero y sumergirlo en ácido nítrico concentrado con lo que se destruiría todo incluido el bidón. Este método también fue necesario abandonarlo porque a veces se producían explosiones y además era necesario reciclar el ácido.

De todas formas, el Reino Unido había destruido la mayor parte de las armas químicas cuando terminó la Segunda Guerra Mundial echándolas al mar, en aquel momento no estaba prohibido, y algunas las enterraron. Con estas han hecho análisis mediante rayos X o con neutrones para comprobar su composición y así poder proceder a la destrucción. El cianuro de bromobencilo lo han destruido por incineración en cámaras especiales y el fosgeno por hidrólisis.

Para efectuar la hidrólisis del VX y del sarín, es necesario utilizar una disolución de hidróxido de sodio caliente, sin embargo los residuos generados siguen siendo peligrosos, motivo por el cual se ha optado por utilizar un proceso de oxidación con agua supercrítica. La tecnología de oxidación en agua supercrítica (u oxidación supercrítica) se basa en las propiedades del agua en condiciones de alta temperatura y presión ($T > 374\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $p > 221\text{ atm}$) mezclada con aire para oxidar por completo compuestos orgánicos a moléculas simples de agua, dióxido de carbono y nitrógeno.

Mientras el agua líquida a temperatura ambiente disuelve bien sustancias iónicas pero no disuelve gases, hidrocarburos o polímeros no polares, el agua supercrítica es capaz de disolver sin problemas compuestos orgánicos, facilitando que se pueda llevar a cabo la reacción de oxidación en fase homogénea.^[19]

Las armas más complicadas de destruir son las que tiene arsénico porque es necesario convertirlo en un compuesto



Figura 7. Un equipo de la ONU recoge muestras en el terreno de un supuesto ataque con armas químicas en Damasco / Foto: Reuters

que se pueda recoger y que no vaya a parar al medio ambiente produciendo otros problemas. La técnica más usada es hacer una hidrólisis en medio básico y de esta forma convertirlo en arsenito que con peróxido de hidrógeno se pasa a arseniato tratándolo posteriormente con cloruro de hierro (III) que lo convierte en arseniato de hierro (III), compuesto insoluble lo mismo en agua fría que en agua caliente, que se introducen en bloques de hormigón.

Rusia ha optado por eliminar los componentes tóxicos mediante un “cóctel” de compuestos y los restos se mezclan con asfalto en bidones sellados y se queman. Los franceses, por su parte, lo han hecho forma automática en una ^[20-25] cámara de detonación.

CONCLUSIONES

El mal uso de la ciencia química ha dado lugar a estos tristes acontecimientos (la preparación y uso de armas químicas). Pero sería necesario contraponer otros muchos aspectos como los medicamentos, insecticidas, herbicidas, conservantes, desinfectantes, y otros, en los cuales la química ha sido la solución a complejos problemas que garantizan una importante mejora de las condiciones de vida.

Como siempre no es la química la culpable realmente; son dilemas éticos y sociológicos, mezclados con los dirigentes políticos, los que hacen que una ciencia sea utilizada de una forma responsable para bien de la humanidad o todo lo contrario que se utilicen los conocimientos como arma destructiva. Confiamos que la sociedad del futuro sea capaz de utilizar los conocimientos para mejorar el nivel de vida y no los utilice para la opresión y la destrucción.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo recibido de la Universidad Politécnica de Madrid a través del proyecto PT14_15-03002. También se agradecen las sugerencias de los evaluadores del trabajo.

REFERENCIAS

- [1] S. Everts, *C&E News*, 23 February, **2015**, 93, 9-21.
- [2] *American Chemical Society*, <http://www.acs.org/content/acs/en/education.html> Serie Historia.
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=YVrmvIDfOac>, Visitada 5/6/15.
- [4] <https://www.mrecic.gov.ar/formacion-de-formadores>, Visitada 5/6/15.
- [5] <http://www.haberfilm.com/PDFs/HABER-TeacherResources.pdf>, Visitada 1/6/15.
- [6] A. Gibson, *J. Chem. Educ.* **1943**, 20(6), 265-270. DOI: 10.1021/ed020p265.
- [7] F. Haber *J. Chem. Educ.*, **1945**, 22(11), 526-529 y 553. DOI: 10.1021/ed022.
- [8] C. F. Wells, *J. Chem. Educ.* **1928**, 5(8), 929 DOI: 10.1021/ed005
- [9] G. de Salazar Serantes, *Cuadernos de Estrategia*, **2011**, nº 153, 207-242.
- [10] L. Villalonga. *Historia de la Guerra Química. Características y Mecanismos de Aplicación en la Guerra y en el Terrorismo*. En M. Domínguez Carmona, Editor, *Agresivos Químicos y Microbiológicos en la Guerra y el Terrorismo*, Monografía XVI. Real Academia Nacional de Farmacia, **2005**. <http://dx.doi.org/ES/monoranf.v0i0.543>.
- [11] J. A Romano, B. J. Lukey, H. Salmen, *Chemical Warfare Agents: Chemistry, Pharmacology, Toxicology and Therapeutics*, CRC Press, Taylor and Francis Group, **2008**.
- [12] M. Domínguez Carmona, M. Domínguez de la Calle. *Los organofosforados*. En M. Domínguez Carmona, Editor, *Agresivos Químicos y Microbiológicos en la Guerra y el Terrorismo*, Monografía XVI. Real Academia Nacional de Farmacia, **2005**. <http://dx.doi.org/ES/monoranf.v0i0.543>.
- [13] R. J. Duchovic, J. A. Vilensky, *J. Chem. Educ.* **2007**, 84(6), 944-948. DOI: 10.1021/ed084p944.
- [14] M. Freemantle, *Chemistry World*, **2015**, 12(9), 56-59.
- [15] Compound Interest www.compoundchem.com Visitada 1/4/15.
- [16] <http://www.johnstonsarchive.net/terrorism/chembioattacks.html>. Visitada 1/4/15.
- [17] S. Jiménez, *Agresivos químicos: fumígenos, incapacitantes, vesicantes, lacrimógenos, estornudógenos y eméticos, gases asfixiantes, en terrorismo* en M. Domínguez Carmona, Editor, *Agresivos químicos y microbiológicos en la guerra y el terrorismo*, Monografía XVI. Real Academia Nacional de Farmacia, **2005**. <http://dx.doi.org/ES/monoranf.v0i0.543>.
- [18] <https://www.opcw.org/documents-reports/>. <https://www.opcw.org/chemical-weapons-convention/genesis-and-historical-development/>. Visitada 28/8/15.
- [19] https://aca-eb.gencat.cat/aca/documents/ca/jornadatecnica003/10_neila.pdf. Visitada 28/8/15.
- [20] National Research Council (U.S.) Committee on Review and Evaluation of the Army Non-Stockpile Chemical Disposal Program, *Evaluation of alternative technologies for disposal of liquid wastes from the explosive destruction system*, National Academy Press, Washington, **2001**.
- [21] N. Notman *Chemistry World*, **2014**, 11 (6), 46-50.
- [22] R. Pita, J. Domingo, *El Mundo*, 22 de abril de 2012.
- [23] <http://www.elmundo.es/internacional/2014/07/03/53b4ae95e2704ec5458b458e.html>. Visitada 19/8/2014.
- [24] T. Westgate, *Chemistry World*, **2006**, 3(9), 43-44.
- [25] N. Notman *Chemistry World*, **2012**, 9 (7), 42-45.

La evolución histórica de la química y su utilidad didáctica

Luis Moreno Martínez

Resumen: La enseñanza de los conceptos, principios y leyes fundamentales de la química desde una perspectiva histórica constituye una potente herramienta para el aprendizaje significativo de dicha ciencia en las aulas de nuestros centros escolares. En este artículo llevaremos a cabo una revisión del papel de la historia en la enseñanza de la química, lo que nos obligará a considerar la evolución de la química desde los comienzos de la humanidad.

Palabras clave: Historia de la química, historia de la ciencia, didáctica de la química, libros de texto.

Abstract: The teaching of the concepts, principles and laws of chemistry from a historical perspective is a powerful tool for learning chemistry at Secondary Education. In this paper, I will review the role of history in the teaching of chemistry. Therefore, I will consider the evolution of chemistry from the beginning of our time.

Keywords: History of chemistry, history of science, chemical education, textbooks.

INTRODUCCIÓN

El estado actual de las ciencias, así como su estructura y modalidades están condicionados por su desarrollo histórico [...]. La química no constituye una excepción a esta regla. De ahí que cuando se desea profundizar en el conocimiento del maravilloso mundo de los conceptos y leyes de esta ciencia, uno de los mejores métodos es el histórico, pues así aprendemos cómo se han desarrollado y formado esas leyes y conceptos que nos han legado los grandes maestros y los trabajadores humildes, a veces anónimos, con sus tanteos y rectificaciones, sus errores y sus aciertos. Sólo así llegaremos a captar la esencia íntima de los conceptos y leyes que se manejan y aplican todos los días.

Este fragmento del prólogo de la obra de R. Lespieau,^[1] *La molécule chimique*, nos permite introducir algunas de las preguntas clave a la hora de analizar la importancia y la utilidad de la historia de la química como herramienta en su enseñanza: ¿Ha de estar presente la historia en la enseñanza de la química? ¿cómo está presente la historia de la química en los libros de texto? ¿quiénes han sido los grandes maestros y trabajadores humildes de la historia

de la química? A estas y otras preguntas trataremos de responder en el presente artículo centrado en la enseñanza de la química en los niveles de Educación Secundaria Obligatoria (ESO)^[2] y Bachillerato.^[3]

LA HISTORIA EN LA ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA

Desde tercer curso de ESO hasta segundo curso de Bachillerato, los contenidos de las distintas materias de química (Física y Química en tercer y cuarto curso de ESO y primer curso de Bachillerato y Química en segundo curso de Bachillerato) hacen alusión directa a la evolución histórica de algunos de los conceptos de la química al menos en cuatro áreas:

- Estructura atómica: evolución histórica de los modelos atómicos desde J. J. Thomson al modelo mecano-cuántico actual.
- Sistema Periódico: evolución histórica de los distintos intentos de clasificación de los elementos químicos.
- Reactividad química: leyes fundamentales de las combinaciones química o la evolución histórica de las teorías ácido-base.
- Química del carbono: fin de la teoría del vitalismo y los comienzos de la química orgánica.

En particular, para la materia de Física y Química en primer curso de Bachillerato en la Comunidad de Madrid^[4] se establece que el alumno debe conocer y comprender los conceptos, leyes, teorías y modelos más importantes de la física y la química, así como las estrategias emplea-



Facultad de Formación de Profesorado y Educación
Universidad Autónoma
28049 Madrid
C-e: luis.morenomartinez@predoc.uam.es

L. Moreno Martínez Recibido: 30/08/2015. Aceptado: 30/09/2015.

das en su construcción a fin de lograr una visión global del desarrollo de estas ramas de la ciencia y su papel social. Sin embargo, a la luz del currículo oficial, vemos que no todos los contenidos de la materia en el área de Química incluyen aspectos históricos. La presencia de algunos episodios de la historia de la química en la enseñanza preuniversitaria y la ausencia de otros da lugar a una contextualización incompleta de esta ciencia al no existir nexos de conexión entre ellos. Esto, unido a las imprecisiones históricas en las que se suelen enmarcar algunos conceptos de la química escolar, puede dar lugar a una visión distorsionada de su evolución histórica. Esta visión descontextualizada de la química generará en el alumno una visión de la ciencia como un conjunto de conocimientos absoluto, cerrado y estático al mismo tiempo que sitúa a esta ciencia natural lejos de la actividad humana y de su evolución, deshumanizándola e incluso alejándola de lo que la sociedad considera como cultura.^[5]

La contextualización histórica de la química contribuye a una percepción de esta ciencia más allá de formalismos matemáticos, mejorando la imagen que nuestros estudiantes tienen de ella, constituyendo un importante elemento motivador para su estudio. La humanización de la química, en tanto que el alumno es capaz de apreciar su evolución y el papel de sus protagonistas, acercará al alumno a esta ciencia, algo especialmente significativo en Educación Secundaria. Este elemento motivador es fundamental no sólo para potenciar que el aprendizaje suceda, sino también como elemento de supervivencia de la química del siglo XXI como disciplina científica.^[6] Las vocaciones científicas pueden nacer o morir en las aulas de nuestros colegios e institutos y una alfabetización química correctamente contextualizada, si bien no es el único factor (pues la enseñanza de las ciencias presenta actualmente otros muchos retos que superar, constituyendo un reto fascinante para docentes e investigadores en educación), ayudará a reforzar la primera opción.^[7]

Al mismo tiempo, la inclusión de la perspectiva histórica en la enseñanza de la química contribuye a erradicar la visión del saber parcelado, dividido en las distintas áreas en las que tradicionalmente se ha dividido el conocimiento, en una época en la que la interdisciplinariedad se erige como un aspecto fundamental para el desempeño de cualquier actividad académica y profesional. Tal y como se recoge en el prefacio de la obra *Por la alquimia a la química*, de John Read (1884-1963), químico e historiador de la Ciencia:

Probablemente serán más los ojos científicos que los humanísticos los que harán ver el mundo a nuestros nietos, pero no lo comprenderán –y en ello están hoy de acuerdo hasta los mismos científicos–, a menos que conozcan algo del prolongado esfuerzo histórico que ha dado lugar a su aspecto actual y sean capaces de comprender la propia ciencia como un proceso temporal, hecho que los humanistas están acostumbrados a considerar.^[8]

Desde el punto de vista eminentemente didáctico, el método histórico para el aprendizaje de la química del que se habla en la obra de Lespieau constituye un cambio conceptual en la enseñanza de esta ciencia.^[9] Al introducir la historia en la enseñanza de la química, el alumno es capaz de comprender el proceso de construcción del conocimiento científico, contribuyendo a generar en él una visión relativa, abierta y dinámica del mismo. Por otro lado, incluir el marco histórico en la enseñanza de la química lleva a establecer un paralelismo entre el desarrollo de los conceptos, principios y leyes de la química y el proceso de enseñanza-aprendizaje, pues el alumno recorrerá en su aprendizaje etapas similares a las que recorrieron los protagonistas de la historia de la química. Así, la insatisfacción con las ideas previas dará lugar a un proceso de andamiaje hacia un aprendizaje significativo basado en nuevas ideas útiles al alumno.

A la hora de introducir la historia en la enseñanza de la química desde una perspectiva constructivista existe una amplia metodología basada en los trabajos de Gilbert y Watts^[10,11,12] de finales del siglo pasado que consideran la evolución de los conceptos científicos partiendo de la jerarquización de errores conceptuales (método “paso a paso”), mediante nuevas experiencias que conduzcan al cambio conceptual (método evolutivo) o al igual que en la actividad científica, presentando ideas nuevas que han de ser evaluadas (método de la “catástrofe”). Asimismo, desde el punto de vista historiográfico, se han planteado diferentes visiones de interés para el estudio de la ciencia desde una perspectiva histórica, desde una visión de la evolución del conocimiento científico en la que se consideran aquellas contribuciones que demostraron ser válidas con el tiempo (visión whig) a una visión en la que tanto aciertos como fallos son incorporados (visión antiwhig). También es posible tanto considerar un problema científico concreto y su evolución a lo largo de la historia (visión vertical), como analizar un período de tiempo determinado y considerar distintos hechos del mismo (visión horizontal), ya sea únicamente científicos (visión interna), sociales (visión externa) o una combinación de ambos (visión intrínseca). Dado que la Historia no es una narración, sino una construcción, las distintas historiografías no son necesariamente excluyentes, sino que pueden ser complementarias e incluso combinarse entre sí, lo cual lleva a un profundo debate más allá de la incorporación de la historia a la enseñanza de la ciencia: un debate sobre la propia naturaleza de la historia de la ciencia^[13] y sobre la importancia de conciliar la visión de la evolución histórica de la química recogida en la mayoría de libros de texto y de divulgación con los resultados de las investigaciones historiográficas. Así, la historia de la química y su incorporación a la enseñanza revelará la química como una construcción humana que evoluciona para conocer la composición, la estructura y las transformaciones de la materia; que acompaña al ser humano en su día a día y que constituye, junto con el resto de disciplinas científicas, uno de los máximos exponentes de la razón humana: la ciencia, una gran obra colectiva de la historia de la humanidad.^[14]



Figura 1. *El alquimista*, óleo de David Teniers (1610-1690). En esta obra, conservada en el Museo Nacional del Prado de Madrid, podemos observar a un alquimista avivando el fuego. La alquimia constituye una de las etapas de la historia de la química en la que surgieron numerosos instrumentos y técnicas de laboratorio, muchos de los cuales siguen siendo utilizados hoy día

© 2015 Real Sociedad Española de Química

LA EVOLUCIÓN DE LA QUÍMICA

Si queremos utilizar la historia de la química en su enseñanza se hace fundamental un conocimiento histórico de la misma, imprescindible por contextualizar la materia de química. ¿Cuándo podemos comenzar a hablar de química? ¿cuáles fueron sus comienzos? ¿cuál ha sido su evolución histórica? ¿qué protagonistas cabe destacar? Aunque sería inabarcable en un solo artículo incluir todos los protagonistas y sucesos de la historia de la química, haremos un rápido recorrido por el pasado de esta ciencia que constituye un posible hilo conductor para su enseñanza.

La mayoría de autores distinguen cinco grandes etapas en la historia de la química:^[15]

- Tecnología química primitiva.
- Alquimia.
- Iatroquímica y docimasia.
- La transición. Del “quimista” al químico.
- Química científica o ciencia química.

En su célebre *Breve Historia de la Química*, Isaac Asimov (1920-1992) considera el “descubrimiento” del fuego (el momento en el que el hombre es capaz de producir el fuego, imitando a la naturaleza) como el inicio de la Tecnología química primitiva. El ser humano prehistórico, sin ser

consciente, acaba de llevar a cabo una reacción química que arrojará luz y calor durante las oscuras y frías noches de los comienzos de la humanidad.^[16] La química acompañará al ser humano en su vida diaria con los primeros pigmentos que hicieron nacer el arte (carbonatos, óxidos de hierro, hollín...), con las primeras cerámicas y vidrios y con los primeros tintes como el púrpura de Tiro, que desde tiempos fenicios asociará este color a la realeza. Tras el dominio de la piedra (Paleolítico y Neolítico), los metales hicieron su aparición en la historia de la humanidad en la llamada Edad de los Metales desde el Calcolítico, donde el cobre reemplazó al sílex en las puntas de flechas y lanzas, a la Edad de Hierro, elemento químico clave en la victoria de los dorios, equipados con armas de este metal, frente a los pueblos micénicos, con armas de bronce, a finales del II milenio a.C.^[17] Los metales marcarán no sólo nuestra historia, también nuestro presente pues en cada día de la semana, asociados a cuerpos celestes y deidades, subyacen los llamados “Siete metales de la Antigüedad”: lunes (Luna, Ag), martes (Marte, Fe), miércoles (Mercurio, Hg), jueves (Júpiter, Sn), viernes (Venus, Cu), sábado (Saturno, Pb) y domingo (Sol, Au).

En la Protohistoria del Próximo Oriente encontramos más casos de prácticas químicas documentadas por los sumerólogos, como algunas recetas farmacológicas del siglo XXI a.C. encontradas en Nippur.^[18] En otra de las grandes civilizaciones de la Edad Antigua, Egipto, encontramos incluso uno de los posibles orígenes del término “química”, según algunos estudios, originario de “alquimia” que a su vez procede de la contracción del artículo “al” del árabe con el término *khemeia*, que derivaría de *Khem*, nombre dado por los antiguos egipcios a su tierra (*khemeia* sería “el arte egipcio”) o bien de *khumos*, jugo de planta (*khemeia* sería entonces “el arte de extraer jugos”).^[19]

La alquimia supone el inicio de una nueva etapa en la historia de la química y la fusión del pensamiento griego clásico, el misticismo oriental y la práctica egipcia, distinguiéndose tres etapas bien diferenciadas: alquimia helénica (siglos III a.C.-III d.C.), alquimia árabe (siglos VII-XI d.C.) y alquimia cristiana (siglos XII-XV d.C.). La alquimia, conocida como arte hermético en honor a su deidad, Hermes Trimegisto, hace honor al significado actual del término “hermético” pues celosos de su intimidad, los alquimistas trabajan ocultos en sus laboratorios, encriptando sus notas y dificultando que otros pudieran adelantarles en el sueño dorado: en la búsqueda del oro.^[20] Si bien es cierto, hoy sabemos que la transmutación de elementos químicos en oro no es posible mediante las técnicas empleadas por los alquimistas, la alquimia proporcionará sustancias (venenos como el acetato de plomo o el arsénico, disolventes como su *aqua fortis*, hoy ácido nítrico, o el agua ardiente, álcalis, etc), utensilios (alambiques, hornos, retortas...) y técnicas (destilación, el “baño María”...) que serán de interés a los futuros químicos. Fue, en palabras del químico alemán Justus von Liebig (1803-1873), “la química de los tiempos medievales”, sin menosprecio alguno a la importancia que los trabajos de autores medievales tendrán en la posterior Revolución científica.^[8] Revolución que en el

caso de la química se hará esperar... No obstante, aún hoy, cada 15 de noviembre, los químicos vuelven la vista a su pasado alquímico en el día de su patrón: Alberto Magno (1199-1280), alquimista descubridor del arsénico nombrado *Doctor Ecclesiae* por Pio XI en 1931.^[21]

Tras siglos enmarcados en la teoría aristotélica de los elementos con la búsqueda de la piedra filosofal que permitiese la transmutación de metales y del *elixir vitae*; una de las doctrinas alquímicas que había comenzado a extenderse durante los últimos tiempos del arte hermético, la doctrina del mercurio-azufre *sóficos* (para diferenciarlo de los elementos químicos del mismo nombre), será ampliada por un personaje clave en la historia de la química precientífica: Paracelso (1493-1541). A los principios de combustibilidad (azufre *sófico*) y fusibilidad (mercurio *sófico*), Paracelso añadió un tercer principio ligado a la no volatilidad e incombustibilidad: la sal, dando lugar a la doctrina del "Tria Prima". Paracelso aplicará estos tres principios a la medicina, tratando de relacionarlos con enfermedades. Así, un exceso de mercurio provocaba parálisis, un exceso de azufre, fiebre y un exceso de sal, diarrea. A esta nueva etapa de la química en la que los conceptos alquímicos se aplican a la medicina se la denomina iatroquímica (del griego *iatros*, médico), la cual será contemporánea al uso de técnicas alquímicas para el estudio de minerales y metales: la docimasia, del griego *dokimasia* (probar, ensayar), cuyo principal representante fue Georg Bauer (1497-1555), más conocido como Agrícola. Su obra *De Re Metallica*, publicada en 1556, será considerada una de las obras maestras de las técnicas metalúrgicas, siendo utilizada como libro de texto hasta el siglo XVIII.

El siglo XV marcará un punto de inflexión en el pensamiento. La invención de la imprenta de tipos móviles por Johann Gutenberg (1400-1468) alrededor de 1450 permitirá recuperar obras antaño olvidadas. Al mismo tiempo, los nuevos descubrimientos geográficos harán al hombre consciente de las limitaciones del pensamiento aristotélico que tanta influencia había tenido en la cultura y la religión. En el siglo XVI, la publicación de *De Revolutionibus Orbium Caelestium* (1543) por el astrónomo Nicolás Copérnico (1473-1543) y *De Corporis Humani Fabrica Septem* de Andreas Vesalius (1514-1564), médico de la corte de Felipe II, marcará una nueva etapa y conducirá al nacimiento de las ciencias naturales, transición que en el caso de la química se suele enmarcar en la figura del científico británico Robert Boyle (1627-1691), autor de *The Sceptical Chymist* (1661) y considerado habitualmente como uno de los últimos alquimistas.

Algunos autores traducen el término "chymist" como "quimista" por ser anterior al término moderno "chemist" (químico). Además, en lengua inglesa, antes de utilizarse la palabra "chemistry", será utilizado el vocablo "chymistry" como podemos ver en numerosas obras del siglo XVII como *A compleat Body of Chymistry* de Nicolás le Fèvre (1615-1669), traducido a lengua inglesa en 1661 y publicado inicialmente en francés en 1660, como *Traité de la Chymie* o *The Compleat Chymist* (1667) de Christophle Glaser (1615-1670/1678), también publicado originalmente en francés como *Traité de la Chymie* (1663). En este punto

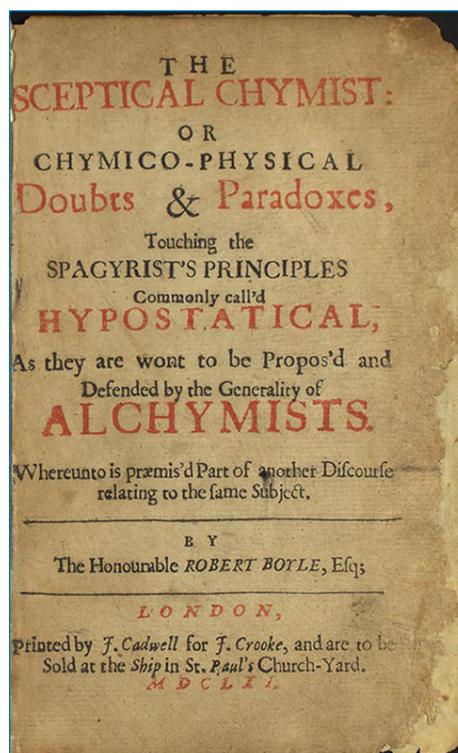


Figura 2. *The sceptical Chymist*, por Robert Boyle (1661), uno de los fundadores de la Royal Society de Londres y miembro del primer consejo

cabe destacar el *Cours de Chymie* (1675) de Nicolás Lemery (1645-1715), obra que gozó de una gran popularidad siendo traducida a numerosos idiomas como el inglés, el castellano, el italiano o el alemán, entre otros. En este texto, además de principios aristotélicos y paracelistas, el análisis químico comienza a tener un papel relevante y algunos procesos químicos serán interpretados desde un punto de vista corpuscular y mecanicista.

Gracias a la imprenta, obras como *De Rerum Natura* de Lucrecio (99-55 a.C.) y *Pneumática* de Herón (10-70 d.C.) contribuirán al renacer del atomismo, poco recordado desde los tiempos de Leucipo (siglo V a.C.) y Demócrito (460-370 a.C.), aunque de algún modo latente en los trabajos de autores de la Edad Media (y compatible con ellos) en los llamados *minima naturalia*.^[22] Esto, unido a la nueva noción de elemento recogida por Boyle y a los trabajos del filósofo Francis Bacon (1561-1626), entre otros, contribuirá a gestar el marco conceptual necesario para el futuro despertar de la química científica en un contexto en el que la comunicación científica aumentará por la creación de las sociedades científicas, como la Royal Society de Londres, fundada en 1660, y la Academia de Ciencias de París, fundada en 1666.^[23] Precisamente, esta última tendrá un papel clave para la química en el siglo XVIII.

Poco a poco, los químicos serán capaces de comprender el comportamiento de aquellos espíritus de los tratados de alquimia. La química neumática se desarrollará con figuras como Stephen Hales (1677-1761), inventor de la cuba hidroneumática; Joseph Black (1728-1799), descubridor del aire fijo (CO₂), gas que ya había sido estudiado (aunque

no obtenido de forma pura) por el médico Jean Baptiste van Helmont (1577-1644) quien lo llamó “gas silvestre”; Henry Cavendish (1731-1810), descubridor del aire inflamable (H_2); Daniel Rutherford (1749-1819), descubridor del aire flogisticado (N_2); Joseph Priestley (1733-1804), descubridor del aire desflogisticado (O_2) a la par que Carl W. Scheele (1742-1786). Relacionados con los gases, fenómenos como la combustión o la calcinación de los metales fueron explicados de acuerdo a la denominada teoría del flogisto, expuesta por Stahl (1660-1734) en su obra *Zymotechnia Fundamental* (1697) y originaria de Becher (1635-1682), publicada en su texto *Physicae Subterranae* (1669), en la que asociaba su *terra pinguis* (llamado flogisto por Stahl, del griego *phlogistos*, combustible o inflamable) al azufre de la doctrina iatroquímica del “Tria Prima”.

De acuerdo a las ideas de Stahl, un combustible liberaba flogisto cuando ardía. Sin embargo, esta teoría no podía explicar por qué la masa aumentaba en la calcinación de los metales o por qué un volumen de aire confinado se contrae en vez de expandirse cuando un combustible arde en su seno. Esta teoría será superada en la llamada Revolución química, cuyo protagonista más destacado fue el químico francés Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) sin olvidar a su brillante esposa Marie Anne P. Paulze (1758-1836), frecuentemente olvidada.^[24] Haciendo de la balanza y la experimentación la base de sus investigaciones, Lavoisier asignará al oxígeno un papel clave tanto en la combustión como en la calcinación de los metales (no se perdía flogisto, ¡se ganaba oxígeno!). Sus trabajos sobre la combustión y otros aspectos de la química (como la composición de los ácidos), así como su célebre *Traité Élémentaire de Chimie*, publicado en el despertar de la Revolución Francesa (1789), constituyen un importante episodio de la historia de la química. Con Lavoisier y otros químicos de la época nacerá también un nuevo sistema de nomenclatura química que ayudará a propagar la nueva química, que aún tendrá que convivir un tiempo con las viejas teorías.

En este marco se establecerán las leyes fundamentales de la química, tanto ponderales –ley de Lavoisier de conservación de la masa, 1785; ley de Proust (1754-1826) de las proporciones definidas, 1799; ley de Dalton de las proporciones múltiples, 1803 y ley de Richter (1762-1807) de las proporciones recíprocas o equivalentes, 1792– como volumétricas –ley de Gay-Lussac (1778-1850) de los volúmenes de combinación, 1808; hipótesis de Avogadro (1776-1856), 1811–. Nace así la estequiometría que desde Lavoisier evolucionará hasta el siglo xx con la introducción del mol como unidad de cantidad de sustancia por la XIV Conferencia General de Pesas y Medidas de 1971, facilitando notablemente los cálculos químicos y permitiendo relacionar directamente la escala macroscópica (medida de masa) con la escala atómico-molecular, gracias a la constante de Avogadro-Loschmidt (1865). Los químicos necesitaban pues conocer los pesos atómicos (¿o masas atómicas?^[25]) de los elementos químicos...

En los tiempos de John Dalton (1766-1844), se determinarán los pesos atómicos de los distintos elementos (33 en época de Lavoisier, incluyendo la luz, el calórico o compuestos como la cal, CaO o la magnesia, MgO). En

su obra *A new system of Chemical Philosophy* (1808), Dalton presenta valores de pesos atómicos para varios elementos al mismo tiempo que introduce una teoría capaz de explicar las leyes ponderales de la química: la teoría atómica.^[26] Sus pesos atómicos, que daban el valor de 1 al hidrógeno, serán superados años más tarde por los trabajos del químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848), quien también introducirá una nueva forma de representar a los elementos químicos. Los símbolos químicos de Berzelius nos acompañarán hasta nuestros días, no así los valores de las masas atómicas que cambiarán hasta el siglo xx, existiendo incluso dos escalas, la escala química, que otorgaba al oxígeno una masa de 16 unidades de masa atómica (u), y la escala física, que asignaba 16 u a la masa del isótopo 16 del oxígeno (^{16}O), el más abundante; ambas relacionadas entre sí mediante el factor de Mecke-Childs (1,00028) durante 30 años hasta que, reunida la IUPAC en Montreal en 1961, se adoptó una nueva escala de masas atómicas tomando como referencia el isótopo de carbono 12, siendo la escala vigente actualmente.^[27]

¿Y qué ocurrió con el atomismo? Aunque 1808 suele ser mitificado como el comienzo del atomismo en química, lo cierto es que habían existido referencias a los átomos en un contexto mecanicista (aunque con distintas características y apreciaciones) con anterioridad a Dalton. Boyle, influido por los trabajos de Francis Bacon y Pierre Gassendi (1592-1655), había recuperado el atomismo^[28] e incluso Isaac Newton (1643-1727) publicará en 1692 *De natura acidorum* en el que se habla de fuerzas (afinidades) entre partículas.^[29] Pese al tiempo transcurrido e incluso con los grandes descubrimientos de finales del siglo xix como los rayos catódicos, la radiactividad natural o los rayos X, en la Exposición Universal de St. Louis de 1904, el químico Wilhelm Ostwald (1853-1932), Premio Nobel de Química en 1909 por sus trabajos en catálisis y equilibrio químico, expresaba públicamente sus dudas sobre la realidad de los átomos, pese a sí admitir la existencia de iones, término acuñado por el científico británico Michael Faraday (1791-1867) años antes, a propuesta de una carta de William Whewell (1794-1866) en 1834 en la que además se introducían los términos “ánodo” y “cátodo”.^[30] La figura de Faraday nos obliga a retroceder en el tiempo hasta 1833, año en el que el descubridor del benceno enunció las leyes de la electrolisis, cuyo estudio cualitativo ya habían realizado Berzeleius y el químico inglés Humphry Davy (1778-1829) a comienzos del siglo xix.^[31] La electrolisis, además de constituir un gran avance en la química de los procesos de oxidación-reducción, supuso la posibilidad de descomponer compuestos en sus elementos constituyentes contribuyendo al descubrimiento de nuevos elementos químicos, al mismo tiempo que se revelaba al ser humano la naturaleza eléctrica de la materia, tal y como anticipó Hermann von Helmholtz (1821-1894) en la Faraday Lecture de 1881. El empleo de la electrolisis, unido a los trabajos de los espectroscopistas como Robert Bunsen (1811-1899) y Gustav Kirchhoff (1824-1887), aumentará significativamente el número de elementos químicos conocidos en la época, siendo necesario poner orden.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
			Ni = 59	Pd = 106,6	Os = 199
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
H = 1			Zn = 65,2	Cd = 112	
Be = 9,4	Mg = 24		? = 68	Ur = 116	Au = 197?
B = 11	Al = 27,4		? = 70	Sr = 118	
C = 12	Si = 28		As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
N = 14	P = 31		Sc = 79,4	Te = 128?	
O = 16	S = 32		Br = 80	J = 127	
F = 19	Cl = 35,5		Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
Li = 7	Na = 23		Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
	K = 39		Ce = 92		
	Ca = 40		La = 94		
	? = 45		Di = 95		
	?Er = 56		Th = 118?		
	?Yt = 60				
	Zn = 75,6				

Figura 3. Primera versión de la tabla periódica de Mendeléiev publicada en 1869. En 1871 cambiará las filas por columnas, adoptando una forma más parecida a la actual

Será el químico ruso Dimitri Ivanovich Mendeléiev (1834-1907) quien el 17 de febrero de 1869 esbozará en el dorso de una invitación a una fábrica de quesos el icono por excelencia de la química: la tabla periódica.^[32] En palabras del astrónomo estadounidense Harlow Shapley (1885-1972): “la compilación de conocimientos más compacta y significativa que haya elaborado hasta ahora el hombre”.

Referente a la tabla periódica, Robert Hicks señala:

La tabla periódica funciona como un almacén de la historia de la química, un molde para la evolución actual y una base para el futuro de las ciencias químicas.^[33]

Precisamente, la tabla periódica puede ser el punto final para nuestro recorrido por la historia de la química. Tal y como apuntaba Hicks, basta contemplarla para suscitar el porqué de su forma (¿qué otros intentos de clasificación existieron? ¿todos fueron tablas?), lo cual nos llevará a las figuras de Johann W. Döbereiner (1780-1849), Alexandre Émile Beguyer de Chancourtois (1820-1886), John A.R. Newlands (1837-1898), Julius Lothar Meyer (1830-1895), Friedrich Adolf Paneth (1887-1958), Alfred Werner (1866-1919), William Odling (1829-1921) o Glenn T. Seaborg (1912-1999), entre otros muchos científicos. Para poder recorrer la tabla periódica será fundamental el número atómico, lo cual nos lleva a los trabajos de Henry Moseley (1887-1915) y al estudio de la estructura atómica, desde un modelo atómico macizo como el de J. J. Thomson (1856-1940) hasta un átomo prácticamente hueco, como en los modelos de Ernest Rutherford (1871-1937), Niels Bohr (1885-1962), Arnold Sommerfeld (1868-1951) o el actual modelo mecanocuántico del átomo. También es imprescindible hacer alusión a la configuración electrónica, clave para comprender la química de los elementos y su posición en la tabla periódica. Wolfgang Pauli (1900-1958), Therald Moeller (1913-1997) o Charles Rugeley Bury (1890-1968) hacen su aparición para explicar cómo los electrones determinan las propiedades químicas de los elementos, algunas de las cuales varían de forma regular en la tabla periódica, magnífica ocasión para hablar de electronegatividad y, por tanto, de Linus Pauling (1910-1994).

Altivos en la última de las columnas, los gases nobles reclaman nuestra atención. Gozando de su gran inercia química, los gases nobles y su estabilidad conducen inevitablemente a los trabajos de Albrecht Kossel (1853-1921), Gilbert Newton Lewis (1875-1946) e Irving Langmuir (1881-1957), entre otros científicos. Presentado el enlace químico, en el que Linus Pauling y su célebre *The Nature of Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals* (1939) se hacen imprescindibles, las fuerzas intermoleculares también harán acto de presencia con figuras como Johannes van der Waals (1837-1923), Peter Debye (1884-1966), Fritz London (1900-1954), Wendell M. Latimer (1893-1955) o Worth H. Rodebush (1887-1959). Del átomo a la molécula por el enlace y de la ruptura y formación de estos, a las reacciones químicas, fenómenos cotidianos, esencia de la química, en los que la energía intercambiada y su espontaneidad (termodinámica química), su velocidad (cinética química) o su reversibilidad (equilibrio químico), introducen un sinfín de protagonistas cuyos trabajos hicieron crecer la química que hoy aprendemos y enseñamos de modo que, en palabras del propio Linus Pauling:

Todo persona que elige la química como profesión, no por ello establece un límite reducido a las actividades de su vida. Todavía se le abren muchos caminos: puede convertirse en profesor [...]; puede ser investigador [...]; puede ayudar a controlar los grandes procesos industriales [...]. Aún cuando elija otra profesión distinta de la química puede encontrar aplicación a sus conocimientos químicos.

Si volvemos a la tabla periódica, de todos los elementos químicos, uno de ellos llamará nuestra atención por ser fundamental para la vida en nuestro planeta: el carbono. La química del carbono o química orgánica nos obliga a viajar a tiempos de Berzelius y su fuerza vital a la que los trabajos de Friedrich Wöhler (1800-1882) –“Puedo obtener urea sin necesidad del riñón animal”– y Hermann Kolbe (1818-1884), entre otros, pusieron fin, dando lugar al nacimiento de la Teoría Estructural de la química orgánica a la que contribuyeron una larga lista de químicos.^[34] Ni el mismísimo Friedrich A. Kekulé (1829-1896) hubiera imaginado en sus mejores sueños el desarrollo que esta rama de la química alcanzaría en el siglo XXI. Ninguno de los químicos asistentes al Congreso de Karlsruhe aquel mes de septiembre de 1860 (químicos que aún tenían serias dudas sobre las fórmulas químicas de los compuestos químicos como el agua, que por aquel entonces se formulaba como OH) hubiesen llegado a pensar que la química alcanzaría en poco más de 150 años un nivel de desarrollo tan asombroso. 155 años en los que se pasó de una selva a un jardín que hoy los químicos siguen abonando y podando. La historia de la química se escribe cada día con los trabajos de los químicos en sus laboratorios (¿debemos estar atentos a sus avances!) y quizá, alguno de nuestros alumnos la escriba algún día.

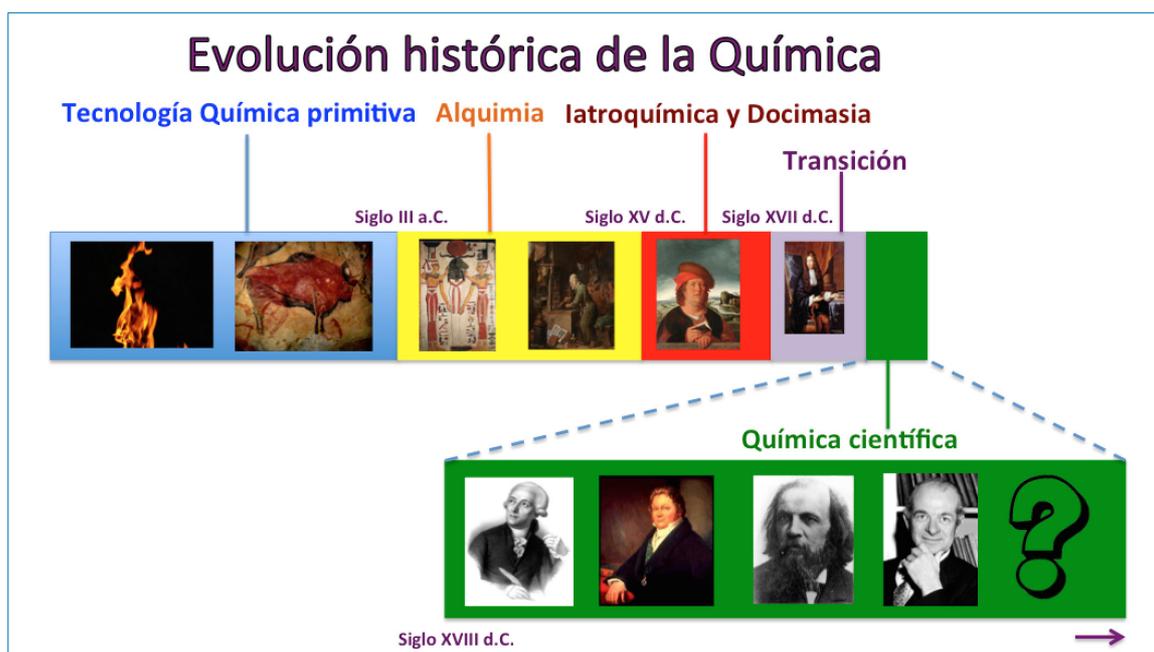


Figura 4. La evolución de la química desde los comienzos de la humanidad hasta nuestros días

A PIE DE AULA

Como acabamos de ver, la química es una obra colectiva a la que han contribuido muchos científicos, no sólo químicos (pues la historia de la química no puede entenderse separada de la de la física y de otras ciencias, encontrando en la incorporación de la historia de la ciencia al aula una forma de fomentar la interdisciplinariedad entre las distintas materias), a lo largo de su historia. Si bien es cierto, algunos científicos han escrito su nombre en los libros de química actuales de forma indeleble. ¿Cuáles son los protagonistas de la química que aprenden nuestros alumnos?

Desde su primer contacto con Física y Química en tercer curso de ESO hasta primer curso de Bachillerato, la química está protagonizada por Boyle, Mariotte, Avogadro, Gay-Lussac, Dalton, Lavoisier, Proust (leyes fundamentales de la química); J. J. Thomson, Rutherford, Bohr, Sommerfeld, Schrödinger, Pauli, Hund, Moeller, Bunsen, Kirchoff (estructura atómica); Newlands, Chancourtois, Meyer, Mendeléiev, Moseley, Pauling (sistema periódico y propiedades periódicas); Lewis (enlace químico), Berzelius, Whöler o Kolbe (química del carbono), entre otros. En segundo curso de Bachillerato, la historia de la química amplía su reparto con personajes como Rydberg, Heissemberg, De Broglie, Schrödinger, Born, Madelung, Hess, Guldberg, Waage, Haber, Boss, Le Châtelier, Braun, Liebig, Davy, Arrhenius, Brönsted, Lowry, Daniell, Faraday, Markovnikov o Sayzev.

De todos los protagonistas, Lavoisier suele ser mitificado como el padre de la química científica, haciendo de la balanza el instrumento fundamental del químico y dando a la química una de sus leyes fundamentales: la ley de conservación de la masa.^[35] Sin embargo, llama la atención el papel poco destacado que suele tener Linus Pauling en los

libros de texto de química españoles (no así en materiales didácticos de países americanos de habla hispana).^[36] En la mayoría de ellos se le presenta asociado al concepto de electronegatividad, cuya escala sigue utilizándose y, no en todos, como un químico que realizó grandes aportaciones al enlace químico. Si seguimos examinando los libros de texto de ESO y Bachillerato e incluso de enseñanzas universitarias, es frecuente encontrar ciertas imprecisiones históricas. Una de ellas la encontramos en el caso de la síntesis de la urea de Wöhler, que suele presentarse como el golpe definitivo a la teoría del vitalismo cuando en realidad supuso el inicio del fin de esta teoría. También es común encontrar referencias a Latimer y Rodebush como los primeros en hablar de enlaces de hidrógeno en 1920, cuando lo cierto es que Vinmill y Moore ya hacen referencia a esta interacción en 1912.^[37,38,39]

Otra de las conclusiones a las que podemos llegar si examinamos los libros de texto de ESO y Bachillerato, es la ausencia generalizada de referencias a las contribuciones de los químicos españoles a la historia de la química. Si volvemos de nuevo la mirada a la tabla periódica, el platino (1748), el wolframio (1783) y el vanadio (1801) constituyen una magnífica oportunidad en el aula para hablar de Antonio de Ulloa (1716-1795), los hermanos riojanos Juan José (1754-1796) y Fausto (1755-1833) Delhuyar y de Andrés Manuel del Río (1764-1849), figuras de la química española por el descubrimiento de los elementos químicos anteriores, respectivamente.^[40] El caso de wolframio (¿o tungsteno?^[41]) constituye un tema que puede suscitar interés en nuestros alumnos, siendo una buena oportunidad para debatir en clase la prioridad en los descubrimientos científicos. Otra figura de la química española ausente en los libros de texto pero de gran interés para nuestra ciencia y nuestra cultura es la de Enrique Moles (1883-1953), químico inorgánico que determinó con gran precisión los pe-

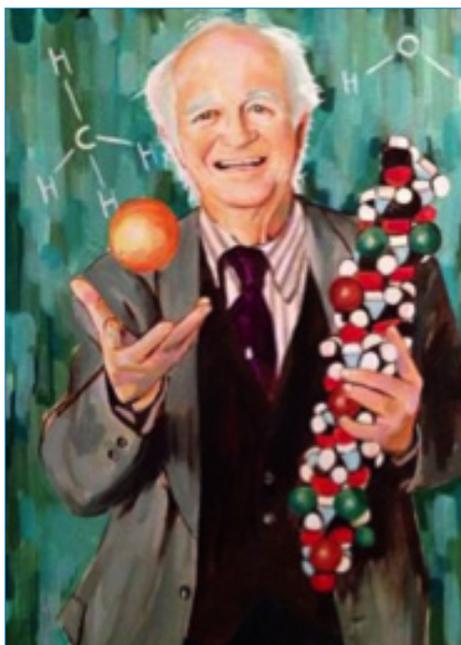


Figura 5. Linus Pauling (1901-1994), ganador del Premio Nobel de Química de 1954 y de la Paz de 1962, es uno de los grandes químicos del siglo XX, cuyos aciertos y equivocaciones constituyen un gran capítulo de la historia de la química

atosómicos de varios elementos, siendo sus valores aceptados por la Comisión Internacional de Pesos Atómicos, de la que llegó a ser secretario. Un químico con una carrera brillante a la que la Guerra Civil puso fin.^[42] La correspondencia entre Sommerfeld y Miguel Catalán (1894-1957)^[43] o la figura de Blas Cabrera (1878-1945), a quien el propio Albert Einstein (1879-1955) y Marie Curie (1867-1934) propusieron como candidato para ingresar en el Comité Internacional de las Conferencias Solvay en 1928, tampoco deberían pasarse por alto. Cabe también preguntarse por la ausencia generalizada de la alquimia en los textos escolares. Por el contrario, mencionar la piedra filosofal o al célebre alquimista Nicolas Flamel (1330-1418) surte un efecto inmediato en el alumnado que se muestra atento y receptivo. ¿Por qué no aprovechar esta oportunidad para despertar su curiosidad y transmutar sus ideas previas hacia la alfabetización química?^[44]

Estos son sólo algunos ejemplos que invitan a reflexionar sobre si el tratamiento de la historia de la química en el aula es realmente el adecuado. Si consideramos el uso de la historia de la química, es habitual encontrarla como introducción a los aprendizajes de cada unidad didáctica, lo cual constituye un recurso interesante, siempre que no quede relegado a los “temas clásicos” tal y como expusimos al comienzo de este artículo, pues de este modo se contribuye a una visión incompleta e inconexa de la evolución de la química. La presencia de la historia en las clases de química y la consiguiente humanización de esta ciencia, pasa por mostrar también los puntos débiles de la química actual, los retos de futuro. Mostrar que en química aún

queda mucho por hacer, que su historia aún sigue escribiéndose, constituye otro elemento motivador que el docente puede aprovechar.

La detección de iones moleculares de los gases nobles,^[45] la polémica situación del hidrógeno en la tabla periódica,^[46] el descubrimiento y nuevo nombre de elementos químicos,^[47] la existencia de nuevos tipos de enlace químico^[48] o la aparición de compuestos hace unos años inesperados (¡existe el NaCl_3 !)^[49] son sólo algunos ejemplos de noticias químicas que en los últimos años han sorprendido a la comunidad química. Su transposición didáctica al aula hará de la química escolar una materia con perspectiva de futuro y, humanizada por el conocimiento de su pasado, revelarse como una opción de futuro, despertándose la curiosidad e incluso, la vocación científica, favoreciéndose significativamente el proceso de aprendizaje y haciendo reales las palabras del químico y escritor Primo Levi (1919-1987) en su célebre obra *El sistema periódico*:

Todos los estudiantes de química, al enfrentarse con un libro de texto cualquiera, tendrían que ser consciente de que en una de aquellas páginas, tal vez incluso en una sola línea, o fórmula, o palabra, está escrito su porvenir en caracteres indescifrables, pero que se aclaran luego; después del éxito o la equivocación o la culpa, después de la victoria o la derrota.^[50]

He aquí la piedra filosofal.

CONCLUSIONES

La historia de la química constituye un valioso recurso didáctico para el docente pues, además de constituir un hilo conductor (un posible criterio de secuenciación didáctica) para el aprendizaje de la química, contribuye a que el alumno conozca y valore cómo se construye realmente el conocimiento científico. La historia en la enseñanza de la química contribuirá a su vez a la humanización de esta disciplina, acercándola al alumno, que podrá recorrer los mismos pasos que recorrieron los científicos del pasado, ayudando a considerar la química como un elemento más de la cultura. Asimismo, se hace fundamental conciliar la evolución historia de la química recogida en manuales, libros de texto y materiales de divulgación con las investigaciones historiográficas, minimizando la dicotomía historia-memoria y potenciando la imbricación de la didáctica con la historia de la química.

AGRADECIMIENTOS

A mis alumnos de ESO y Bachillerato del Colegio Tres Olivos de la Comunidad de Madrid, centro de educación inclusiva preferente de discapacitados auditivos, por permitirme recorrer con ellos la fascinante historia de la ciencia en cada clase.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Lespieau, *La molécula química*, Ed. Espasa-Calpe, Buenos Aires, **1947**.
- [2] Real Decreto 1631/2006, de 29 de diciembre, por el que se establecen las enseñanzas mínimas correspondientes a la Educación Secundaria Obligatoria.
- [3] Real Decreto 1467/2007, de 2 de noviembre, por el que se establece la estructura del bachillerato y se fijan sus enseñanzas mínimas.
- [4] Decreto 67/2008, de 19 de junio, del Consejo de Gobierno, por el que se establece para la Comunidad de Madrid el currículo del Bachillerato.
- [5] M. Hernández, J.L. Prieto, *Enseñanza de las Ciencias* **2000**, 18(1),105.
- [6] C. Elías, *La razón estrangulada*, Ed. Debate, Madrid, Barcelona, **2008**.
- [7] E. Pedrinaci, *El desarrollo de la competencia científica*, Ed. Graó, Barcelona, **2012**.
- [8] J. Read, *Por la alquimia a la química*, Aguilar, Madrid, **1960**.
- [9] E. Castro, P. Gómez, L. Llavona, *Tiempo y sociedad* **2012**, 8, 68.
- [10] J. K. Gilbert, M. L. Pope, *Science Education* **1982**, 66(4), 623.
- [11] J. K. Gilbert, D. M. Watts, *Studies in Science Education* **1983**, 10, 61.
- [12] J. K. Gilbert, D.M. Watts, R.J. Osborne, *Cognitive Structure and Conceptual Change*, Academic Press, London, **1985**.
- [13] O.I. Lombardi, *Enseñanza de las Ciencias* **1997**, 15(3), 343.
- [14] B. Herradón, *Los avances de la Química*, Ed. Catarata, Madrid, **2011**.
- [15] A. J. Ihde, *The development of Modern Chemistry*, Dover Publications, Nueva York, **1984**.
- [16] I. Asimov, *Breve historia de la química*, Alianza editorial, Madrid, **2010**.
- [17] I. Asimov, *Los griegos*, Alianza editorial, Madrid, **2011**.
- [18] A. M. Vázquez, *Historia del Mundo Antiguo (Próximo Oriente y Egipto)*, Ed. Sanz y Torres, Madrid, **2007**.
- [19] R. F. Trimble, *J. Chem. Educ.* **1976**, 53 (12), 802.
- [20] W. H. Brock, *Historia de la Química*, Alianza editorial, Madrid, **1998**.
- [21] M. Castillo, *La Ciencia de los filósofos*, Universidad de Sevilla, Sevilla, 91-106, **1996**.
- [22] C. Solís, M. Sellés, *Historia de la Ciencia*, Espasa, Barcelona, **2013**.
- [23] D. Wojtkowiak, *Historia de la Química*, Editorial Acribia, Zaragoza, **1987**.
- [24] J. R. Bertomeu y A. García, *La revolución química: Entre la historia y la memoria*, Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia, **2006**.
- [25] P. Bièvre, H. S. Peiser, *Pure & Appl. Chem.* **1992**, 64 (10), 1535-1543.
- [26] I. Pellón, *Dalton, el hombre que pesó los átomos*, Ediciones nivola, Madrid, **2003**.
- [27] M. R. Fernández, J. A. Fidalgo, *Química General*, Everest, León, **2008**.
- [28] R. Boyle, *El químico escéptico*, Ed. Crítica, Madrid, **2012**.
- [29] J. Muñoz, *Newton, el umbral de la ciencia moderna*, Ediciones nivola, Madrid, **2010**.
- [30] M. C. Izquierdo, F. Peral, M. A. De la Plaza y M.D. Troitiño, *Evolución histórica de los principios de la Química*, UNED Ediciones, Madrid, **2003**.
- [31] J. M. Palacios, L. Cubillana, *Indagando en la Química a través de la Historia*, Editorial Académica Española, Alemania, **2012**.
- [32] P. Román, *Mendeléiev, el profeta del orden químico*, Ediciones nivola, Madrid, **2002**.
- [33] E. Scerri, *La tabla periódica: una breve introducción*, Alianza editorial, Madrid, **2013**.
- [34] W. A. Bonner, A.J. Castro, *Química Orgánica Básica*, Ed. Alhambra, Madrid, **1985**.
- [35] B. Bensaude-Vincent e I. Stengers, *Historia de la Química*, Addison-Wesley Iberoamericana, Madrid, **1997**.
- [36] L. Pauling, *College Chemistry*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, **1950**.
- [37] W. M. Latimer, W. H. Rodebush, *J.A.C.S.* **1920**, 42, 1419.
- [38] T. S. Moore, T. F. Winmill, *J. Chem. Soc.* **1912**, 101, 1635.
- [39] P. Pfeiffer, *Ann. Chem.* **1913**, 398, 137.
- [40] J. Elguero, *An. Quím.* **2007**, 103, 70.
- [41] P. Román, *An. Quím.* **2005**, 101(2), 42.
- [42] J. Sales, A. Nieto-Galán, *An. Quím.* **2014**, 110(2), 152.
- [43] G. Barceló, *An. Quím.* 2013, 109(4), **295**.
- [44] *La alquimia del siglo XXI*. Conferencia TEDx 2014 de Javier García Martínez: <http://bit.ly/1gUSMz>
- [45] M. J. Barlow et al., *Science* **2013**, 342, 1343.
- [46] L. Moreno-Martínez et al., *An. Quím.* **2013**, 109(4), 347.
- [47] Comunicado de la IUPAC en su web: <http://bit.ly/1EfUNKR>
- [48] D. G. Fleming, J. Manz, K. Sato, T. Takayanagi, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, 53, 13706.
- [49] L. Moreno-Martínez et al., *An. Quím.* **2014**, 110(1), 87.
- [50] P. Levi, *El sistema periódico*, Ediciones Península, Barcelona, **2014**.

Escuela de la Ciencia UJA. Nueva propuesta de la Universidad de Jaén para acercar la Ciencia a los escolares

Antonio Marchal Ingrain, Paloma Arranz Mascarós, Alfonso Alejo Armijo y María A. Fontecha Cámara

Resumen: La Universidad de Jaén (España) ha venido desarrollando de manera continua desde su primera participación en la Noche de los Investigadores del año 2011, con motivo de la celebración del Año Internacional de la Química, una serie de actividades con objeto de contribuir a despertar el interés por la Ciencia y la Innovación de los estudiantes de secundaria y bachillerato de la provincia de Jaén. En esta comunicación se presentan una serie de talleres divulgativos gratuitos, agrupados bajo el nombre de Escuela de la Ciencia, destinados a estudiantes de infantil y primaria, colectivos con los que hasta ahora no se había trabajado.

Palabras clave: Divulgación científica, formación científica de niños, experiencias, teatro, noche de los investigadores.

Abstract: University of Jaen (Spain) has continuously been developing a series of activities since its first participation in Researchers' Night 2011 on the occasion of the celebration of the International Year of Chemistry, in order to contribute to raise interest in science and innovation of middle and high school students in the province of Jaen. In this paper we present a series of free informative workshops grouped under the name of School of Science for students of kindergarten and primary, groups with which had not worked yet.

Keywords: Popular science, science education for children, experiments, performance, researchers night.

INTRODUCCIÓN

En un nuevo intento de la Unidad de Cultura Científica y de la Innovación (UCC+i) de la Universidad de Jaén UJA de contribuir a despertar el interés por la ciencia, la tecnología, la innovación y el emprendimiento entre los escolares y, continuando con el espíritu del Año Internacional de la Química que llevó a numerosos centros a organizar multitud de actividades en pro de hacer más visible la contribución de esta ciencia a la sociedad,^[1-9] durante los meses de abril a junio del año 2015 se han desarrollado una serie de talleres divulgativos totalmente gratuitos en 24 centros de infantil y primaria de la provincia de Jaén.^[10]

La Escuela de la Ciencia UJA (Figura 1), nombre que recibe la iniciativa, ha comprendido una charla divulga-



Figura 1. Cartel distribuido en todos los centros anunciando los talleres



A. Marchal



P. Arranz



A. Alejo



M. A. Fontecha

Departamento de Química Inorgánica y Orgánica,
Facultad de Ciencias Experimentales,
Universidad de Jaén. 23071, Jaén.
C-e: amarchal@ujaen.es

Recibido: 02/07/2015. Aceptado: 31/08/2015.

tiva sobre ingeniería y un total de once talleres diseñados e impartidos por diecisiete profesores y profesoras de la UJA y una veintena de estudiantes y técnicos colaboradores.^[11]

Los talleres han versado sobre diferentes ramas de conocimiento tales como ingeniería, geología, ecología, química, salud, astronomía, radio, arqueología, literatura, emprendimiento o alimentación.

A continuación, detallaremos los objetivos de cada taller prestando especial atención al dedicado a la química.

ESCUELA DE LA CIENCIA UJA

Si bien inicialmente la Universidad ofertó los talleres a todos los centros de la provincia, el enorme interés suscitado por estos, superando todas las previsiones de la Universidad y del profesorado encargado de coordinarlos (se recibieron más de 100 solicitudes), obligó a realizar una asignación por riguroso orden de inscripción. Así, los centros en los que se realizaron los talleres finalmente fueron los detallados en la siguiente tabla.

TALLER	CENTROS
Charla divulgativa "Ingeniería y ciencia mueven mi mundo" (2 h)	CEIP Santa Clara (La Higuera) y CEIP José Luis Verdes (Quesada)
Taller de Ingeniería "¿Quieres ser ingenier@?" (4 h)	Escuelas Profesionales Sagrada Familia (Alcalá la Real) y Escuela Infantil Cronista Vicente Oya (Cambil)
Taller de Geología "Viaje al pasado a través de los fósiles" (1h)	Santa María de la Capilla HH. Maristas (Jaén), Colegio Cristo Rey (Jaén) y CEIP Antonio Pérez Cerezo (Las Casillas)
Taller de Ecología "¿Quién vive en la charca?" (5 h)	CEIP Santa Potenciana (Villanueva de la Reina) y CEIP San Isidro (Guadalén)
Taller de buenas prácticas "¡Muévete por tu salud!" (2 h)	CEIP Jesús María (Jaén) y CEIP Maestro Carlos Soler (Cárcheles)
Taller de Observación del Sol (2 h)	CEIP San José (Las Estaciones de Espeluy) y CEPR General Castaños (Bailén)
Taller de Arqueología "Arqueólogos: detectives del pasado" (2 h)	CEIP Francisco Vilchez (Arroyo del Ojanco) y CEIP Santiago Apóstol (Valdepeñas de Jaén)
Taller de buenas prácticas "Detectives de alimentos" (1h)	CEIP María Zambrano (Jaén) y CEIP Navas de Tolosa (Jaén)
Taller de Química "Parece magia, pero es... ¡química!" (1h)	CEIP Gloria Fuertes (Jaén) y CEIP Tucci (Martos)
Taller de Radio "En Onda" (1 h)	CPR Virgen de la Villa (Martos)
Taller Literario "Yo cuento, tú cuentas" (2 h)	CEIP Nuestra Señora de la Encarnación (Peal de Becerro) y CEIP Alférez Segura (Huesa)
Taller de Emprendimiento (3 h)	CEIP Nuestra Señora de los Remedios (Canena) y CEIP Martín Peinado (Cazalilla)

Tabla 1. Talleres, duración y centros participantes

Todos los talleres se desarrollaron en horario de mañana contando con una respuesta muy positiva tanto por parte del profesorado del centro como de los escolares, los principales protagonistas, quienes convirtieron la visita de la Universidad en una verdadera jornada festiva.

El taller de Ingeniería "¿Quieres ser ingenier@?" (Figura 2) estuvo coordinado por la profesora M.^a Ángeles Verdejo del Departamento de Ingeniería Eléctrica y en él, se usaron materiales básicos y cotidianos para acercar la ingeniería a los estudiantes de infantil a través de expe-



Figura 2. Momento del taller "¿Quieres ser ingeniero?"

rimentos de electromagnetismo, aerodinámica, energías renovables, energía mecánica, hidráulica, robótica, termodinámica o electrónica.^[12]

El taller de Geología "Viaje al pasado a través de los fósiles" (Figura 3) estuvo coordinado por el profesor Matias Reolid del Departamento de Geología y consistió en una pequeña charla participativa en la que a los escolares se les explicó, mostrándoles multitud de fósiles y algunas herramientas de campo típicas, en qué consiste el trabajo de un geólogo.^[13]

En el taller de Ecología "¿Quién vive en la charca?" (Figura 4) la profesora Raquel Jiménez del Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología, hizo una introducción a los distintos tipos de ecosistemas acuáticos conocidos y a los organismos que viven en ellos. Luego explicó qué es una cadena trófica, los ciclos vitales de algunos organismos y las amenazas que sufren los ecosistemas acuáticos.

El taller de buenas prácticas "¡Muévete por tu salud!" coordinado por el profesor Rafael Moreno del Departamento de Didáctica de la Expresión Musical, Plástica y Corporal, pretendía concienciar a los niños sobre la importancia de un estilo de vida saludable y la necesidad de llevar a cabo actividades físico-deportivas como pilar básico para lograrlo.



Figura 3. Momento del taller "Viaje al pasado a través de los fósiles"



Figura 4. Momento del taller de Ecología "¿Quién vive en la charca?"

El taller de **Observación del Sol** coordinado por los profesores Josep Martí y Pedro Luque de los Departamentos de Física e Ingeniería Mecánica y Minera respectivamente, pretendía introducir a los niños a la observación astronómica de nuestra estrella más cercana. Se hizo una introducción a la física solar y se mostraron los diferentes métodos que tienen los astrónomos para ver el Sol: por proyección, mediante filtros o a través de telescopios en órbita.

En el taller de Arqueología "**Arqueólog@s: detectives del pasado**", las investigadoras Carmen Rueda y Ana Herranz del Instituto Universitario de Investigación en Arqueología Íbera de la Universidad de Jaén realizaron una breve explicación acerca de la Arqueología como profesión y luego, mostraron a los asistentes *in situ* los diferentes elementos que se encuentran en una excavación y cómo se analizan.

El taller de buenas prácticas "**Detectives de alimentos**" (Figura 5) estuvo coordinado por la profesora Isabel Prieto del Departamento de Ciencias de la Salud y perseguía, además de fomentar una alimentación sana, despertar la curiosidad y los sentidos de los escolares más pequeños haciéndoles probar alimentos con nuevos sabores, texturas y colores. En el taller con los estudiantes de primaria se incidió en cambio, en aspectos más científicos, haciendo que se acercaran a la comida como si fueran investigadores.^[14]



Figura 5. Momento del taller "Detectives de alimentos"

Finalmente, el taller de Química "**Parece magia, pero es... ¡química!**" (Figura 6), coordinado por los profesores del Departamento de Química Inorgánica y Orgánica Antonio Marchal y Paloma Arranz, consistió en un taller de experimentos químicos aparentemente mágicos y divertidos a la vista del público infantil pero bien conocidos en el ámbito de la divulgación científica.^[15-27] El taller fue llevado a cabo por estudiantes de grado y postgrado de la UJA convertidos para la ocasión en un científico ordenado y metódico por un lado y en un mago caótico y desordenado por otro que atrajo especialmente las simpatías de los pequeños.

A diferencia de otros talleres en donde los experimentos se llevan a cabo de forma divertida y amena pero sin conexión argumental alguna entre un experimento y otro, en esta ocasión optamos por elegir experimentos que hicieran uso, en la mayoría de los casos, de productos presentes en el hogar y que nos permitieran a su vez escribir una historieta a modo de cuento infantil teatralizado representable en no más de 30 minutos. De esta manera, durante una mañana el taller se pudo repetir hasta en tres ocasiones dando tiempo suficiente a limpiar y preparar los reactivos necesarios entre un taller otro.



Figura 6. Momento del taller "Parece magia pero es... ¡química!"

En el siguiente apartado, esperando que sirva de utilidad para futuros talleres y divulgadores, presentamos el guión que se siguió durante el desarrollo del taller a sabiendas de que, en muchas ocasiones fue necesario improvisar ante las preguntas y múltiples intervenciones de los escolares.

Los talleres científicos se completaron con dos talleres de radio y uno sobre emprendimiento.

Los talleres de radio "**En Onda**" (Figura 7) y "**Yo cuento, tú cuentas**" dirigidos ambos por el profesor Julio Olivares del Departamento de Filología Inglesa, perseguían fomentar el hábito de la lectura y la interpretación en los escolares a través de la dramatización radiofónica de cuentos clásicos o la grabación de cuñas.^[13,28]



Figura 7. Momento del taller de radio "En Onda"

El taller de **Emprendimiento** por último, dirigido por los profesores Alfonso Márquez y Manuel Vallejo del Departamento de Organización de Empresas, Marketing y Sociología buscaba fomentar el trabajo en equipo y la creatividad de los escolares mediante una serie de juegos con el fin último de aumentar las vocaciones y estimular actitudes y competencias de utilidad para futuros empresarios.

ESCENA 1. PRESENTACIÓN: BIENVENIDOS AL MUNDO DE LA QUÍMICA

—Un científico revisa su laboratorio y comprueba que está todo en orden antes de empezar la clase.

CIENTÍFICO (C): Buenas tardes jovencitos. ¿Qué les parece mi laboratorio? En unos momentos comenzaremos la clase así que, siéntense cómodos y saquen papel y lápiz.

Soy químico y me dedico a estudiar la materia. ¿Saben de qué les hablo, ¿no? Aquello de lo que está hecho todo lo que nos rodea y sus propiedades. En concreto yo me dedico en la Universidad a estudiar qué compuestos hay en las plantas y como estos nos pueden ayudar a curar enfermedades o, a dar más color y sabor a los alimentos o a las chuches que tanto nos gustan, ¿verdad?

Veamos un ejemplo muy sencillo. Fíjense lo que ocurre con el agua caliente de este recipiente cuando le echo unas hojitas de esta planta que pueden encontrar en los supermercados, en las bolsas de la ensalada, col lombarda se llama.¹⁷ El agua adquiere color azul. ¿Por qué? Porque el agua extrae unas sustancias que hay en la hoja que le dan ese color. Ocurre lo mismo que cuando nuestros papás se toman un té o una manzanilla. Ponen las hojas en agua caliente y el agua adquiere color marrón en ese caso.

Volvamos al compuesto azulado de las hojas de col lombarda. Ese compuesto tiene propiedades muy interesantes. En concreto cambia de color cuando lo ponemos en contacto con muchos sólidos y líquidos que tenemos en casa,

bicarbonato de sodio por ejemplo. A ver si tengo un poco por aquí. ¡¡Estupendo!! Miren el resultado. La disolución adquiere color verde. Probemos ahora con vinagre. ¿Pero dónde he puesto el vinagre? Vaya, no lo encuentro. Voy al almacén a buscar un poco. No se muevan que vuelvo enseguida, ¿vale?

ESCENA 2. ¡QUÉ SED! ¿QUÉ OS APETECE, VINO, LECHE O REFRESCO?

—El científico se retira pero antes, añade unos pellets de CO₂ a un desecador con agua. Tras la cortina de vapor sale un mago. El mago está desconcertado porque nunca había estado rodeado de tanta gente. Se queja del calor que hace y busca algo para beber en las mesas.

MAGO (M): Hola. ¡¡Cuánta gente!! ¿Qué hacen ahí? Qué calor, ¿no? ¿Saben dónde podría encontrar agua fresquita o algo para beber?

¿Y esto? Voy a probarlo. ¡Puf!, que fuerte y ácido. Seguro que si se lo echo a este líquido azul cambia de color. ¡¡Anda!! Pues sí que cambia. Se ha puesto rojo.

Veamos que más hay por aquí. ¡Mmm!, eso parece vino. Voy a echarme un poquito en esta copa. A ver qué tal (*se echa y hace como que lo huele*)... ¡Puaj!, qué mal huele. Además, está calentorro. Y si en lugar de en la copa lo echo en este vaso. A ver qué pasa, qué pasa... leche, se convierte en leche. La verdad es que yo no quiero leche, yo prefiero un batido de fresa o mejor una gaseosa que me refresque. A ver, a ver qué encuentro por aquí... Echo un poquito de vino y ... ¡¡jeco le cua!!, he conseguido convertir el vino en batido de fresa y en gaseosa.¹⁸

Qué bueno ser mago, ¿no? Pero recuerden, parece magia pero *noooo*, es química.

ESCENA 3. ¡QUÉ APETITO! ME APETECE UN HUEVO FRITO

—Con el refresco, al mago le entra apetito así que pregunta al público si tienen algo para comer.

(M): Qué hambre me han entrado con la bebida. ¿Tienen algo *pa* picar? Me apetece un huevo frito lo que ocurre es que no se si voy a encontrar en este sitio tan extraño lo que necesito. A ver, ustedes que seguro ayudan a sus mamás en la cocina. ¿Qué hace falta para freír un huevo? *Aceeeeite*, una sartén, algo para calentar y... el huevo, ¿no? Bien, veamos si consigo todo esto. El *hueeeevoo*, el *aceeeeite*, la sartén y ¿*pa* calentar? ¡Mmm!, no sé, no sé, este lugar no se ve muy seguro. No. Voy a freír un huevo sin calentar. ¿A qué no saben cómo? Con este líquido incoloro que tengo aquí y que todos ustedes tienen guardado en el botiquín de emergencias de su casa, alcohol etílico se llama.

Bien, rompamos el huevo en la sartén y echemos un poquito de alcohol. Vaya, no puedo romperlo. Parece que el huevo está cocido (*lo golpea sobre la mesa*). Efectivamente

pero, yo quiero un huevo frito, no cocido. Mira, aquí hay otro huevo. ¿Estará también cocido? ¿Cómo puedo saberlo? Muy fácil, pongámoslo sobre la mesa y hagámoslos girar. Fíjense, el huevo cocido gira rápida y de forma homogénea mientras que al huevo fresco le cuesta girar. Esto se debe a que al cocer el huevo su estructura química interna cambia y, la yema y la clara al solidificar hacen que el huevo gire rápidamente.^[19]

Parece magia pero noooo, es... (pregunta al público incitándolo a contestar) ¡Química! (responden todos al unísono).

Por cierto, ¿se les ha caído alguna vez vinagre sobre el suelo de mármol de su casa? Cuidado, porque el vinagre contiene una sustancia que reacciona con el carbonato de calcio del que está hecho el mármol y, si lo dejamos varios días lo estropea. Le ocurre justamente lo mismo que le ocurre a un huevo fresco después de dejarlo dos días en vinagre. Como éste. Fíjense, ha desaparecido la cáscara que estaba hecha también de carbonato de calcio y eso nos permite ver su interior.^[20] Impresionante, ¿no?

Pero bueno, ¿yo no iba a freír un huevo? A ver, lo echo en la sartén, ahora un poco de alcohol y ... a ver, a ver. ¿Qué les parece? (lo muestra al público). Está pa mojar pan, ¿eh? Bueno, como sé que en esta provincia tienen muy buen aceite de oliva no dejen de utilizarlo, ¿vale? Lo que hemos conseguido con el alcohol es modificar la estructura molecular de las proteínas de la clara y la yema del huevo adoptando éste la misma apariencia que un huevo frito pero en realidad, no lo está y por lo tanto, no nos lo podemos comer, ¿de acuerdo?^[21] Recuerden, parece magia pero noooo, es... (pregunta al público) ¡Química!

ESCENA 4. DESPUÉS DE COMER, ¿QUÉ HAY QUE HACER?

—Después de comer, el mago recomienda lavarse siempre los dientes para evitar las caries. Pide al público si le puede prestar un poco de pasta dentífrica. Como nadie le da, decide preparar pasta para todos.

(M): Bueno, ahora después de comer ¿qué hay que hacer siempre? (pregunta al público) Lavarse los dientes para evitar que las bacterias se alimenten y nos provoquen caries, ¿no? Me parece que tampoco van a tener pasta dentífrica para prestarme, ¿verdad? Me lo temía. A ver qué encuentro por aquí. Un barreño y un tubo de cristal con rayas. Estupendo, creo que me servirá.

Voy a preparar pasta para todos. Si se fijan en las etiquetas de la pasta de dientes que tienen en casa son muchos los ingredientes necesarios pero yo la voy a preparar con tan solo tres ingredientes. La receta es secreta así que mucho cuidado con decir nada ahí fuera, ¿eh?^[22] Los tres ingredientes son:

1. H₂O₂ ó agua oxigenada (dice el mago en voz baja, susurrando al público con la intención de que no se entere mucha gente. Se añaden, en una probeta de 250 mL, 40 mL de disolución comercial de H₂O₂ al 30%).

2. Un chorreón de pipí de lagarto para que se queden los dientes relucientes. Detergente para lavavajillas pone aquí. Bueno, vale igual y, por último...
3. El gran secreto de la receta K I, K I, K I, repitan conmigo (pide al público): K I, K I, K I. (Se añaden 10 mL de disolución saturada de yoduro de potasio (4 g) preparada el mismo día de la representación). De repente algo parecido a una pasta de dientes empieza a crecer en el interior de la probeta, rebosa y sale al exterior. El mago eufórico, exclama:

¡¡Bravo, bravo!! ¡¡Aquí tienen su pasta de dientes!! (el mago canta y anima al público a que lo acompañen) ¡¡PASTA DE DIENTES PARA DEJARLOS RELUCIENTES!! ¡¡PASTA DE DIENTES PARA DEJARLOS RELUCIENTES!!

Recuerden, parece magia pero noooo, es... (pregunta al público) ¡Química!

ESCENA 5. ¡¡QUÉ CALORCITO!!

—Tras preparar la pasta de dientes, al mago le entra frío y sueño así que para entrar en calor y echarse la siesta a gusto saca una bolsita con unos polvitos blancos.

(M): ¡Brrr! Qué frío me ha entrado. ¿Cómo podría calentarme? A ver que tengo por aquí (mira en el interior de su capa). ¡¡Voilà!! Si disuelvo un poquito de este polvo blanco en agua... A ver, ¿alguien del público tiene agua para dejarme? ¿No? A ver, un voluntario/a. ¿Cómo te llamas? ¿Quieres ser mi ayudante? ¿Sí? Pues ponte esta bata y estas gafas. Comprueba que el agua de esta botella está fría y echa un poco en este bote. Ahora echa los polvitos, agita y toca la base. Toca, toca. ¿Qué ocurre? Se calienta, ¿no? Pásaselo a tus compañeros. Este polvito es cloruro de calcio, una sustancia que al disolverse en agua origina el desprendimiento de una gran cantidad de calor mediante un proceso denominado E X O T É R M I C O ¿Les han hablado ya en clase de los procesos y las reacciones exotérmicas? ¿No? Este tipo de procesos tiene utilidad por ejemplo, para preparar bebidas autocalentables.^[23,24]

¡Uf!, qué sueñecito. Voy a buscar un sitio para echarme un rato si no les importa.

ESCENA 6. ¡¡ QUÉ DESORDEN!!

—Con el calorcito el mago se queda dormido en una esquina del laboratorio. Vuelve el científico del principio discutiendo con su joven aprendiz y descubren el desorden.

(C): Otra vez se ha roto el aparato del aire acondicionado. Con este calor seguro que no nos sale ningún experimento.

APRENDIZ (A): Sí, habrá que tener cuidado, especialmente con los disolventes volátiles como el éter y el hexano.

(C): Pero bueno, que ha pasado aquí. Mire, alguien ha montado una fiesta química sin avisarnos.

(A): Profesor, no queda vino para el experimento de la destilación. Lo han gastado casi todo.

(C): No toques nada, observa y analiza lo que veas como todo buen científico. Efectivamente, han dejado muy poco vino.

(A): Mire, mire. Hay una jarra con leche, un vaso con batido de fresa y otro con refresco.

(C): ¡Mmm!, ¡qué interesante!

(A): ¿Profesor, profesor? Hay varios botes de reactivos abiertos.

(C): Ten cuidado. A ver, déjame que mire. Tiosulfato de sodio, cloruro de bario y carbonato de sodio.

(A): El tiosulfato de sodio es un agente reductor, ¿verdad?

(C): ¡¡Verdad, verdad!!

(A): y el carbonato de sodio se utiliza para neutralizar y equilibrar la acidez, ¿verdad?

(C): ¡¡Verdad, verdad!!

(A): y el cloruro de bario, ¿para qué sirve?

(C): Ahora lo vas a ver. ¿Quedaba algo de vino? Bueno, vino. Sospecho que no es vino lo que contiene esa botella así que, aunque tenga sed, no se le ocurra probar nada. Ayúdeme. Ponga un poco de cloruro de bario en este vaso y añádale un poco del supuesto vino. ¡¡*Voilà*, batido de fresa! Ahora, ponga en este vaso un poco de cloruro de bario y también otro poco de tiosulfato de sodio. Añádale un poco del supuesto vino. ¡¡*Voilà*, leche!!

Por último, ponga en este otro vaso un poco de tiosulfato de sodio y también otro poco de carbonato de sodio. Añádale un poco del supuesto vino. ¡¡*Voilà*, refresco de limonada!! Mirad las burbujas!!

El líquido contenido en la botella no es vino sino permanganato de potasio disuelto en agua. Al mezclar la disolución de permanganato, de intenso color violeta, con el tiosulfato de sodio se produce una reacción *redox*. Como consecuencia de esta reacción, el permanganato se convierte en otra sustancia que hace que la disolución pierda su color. Pero, ¿y las burbujas? Las burbujas son el dióxido de carbono (CO_2) resultante de la reacción que tiene lugar entre el carbonato de sodio que hemos adicionado y una sustancia con propiedades ácidas que acompaña a la disolución de permanganato de potasio. ¿Qué sustancia? Pues según nos muestra el resultado de los dos ensayos anteriores, con toda seguridad, ácido sulfúrico. Este ácido se combina con el cloruro de bario añadido formando un sólido o precipitado de color blanco que, en el segundo ensayo hace que el contenido del vaso parezca leche y, en el primer ensayo, hace que el contenido del vaso parezca batido de fresa dado que en este caso, al no haber puesto tiosulfato de sodio, no se produce la reacción *redox* con decoloración.^[18] Nada de vino, leche, batido de fresa o limonada por tanto.

(A): ¿Y todo eso cómo lo ha sabido usted Profesor?

(C): Muchos años de observación y experiencia querido/a alumno/a.

(A): ¿Pero todo esto quien lo ha dejado así?

(C): Lo averiguaremos pronto porque aquí hay mucha gente que seguro ha visto algo, ¿*verdaaaad*? (se dirige al pú-

blico). Ahora ayúdeme a retirar esto. ¡¡Qué desorden!! Ustedes recogerán su cuarto o el aula siempre cuando terminan de jugar, ¿no?

ESCENA 7: NITRÓGENO, ¿LÍQUIDO?

–*El mago se despierta y pide al público que no avise al profesor. Descubre un líquido humeante (N_2) en el interior de un recipiente sobre la mesa.*

(M): ¿Qué es este líquido? No lo había visto nunca. ¡¡*Ooh*, qué fresquito!! A ver qué temperatura marca mi termómetro. Menos 196 °C, ¡¡*cáspita*!!

Debe ser nitrógeno líquido. Pero, ¿cómo lo han conseguido si el nitrógeno se encuentra en estado de gas a temperatura ambiente? Sí, no lo vemos porque es incoloro, pero está delante de vuestras narices, ahí, allí y aquí junto con el oxígeno que respiramos. ¡¡Qué interesante!! Tomad, inflad un globo y vamos a ver qué es lo que ocurre si lo introducimos.

(*El mago introduce un globo en el recipiente con el nitrógeno y espera a que se desinfla para sacarlo*)

Fíjense, parece como si el globo hubiera perdido el aire que lo llenaba pero si lo dejamos un segundo fuera... vuelve a inflarse.

El globo se infla porque las moléculas se mueven rápidamente en su interior y chocan con su superficie elástica. Si introducimos el globo en el nitrógeno a menos 196 °C las moléculas se enfrían, dejan de moverse y por tanto dejan de chocar con la superficie elástica.^[25,26]

Introduzcamos ahora un globo con agua en su interior. ¿Qué creéis que va a ocurrir? ¡¡Probemos!! Efectivamente, el agua de su interior se congela.

Si esto le ocurre al agua, ¿qué le ocurrirá a cualquier objeto que introduzcamos que tenga agua? Una flor por ejemplo. ¡¡Probemos!!

ESCENA 8: FIN. PARECE MAGIA PERO ES... ¡QUÍMICA!

–*El aprendiz descubre al mago y avisa al profesor. Ya se explican el desorden. El profesor persigue al mago entre el público que intenta detenerlo. Mientras, el aprendiz coloca unos botes sobre la mesa, levanta unos guantes de látex y...*

(A): Profesor, profesor. Venga, venga.

(C): ¡¡Pero bueno!! Imaginaba que eras tú el que había estado trasteando en mi laboratorio. Voy a hacerte regresar al mundo mágico del que procedes. ¡¡No te escaparás esta vez!!

(M): Hombre, pero déjeme que me despida de estos jovencitos. Lo han pasado bien, ¿no? (*pregunta al público repetidas veces antes de quedar acorralado entre el profesor y el aprendiz*).

El científico echa unos polvos negros (MnO_2 , 2 g) en un recipiente con un líquido incoloro (H_2O_2 , 10 mL) y el mago desaparece tras una columna de vapor.²² En la mesa, los guantes inflados por el dióxido de carbono desprendido después de mezclar el bicarbonato de sodio (4 g) contenido en los guantes, con el vinagre contenido en los botes (20 mL)^[27] dan lugar a un mensaje que el profesor anima a leer para concluir y que dice

PA RE CE MA GIA PE RO ES QUÍ MI CA

Al escuchar la frase, el mago sale detrás de la mesa con otro guante inflado que pone FIN.

CONCLUSIONES

La Universidad de Jaén, en colaboración con la Delegación Territorial de Educación, Cultura y Deporte de la Junta de Andalucía y la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, ha acercado sus líneas de investigación a casi 2.000 escolares de Educación Infantil y Primaria de la provincia de Jaén a través del programa "Escuela de la Ciencia UJA". Este ambicioso programa, organizado desde la Unidad de Cultura Científica y de la Innovación (UCCI+i) del Vicerrectorado de Relaciones con la Sociedad e Inserción Laboral de la UJA, se ha desarrollado desde abril hasta junio del año 2015 con el objetivo principal de fomentar el interés por la ciencia como actividad profesional y como forma de desarrollo humano, relacionando las inquietudes de este alumnado con las principales líneas de investigación y de innovación de la Universidad de Jaén, favoreciendo la cercanía entre el personal investigador y los escolares y creando un clima favorable a la ciencia, la tecnología, la innovación y el emprendimiento.

De los 11 talleres ofertados, el de Química, consistente en un conjunto de experimentos sencillos explicados por un científico y un mago de manera teatralizada, ha sido uno de los más solicitados superando con creces las previsiones de la organización. Destacar que han sido varias las cartas recibidas desde los centros felicitando a la Universi-



Figura 8. Uno de los dibujos realizados por los escolares tras el taller de Química

dad y a los coordinadores del taller por la forma tan simpática y divertida de acercar la química a los escolares. Asimismo, fiel reflejo del éxito de la actividad en los centros, fue la implicación de los escolares dibujando, a propuesta de los profesores, aquel momento o experimento que más les había gustado (Figura 8).

En definitiva, aunque hay que reconocer que la preparación de los talleres lleva bastante tiempo, los resultados obtenidos animan a seguir apostando por estas iniciativas, buscando siempre implicar como divulgadores a los estudiantes de los grados así como a las instituciones competentes.

AGRADECIMIENTOS

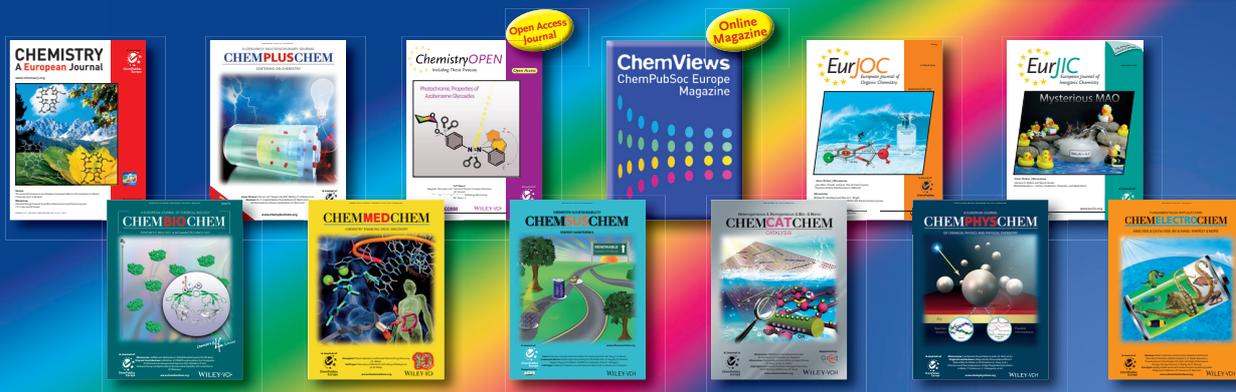
Los autores agradecen a todos los profesores, técnicos y estudiantes de la UJA que han colaborado desinteresadamente en la organización y desarrollo de los talleres y, a los escolares, al profesorado y a las directivas de los centros de la provincia de Jaén que han participado o se han interesado por participar. Asimismo, por cubrir las necesidades económicas y logísticas de los talleres, agradecen la colaboración de la Facultad de Ciencias Experimentales, la Unidad de Cultura Científica y de la Innovación del Vicerrectorado de Planificación, Calidad, Responsabilidad Social y Comunicación de la Universidad de Jaén, la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FCT-14-8735) y la Consejería de Educación de la Junta de Andalucía.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Ayora, A. Domínguez, A. Marchal, M. P. Fernández-Liencre, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 139-143.
- [2] A. Marchal, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 149-153.
- [3] A. Aguayo, C. Gutiérrez, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 126-134.
- [4] C. Ramírez de Arellano, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 144-148.
- [5] E. Gómez, J. Frau, J. Donoso, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 254-257.
- [6] M. Bardají, I. Rodríguez, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 328-333.
- [7] A. Marinas, C. Michán, T. Roldán-Arjona, M. Blázquez, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 334-339.
- [8] J. H. Busto, P. J. Campos, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 340-343.
- [9] T. Lupión, C. Criado, J. T. López-Navarrete, J. J. Quirante, *An. Quím.*, **2013**, *109*, 59-63.
- [10] <https://diariodigital.ujaen.es/node/45851>, visitada el 18/06/2015.
- [11] <http://diariodigital.ujaen.es/node/46462>, visitada el 18/06/2015.
- [12] <http://diariodigital.ujaen.es/node/46384>, visitada el 18/06/2015.
- [13] <http://diariodigital.ujaen.es/node/46368>, visitada el 18/06/2015.
- [14] <http://diariodigital.ujaen.es/node/46335>, visitada el 18/06/2015.
- [15] G. Pinto, M. L. Prolongo, *An. Quím.*, **2012**, *108*, 344-351.
- [16] Fq-experimentos; Experimentos caseros de Física y Química: <http://bit.ly/1FB5PoB>, visitada el 18/06/2015.
- [17] Fq-experimentos; Experimentos caseros de Física y Química: <http://bit.ly/1wvhr0>, visitada el 18/06/2015.

- [18] Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Alcalá <http://bit.ly/IQPWHbF>, visitada el 18/06/2015.
- [19] Fq-experimentos; Experimentos caseros de Física y Química: <http://bit.ly/1LByM9g>, visitada el 18/06/2015.
- [20] VVAA. Los experimentos de Flipy. Flipy y el hombre de negro. Punto de lectura. Madrid, 2010, pp. 176-178.
- [21] Página Web de experimentos caseros <http://bit.ly/1TNezD4>, visitada el 18/06/2015.
- [22] M. L. Aguilar, C. Durán, *Eureka* **2011**, 8, 446-453.
- [23] M. L. Prolongo, G. Pinto, *Educ. Quím*, **2010**, 7, 4-14.
- [24] 2Go autocalentable; caliente con un click: <http://bit.ly/T7436n>, visitada el 18/06/2015.
- [25] IX Feria Madrid es Ciencia, 2008 <http://bit.ly/1LncDWs>, visitada el 18/06/2015.
- [26] Semana de la Ciencia y la Tecnología. Universidad de Oviedo, 2009: <http://bit.ly/1Luf8in>, visitada el 18/06/2015.
- [27] Centro de Ciencia Principia de Málaga. Experimentos: <http://bit.ly/RXpmfc>, visitada el 18/06/2015.
- [28] <http://diariodigital.ujaen.es/node/46395>, visitada el 18/06/2015.

Submit to your society's journals
www.chempubsoc.eu



La tabla periódica de los elementos químicos para niños y abogados

Pascual Román Polo

Resumen: Con ocasión de conmemorarse en 2015 el primer centenario de la muerte de Moseley, quien junto con Mendeléiev está considerado el otro padre de la moderna tabla periódica de los elementos químicos, en el presente trabajo, se rinde un emocionado homenaje de gratitud por su gran aportación al acervo científico y cultural de la humanidad. Además, se pretende acercar la tabla periódica a los niños y los abogados. Se utilizará como idea ordenadora el número atómico. Se aprenderán los elementos químicos jugando como lo harían los niños. A este juego se invita a los abogados, quienes colaborarán con sus reglas mnemotécnicas para aprender grupos o familias de elementos que nos ayudarán en esta tarea.

Palabras clave: Tabla periódica, Moseley, Mendeléiev, niños, abogados, juego, reglas mnemotécnicas.

Abstract: On the occasion of the commemoration in 2015 the centenary of the death of Moseley, who along with Mendeleev is considered the father of modern periodic table of the chemical elements, in this paper, it is paid a heartfelt tribute of gratitude for his great contribution to scientific and cultural heritage of humanity. Another aim is to bring the periodic table to children and lawyers. The atomic number is used as ordering idea. We will learn the chemical elements playing as children would do it. In this game the lawyers are invited to participate, because with their mnemonics for learning groups or families of elements that will help us in this task.

Keywords: Periodic table, Moseley, Mendeleev, children, lawyers, game, mnemonics rules.

INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de los nombres de los elementos químicos de la tabla periódica, sus símbolos y su posición en ella es uno de los retos más difíciles con el que se enfrentan los estudiantes de la asignatura de química de todo el mundo en cualquier nivel de la enseñanza. Ante este desafío y según la pericia de sus profesores, los alumnos pueden adoptar dos posiciones extremas: admirar la tabla periódica o rechazarla. La tabla periódica de los elementos químicos es uno de los iconos de la ciencia más geniales. La tabla periódica, además de icono científico y una obra colectiva de grandes científicos, es un juguete cultural donde se pueden aprender nociones de arte, filología, geografía, gramática, historia, lenguas –sobre todo, el inglés–, mitología, y otras habilidades y destrezas –como el manejo de los paquetes de programas del MS Office u OpenOffice, Adobe Acrobat, PowerPoint y otros, así como la navegación a través de Internet–.^[1-4] Para su enseñanza se pueden utilizar reglas mnemotécnicas,^[5-11] aprendizaje memorístico de grupos de elementos según sus propiedades químicas o físicas, juegos



P. Román Polo

Departamento de Química Inorgánica
Facultad de Ciencia y Tecnología
Universidad del País Vasco
Apartado 664, 48080 Bilbao
C-e: pascual.roman@ehu.es

Recibido: 28/07/2015. Aceptado: 09/12/2015.

Tabla 1. Tabla de sustancias simples propuesta por Lavoisier (1789)

	NOMS NOUVEAUX.	NOMS ANCIENS CORRESPONDANTS.
	Lumière.	Lumière. Chaleur.
	Calorique.	Principe de la chaleur. Fluide igné. Feu. Matière du feu et de la chaleur.
Substances simples qui appartiennent aux trois règnes, et qu'on peut regarder comme les éléments des corps.	Oxygène.	Air déphlogistiqué. Air empiréal. Air vital. Base de l'air vital. Gaz phlogistiqué.
	Azote.	Mofette. Base de la mofette. Gaz inflammable. Base du gaz inflammable.
	Hydrogène.	Soufre.
Substances simples, non métalliques, oxydables et acidifiables.	Phosphore.	Phosphore.
	Carbone.	Charbon pur.
	Radical muriatique.	Inconnu.
	Radical fluorique.	Inconnu.
	Radical boracique.	Inconnu.
	Antimoine.	Antimoine.
	Argent.	Argent.
	Arsenic.	Arsenic.
	Bismuth.	Bismuth.
	Cobalt.	Cobalt.
	Cuivre.	Cuivre.
	Étain.	Étain.
Substances simples, métalliques, oxydables et acidifiables.	Fer.	Fer.
	Manganèse.	Manganèse.
	Mercur.	Mercur.
	Molybdène.	Molybdène.
	Nickel.	Nickel.
	Or.	Or.
	Platine.	Platine.
	Plomb.	Plomb.
	Tungstène.	Tungstène.
	Zinc.	Zinc.
	Chaux.	Terre calcaire, chaux.
Substances simples, salifiables, terreuses.	Magnésic.	Magnésic, base de sel d'Epsom.
	Baryte.	Baryte, terre pesante.
	Alumine.	Argile, terre de falun, base de falun.
	Silice.	Terre siliceuse, terre vitrifiable.



Figura 1. Henry Moseley en el laboratorio Balliol-Trinity de la Universidad de Oxford en 1910

y el empleo de canciones fáciles y no tan fáciles de retener, como la famosa canción *The Elements*, escrita e interpretada por Tom Lehrer,^[12-13] que recientemente se ha presentado según el orden creciente del número atómico, pero con diferente música.^[14]

Con ocasión de conmemorarse en 2015 el centenario de la muerte de Henry Moseley (1887-1915), en el presente trabajo se pretende rendirle un emocionado tributo de gratitud por haber encontrado la clave que permite ordenar los elementos químicos de manera científica y racional, es decir, según el orden creciente de su número atómico. Esta es, sin duda alguna, la propiedad más importante de la materia. Con esta clave los estudiantes de 3.º de ESO y niveles superiores nos guiarán en el aprendizaje de la tabla periódica y colaborarán en nuestra empresa los abogados, que con sus reglas mnemotécnicas nos ayudarán a recordar algunas familias o grupos de elementos. No debe olvidarse, que una de las primeras tablas de elementos químicos se debe al abogado y padre de la química moderna el francés Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794). Data de 1789 y fue publicada en su obra *Traité élémentaire de chimie* (Tabla 1).

En un reciente artículo, Román proponía un nuevo método –una marcha– para que los estudiantes de cualquier nivel de la enseñanza pudieran aprender los nombres de los elementos químicos de la tabla periódica y sus símbolos asociados con sus respectivos números atómicos de una forma sistemática, simple, rigurosa y divertida, acumulando el conocimiento adquirido en cursos inferiores para edificar la base de los cursos superiores.^[3]

¿QUIÉN FUE HENRY MOSELEY?

El 10 de agosto de 1915, en la campaña de Galípoli, la bala de un francotirador turco segaba la vida de Henry Gwyn Jeffreys Moseley (Figura 1), joven físico inglés, que se había alistado voluntario para combatir en la Primera Guerra Mundial en defensa de su patria. Su muerte fue una de las

mayores tragedias para el progreso de la ciencia que tuvo lugar en aquella contienda. Ese mismo año, Moseley había sido presentado por el gran químico sueco y premio Nobel de Química de 1903, Svante Arrhenius (1859-1927), para optar al premio Nobel de Física y de Química independientemente. ¿Qué méritos había alcanzado para ser propuesto a tan importantes galardones científicos con tan sólo 27 años? A finales de 1913 y en los primeros meses de 1914 publicó en *dos partes* el trabajo *The High Frequency Spectra of the Elements*.^[15-16]

Utilizando la recién descubierta espectroscopía de rayos X, Moseley encontró que se producía un aumento de la frecuencia de las líneas K_{α} y K_{β} en los espectros de los elementos. La progresión de la líneas K_{α} y K_{β} podía expresarse como una función del número entero, Z , el número atómico, según la ley de Moseley, $\nu = A(Z - b)^2$, donde ν es la frecuencia de las líneas del espectro de rayos X, Z es el número atómico y A y b son constantes que dependen del tipo de línea (Figura 2). De este modo, ordenó los elementos entre el aluminio y el oro y predijo los que

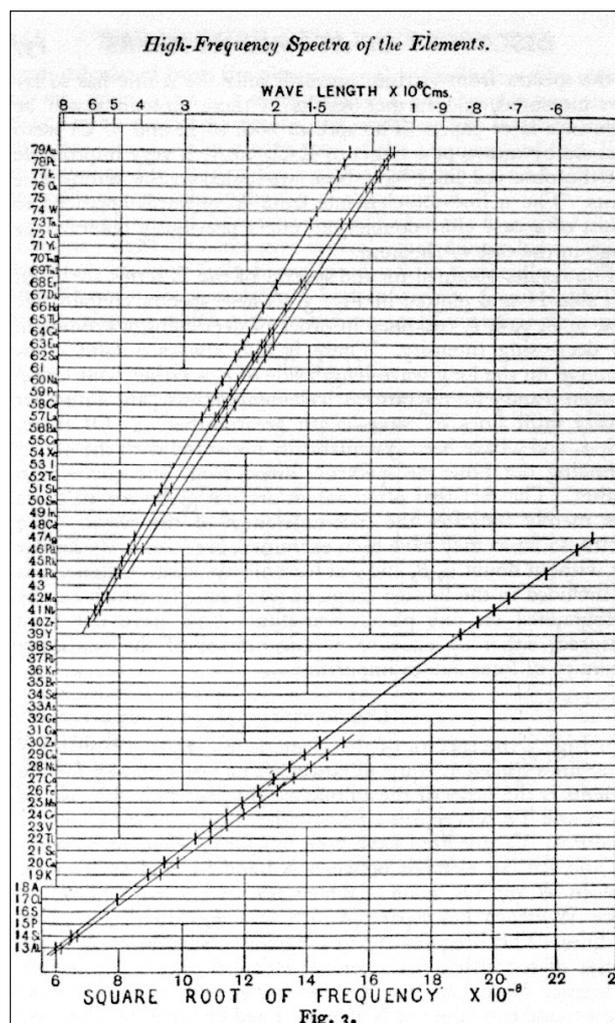


Figura 2. Representación gráfica de la ley de Moseley

todavía no se habían descubierto, como el renio (1925), el tecnecio (1937) y el prometio (1945) y dejó los huecos correspondientes.^[16] Entre paréntesis se indica el año en que fueron descubiertos. Esta ley podía extrapolarse más allá del aluminio y el oro, para convertirse en una ley periódica universal, que resiste el paso del tiempo, y que debe enfrentarse a los descubrimientos de nuevos elementos.

Gracias a Moseley, ahora nadie puede decir que la tabla periódica de los elementos químicos es difícil de aprender y entender. En la actualidad, se conocen 118 elementos químicos y si nos olvidamos de sus nombres se pueden ordenar siguiendo el orden creciente de los números naturales desde el 1 hasta el 118, que se corresponden con sus respectivos números atómicos. El número atómico es el número de protones que tiene un elemento en el núcleo y es igual al número de sus electrones para que el átomo sea eléctricamente neutro.

Para el aprendizaje de la tabla periódica basado en el número atómico vamos a seguir la siguiente estrategia:

1. Construiremos un par de plantillas para alojar a los elementos químicos y fabricaremos las fichas para escribir el número atómico y el nombre y símbolo de cada elemento.
2. Recortaremos las fichas con la ayuda de una tijera para colocarlas en el lugar que les corresponde en la tabla periódica.
3. Con ayuda de reglas mnemotécnicas, trataremos de aprender los nombres y los símbolos de los elementos.

Los pasos 1 y 2 los realizaremos con la ayuda de los estudiantes, mientras que el paso 3 lo desarrollaremos con el apoyo de las reglas mnemónicas que suelen utilizar los abogados para memorizar los artículos del Derecho.

DISEÑO DE LAS PLANTILLAS PARA APRENDER LA TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Dependiendo de la edad de los estudiantes, ellos mismos podrán elaborar las plantillas para obtener la tabla periódica o bien el profesor se las podrá facilitar. Los pasos que hay que seguir son:

1. Con el programa Microsoft Office se prepara una tabla de 9x19 rectángulos recortables (Figura 3). Para ello se toma una hoja DINA4 (210x297 mm) con márgenes superior e inferior de 0,42 cm. y los márgenes derecho e izquierdo de 1 cm. Tipo de letra: Arial negrita. Tamaño: 18 puntos.
2. A partir de la Figura 3 se obtiene la Figura 4 para proceder a su numeración.
3. La columna de la izquierda se numera de arriba abajo del modo siguiente: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 6 y 7 y se indican los signos * y ♦ debajo de las columnas 2 y 3 (Figura 5).
4. Después de la primera columna de la izquierda, las columnas siguientes se numeran del 1 al 18 (véase la Figura 5).

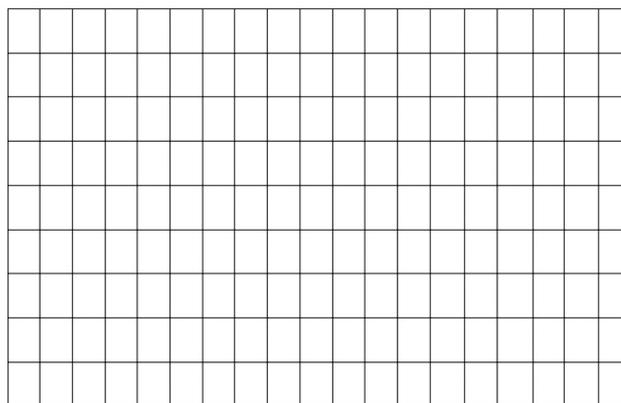


Figura 3. Plantilla para elaborar la tabla periódica de los elementos químicos. Tabla de rectángulos 19x9. Recortable

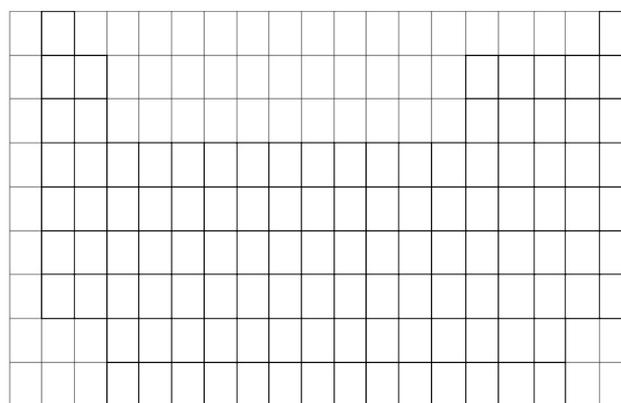


Figura 4. Tabla periódica de los elementos químicos. Elaboración de la tabla

																				18	
1	2																				
2																					
3		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12										
4																					
5																					
6	*																				
7	♦																				
6	*																				
7	♦																				

Figura 5. Tabla periódica de los elementos químicos. Numeración de las filas y columnas de la tabla

5. Se repite la Figura 5 en blanco y negro. Los estudiantes pintarán con lápices de colores las columnas en azul, amarillo, rojo y verde (véase la Figura 6). De esta forma intuitiva se les introduce el concepto de los bloques s, p, d y f, que aprenderán más adelante. Los colores se han elegido según el modelo establecido por Winter en su famosa tabla periódica que aparece en WebElements.^[17]

Figura 6. Tabla periódica de los elementos químicos. Coloreando los bloques de la tabla

- Se utilizará la Figura 5 como plantilla para ubicar los elementos químicos o si se prefiere también puede utilizarse la Figura 6.
- Obsérvese que en la fila 1, solo hay dos elementos en las columnas 1 y 18. En las filas 2 y 3, hay 8 elementos en las columnas 1, 2, 13, 14, 15, 16, 17 y 18. En las filas 4 y 5, hay 18 elementos: uno en cada columna. En la fila 6, hay 32 elementos: 18 en las columnas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18; los 14 restantes (lantanoideos) están debajo (6*). En la fila 7 hay 32 elementos: 18 en las columnas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18; los 14 restantes (actinoideos) están debajo (7♦).
- En la fila 6* hay 14 elementos: los lantanoideos (antes lantánidos).
- En la fila 7♦ hay 14 elementos: los actinoideos (antes actínidos).
- Los elementos se clasifican en 4 grandes bloques: s (azul, 13 elementos), p (amarillo, 37 elementos), d (rojo, 40 elementos) y f (verde, 28 elementos).
- Actualmente se conocen 118 elementos, la IUPAC (siglas en inglés de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) tiene que aprobar el nombre y símbolo de los elementos de número atómico: 113, 115, 117 y 118.
- Las Figuras 3 y 5 se imprimen en tamaño DIN A3 (297x420 mm) para los estudiantes.
- Se recortan los rectángulos (20x27 mm) de la plantilla de la Figura 3 con una tijera para tener todos los elementos. Los rectángulos sobrantes se guardan en una caja.
- Prepárese un tablero de corcho de dimensiones DIN A3 para soportar la plantilla de la Figura 5 con chinchetas de colores azul, amarillo, rojo y verde. Si se utiliza la Figura 6 las chinchetas no tienen por qué ser coloreadas.
- El profesor o la profesora imprimirá las Figuras 3 y 5 en tamaño DIN A2 (297x420 mm) o superior. También preparará un tablero de corcho de este tamaño o superior para soportar las plantillas con el fin de enseñar a sus alumnos donde deben pinchar con chinchetas de colores los rectángulos donde habrán

escrito con su puño y letra los números atómicos en el anverso y el nombre y símbolo de los elementos químicos en el reverso.

- El profesor deberá recordar, cuando lo considere oportuno, que se llaman grupos a los elementos químicos que se ubican en las columnas y períodos a los que se sitúan en las filas.

UN JUEGO DE NIÑOS ¿CÓMO SE JUEGA?

Una vez recortados los rectángulos de los estudiantes (20x27 mm) y los del profesor o la profesora (27x36 mm) donde escribirán los nombres de los elementos químicos y sus símbolos asociados a su número atómico.

Los pasos a seguir son:

- Una vez recortados los rectángulos de los estudiantes o los profesores, en el anverso se numeran diez rectángulos del 1 al 10 con el fin de aprender los primeros diez elementos.
- En el reverso, se escribe el símbolo del elemento correspondiente y su nombre. Es decir, el 1 se asocia con el nombre del hidrógeno y su símbolo H; el 2 con el nombre del helio y su símbolo He y así sucesivamente hasta llegar al 10 con el nombre del neón y su símbolo Ne.
- Cada elemento se sujeta con la chincheta del color correspondiente en la plantilla de la Figura 5 soportada en el tablero de corcho, es decir, 1 (azul), 2 (amarillo), 3 (azul), 4 (azul), 5 (amarillo), 6 (amarillo), 7 (amarillo), 8 (amarillo), 9 (amarillo) y 10 (amarillo).
- Para recordar el color de las chinchetas a utilizar se puede emplear de modelo la tabla periódica de colores sin números, ni nombres, ni símbolos (Figura 6).
- Una vez trabajados y aprendidos los 10 primeros elementos, se pasará a estudiar los elementos comprendidos entre el 11 y el 20.
- Cuando se conozcan estos 20 primeros elementos se jugará con todos ellos. Se repite el procedimiento tantas veces como haga falta hasta llegar al último elemento conocido, el 118.
- Para facilitar el aprendizaje de los nombres y símbolos de los elementos se pueden utilizar reglas mnemotécnicas, canciones y otros recursos didácticos.

LAS REGLAS MNEMOTÉCNICAS DE LOS ABOGADOS

En este proceso del aprendizaje de la tabla periódica, es de gran ayuda la colaboración de los abogados y sus reglas mnemotécnicas. La primera de ellas nos permitirá recordar el nombre de los primeros once elementos, que formarán un equipo de fútbol. Con esta regla recordamos al gran jugador y entrenador de fútbol argentino Helenio Herrera, HH, (1910-1997) de apodo "El mago" que desarrolló su carrera deportiva en Europa (Francia, España e Italia).

- Primera regla. **HH** dijo: “**La BBC NO FuNcioNa**”. Las letras en negritas nos indican total o parcialmente los símbolos de los elementos hidrógeno (H, $Z = 1$), helio (He, 2), litio (Li, 3), berilio (Be, 4), boro (B, 5), carbono (C, 6), nitrógeno (N, 7), oxígeno (O, 8), flúor (F, 9), neón (Ne, 10) y sodio (Na, 11). Se puede observar que de estos once elementos, seis tienen una sola letra como símbolo (H, B, C, N, O y F) y los cinco restantes dos letras (He, Li, Be, Ne y Na). Además, se puede profundizar en el conocimiento del origen de los nombres, su año de descubrimiento, quien fue su descubridor y algunas características físicas: estado físico (gas, líquido o sólido), etc.
- Segunda regla. Los gases nobles tienen unas características muy especiales, entre otras, tienen sus capas electrónicas completas y ocupan el grupo 18. Por ello, es recomendable saber el nombre de estos elementos gaseosos escasamente reactivos o no reactivos. Para recordar estos elementos se puede utilizar la frase: “**Hermano Negro Ármate Kontra la Xenofobia y el Racismo**”. Así, podemos recordar el helio (He, 2), neón (Ne, 10), argón (Ar, 18), criptón (Kr, 36), xenón (Xe, 54) y radón (Rn, 86). El último gas noble coincide con el elemento de número atómico 118 y se llama provisionalmente, según las normas de la IUPAC, ununocio (Uuo). Este grupo de elementos, que se sujetarán con chinchetas de color amarillo, nos sirve de guía para saber cuántos elementos hay en cada período. Este valor se obtiene restando el número atómico de un período al del anterior. Así, entre el Ne y el He hay 8 elementos; entre el Ar y el Ne otros 8; hay 18 elementos entre el Kr y el Ar; así como entre el Xe y el Kr; pero hay 32 elementos entre el Rn y el Xe, al igual que entre el Uuo y el Rn. Los números 2, 8, 18 y 32 tienen un significado especial cuando se asocian con el número de electrones que van ocupando los orbitales s, p, d y f en los diferentes períodos. Además, el valor de Z nos servirá para describir la configuración electrónica de los elementos cuando considere el profesor que este concepto debe ser introducido.
- Tercera regla. Otro grupo significativo de elementos de la tabla periódica es el de los metales alcalinos, es decir, el grupo 1. En la mayoría de las tablas periódicas este grupo de metales está encabezado por el hidrógeno, que es el gas más ligero. La ubicación de este elemento es un problema que todavía está por resolverse de forma definitiva. Para recordar los elementos alcalinos se puede utilizar la siguiente regla mnemotécnica: “**LiNa Ke es Rubia Casó en Francia**”. Se aprecia que con esa sencilla frase se pueden memorizar todos los metales alcalinos: litio (Li, 3), sodio (Na, 11), potasio (K, 19), rubidio (Rb, 37), cesio (Cs, 55) y francio (Fr, 87). De nuevo, si restamos el número atómico de dos elementos consecutivos del grupo 1 de la tabla periódica aparecen los números: 8, 18 y 32.
- Cuarta regla. Los elementos que forman el tercer período (constituído por ocho elementos del 11 al 18) se pueden recordar teniendo en cuenta una sencilla pregunta. ¿Cómo te fue el examen de ayer? **NorMAL. SusPenSo CIARo**. Las letras señaladas en negrita sirven para rememorar los elementos sodio (Na, 11), magnesio (Mg, 12), aluminio (Al, 13), silicio (Si, 14), fósforo (P, 15), azufre (S, 16), cloro (Cl, 17) y argón (Ar, 18).
- Quinta regla. Los 18 elementos comprendidos entre el potasio (19) y el Kr (36) constan de elementos de los bloques s, d y p. La regla mnemotécnica para este conjunto de elementos es la siguiente: “**El Kurdo CaSi TuVo todos los CroMos en la Feria de ColoNia, pero el CuZqueño Ganó en inGenio al SoBrio Kurdo**”. Las letras resaltadas en negrita permiten acordarse de los 18 elementos del cuarto período: potasio (K, 19), calcio (Ca, 20), escandio (Sc, 21), titanio (Ti, 22), vanadio (V, 23), cromo (Cr, 24), manganeso (Mn, 25), hierro (Fe, 26), cobalto (Co, 27), níquel (Ni, 28), cobre (Cu, 29), cinc (Zn, 30), galio (Ga, 31), germanio (Ge, 32), arsénico (As, 33), selenio (Se, 34), bromo (Br, 35) y criptón (Kr, 36).
- Sexta regla. Los diez elementos descubiertos en los últimos años desde el 103 al 112, se pueden memorizar respondiendo a la siguiente pregunta. ¿Qué sabes de Laura y Rafa? **Laura y Rafa Deben Seguir Bien. Hasta el Martes, aDios, Rogelio, Campeón**. Las letras destacadas en negrita permiten recordar los 10 elementos del séptimo período: lawrencio (Lr, 103), rutherfordio (Rf, 104), dubnio (Db, 105), seaborgio (Sg, 106), bohrio (Bh, 107), hassio (Hs, 108), meitnerio (Mt, 109), darmstadtio (Ds, 110), roentgenio (Rg, 111) y copernicio (Cn, 112).
- Otras reglas. Los estudiantes ayudados por sus profesores pueden hallar otras reglas mnemotécnicas para memorizar los elementos de grupos o los de los lantanoides (del 57 al 70) y actinoides (del 89 al 102).

Actualmente, la tabla periódica de los elementos consta de 118 elementos desde el $Z = 1$ (hidrógeno, H) al $Z = 118$ (ununocio, Uuo). Con el descubrimiento del elemento $Z = 117$, el 5 de abril de 2011,^[18] se completaba el período séptimo de la tabla periódica. Para animar a los estudiantes a aprender los nombres de los elementos químicos hay que sugerirles que es muy fácil de asimilar, ya que sólo es necesario saber contar la serie de los números naturales del 1 al 118. A cada número (su número atómico, Z) hay que asociarle un nombre distinto para cada elemento y a cada nombre un símbolo de una, dos o tres letras. De este modo, tomando como guía los números atómicos se pueden ir aprendiendo poco a poco los nombres de los elementos de la tabla periódica en bloques de 4, 5 o 10 versos.

Así, la marcha de los elementos químicos está compuesta por treinta estrofas de cuatro versos amétricos (del $Z = 1$ al $Z = 120$), aunque los elementos 119 y 120 aún no han sido aislados.^[3] En la Tabla 2 se muestran los veinte primeros elementos químicos y el modo de aprenderlos. Cada verso está formado por el número atómico del elemento, junto con su nombre y su símbolo deletreado por las letras

que lo componen. De este modo, quedan asociados en una misma línea el número atómico, el nombre del elemento correspondiente y su símbolo, que permite de una forma sencilla su asociación y memorización.

Se pueden establecer otras divisiones con el fin de lograr un mejor ritmo didáctico en los estudiantes. La aplicación de la música es un buen método para aprender cantando los elementos químicos de la tabla periódica. La música se puede extender a todos los elementos de la tabla periódica. También se pueden asociar los elementos químicos en grupos de cinco o diez versos que se pueden cantar o recitar como si se estuviera aprendiendo la tabla de multiplicar.

Tabla 2. Letra de los primeros veinte elementos químicos en estrofas de diez versos

Marcha de los elementos químicos

Del hidrógeno (Z = 1) al calcio (20)

uno, hidrógeno, hache,
dos, helio, hache e,
tres, litio, ele i,
cuatro, berilio, be e,
cinco, boro, be,
seis, carbono, ce,
siete, nitrógeno, ene,
ocho, oxígeno, o,
nueve, flúor, efe,
diez, neón, ene e.
once, sodio, ene a,
doce, magnesio, eme ge,
trece, aluminio, a ele,
catorce, silicio, ese i,
quince, fósforo, pe,
dieciséis, azufre, ese,
diecisiete, cloro, ce ele,
dieciocho, argón, a erre,
diecinueve, potasio, ka,
veinte, calcio, ce a.

Una vez aprendidos los nombres de los elementos en la lengua materna es muy difícil que se olviden por lo que se pueden recordar con facilidad los nombres de los elementos químicos o ampliar su número en los cursos siguientes. Tras una adecuada planificación, es posible que todos los estudiantes de un mismo nivel hayan adquirido el conocimiento de los nombres de los elementos químicos y sus símbolos asociados con sus respectivos números atómicos de una forma agradable: a través del juego. Los profesores pueden estimular a sus estudiantes fomentando la creatividad de nuevos ritmos para su aprendizaje.

La ventaja que ofrece este método es que puede ser utilizado para aprender a contar y conocer los nombres de los elementos químicos y deletrear sus símbolos en otros idiomas con un mínimo esfuerzo. Además, cada estudiante o grupo de estudiantes junto con sus profesores pueden utilizar otros ritmos como el rap, canciones infantiles o populares, cantos regionales u otras músicas de fácil recuerdo.

Este método no sólo es válido para los jóvenes estudiantes, también es de utilidad para todas aquellas personas interesadas “tengan o no relación con la Química” en mejorar su memoria tratando de aprender los nombres de los elementos químicos y sus símbolos y sus respectivos números atómicos. El conocimiento de la tabla periódica de los elementos químicos puede servir para encriptar o codificar algunos números. Por ejemplo, si una persona aparca su automóvil en un aparcamiento público en la plaza de número 1117, puede anotar en su tarjeta NaCl (11 = Na, 17 = Cl) para recordar el número donde se encuentra su vehículo. También puede utilizarse este método para recordar la clave o pin de su tarjeta bancaria.

Cuando se conoce la tabla periódica de los elementos se pueden afrontar retos como el que propone Merck a través de su juego educativo e interactivo (Figura 7) para aprender química y ejercitar la memoria.^[19] Son diez ejercicios interactivos donde la puntuación se obtiene por cada respuesta acertada mientras el reloj va avanzando. Cuanto antes se responde, la puntuación se ve incrementada por la bonificación temporal. El ejercicio número diez es el más interesante, porque además de saber las relaciones que existen entre los doce elementos que aparecen ocultos hay que ejercitar la memoria para identificar las seis parejas de elementos que se proponen en este ejercicio antes de que se agote el tiempo. Sé que este es un juego educativo que engancha a los estudiantes de química porque lo he experimentado con mis alumnos y les produce una gran satisfacción cuando alcanzan cuatro mil o más puntos.



Figura 7. Tabla periódica de los elementos de Merck. Juego interactivo para aprender química

CONCLUSIONES

El uso de los juegos infantiles junto con la habilidad que han adquirido los estudiantes de contar con soltura la serie de los números naturales, que coincide con el orden creciente del número atómico, les permite completar la tabla periódica de los elementos químicos. La identificación del número atómico con el nombre del elemento y

su símbolo, permitirá al profesor reforzar la idea de que la propiedad esencial de la materia es el número atómico. Este es inmutable para cada elemento –todos los isótopos de un mismo elemento tienen el mismo número atómico–, mientras que el nombre del elemento puede ser uno u otro según a quien se lo atribuya la IUPAC. Por ejemplo, los nombres de los elementos 113, 115, 117 y 118 se deben conceder todavía. Sin embargo, ya sabemos con antelación que se asignarán a los cuatro números atómicos referidos, aunque desconozcamos de momento sus nombres y símbolos definitivos.

Los abogados mediante el empleo de reglas mnemotécnicas pueden ayudar a recordar familias y grupos de elementos, para de este modo memorizar los nombres y símbolos de los elementos químicos. Los profesores pueden estimular a sus alumnos implicándoles en la creación de nuevas reglas mnemotécnicas y sugerirles que entre los elementos de cada grupo hay propiedades físicas y químicas comunes, como las hay en literatura entre distintos escritores que pertenecen a un mismo movimiento literario.

La historia de la Revolución Francesa y la I Guerra Mundial se pueden introducir en el momento que lo desee el profesor para recordar a dos grandes científicos: al abogado y químico francés Lavoisier –padre de la química moderna (1789)– y al físico británico Moseley (1913-1914) –el otro padre de la tabla periódica moderna junto con el químico ruso Mendeléiev (1869)–. Aquí el profesor puede mostrar a sus alumnos, cuál es la diferencia entre las aportaciones de Mendeléiev y Moseley, así como la importancia de la Física en la definición de la actual tabla periódica de los elementos químicos.

Una vez asimilada la tabla periódica de todos los elementos se pueden afrontar algunos retos como el que propone la compañía Merck en su página web^[19] a través de un juego interactivo para aprender química de una forma sencilla y que engancha a los estudiantes hasta conseguir su propia marca.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Román Polo, XXXI Reunión Bienal de la RSEQ, Com. G9-O2, **2007**, p. 221.
- [2] P. Román Polo, Jornada sobre “Aprendizaje activo de la Física y la Química”, **2007**, 35-42, <http://bit.ly/oIrMdH>, visitada el 27/07/2015.
- [3] P. Román Polo, *An. Quím.*, **2011**, 107 (3), 262-265.
- [4] P. Román Polo, XXXV Reunión Bienal de la RSEQ, Com. S4-OC-03, **2015**, p. 237.
- [5] C. Olive, D. Riffont, *J. Chem. Educ.* **2008**, 85, 1489.
- [6] J. R. Hara, G. R. Stanger, D. A. Leony, S. S. Renteria, A. Carrillo, K. Michael, *J. Chem. Educ.* **2007**, 84, 1918.
- [7] T. Chambers, J. Arab, *J. Chem. Educ.* **2006**, 83, 1761.
- [8] M. N. Quigley, *J. Chem. Educ.* **1992**, 69, 138-140.
- [9] W. Covey, *J. Chem. Educ.* **1988**, 65, 1089.
- [10] L. W. Clark, *J. Chem. Educ.* **1959**, 36, 57.
- [11] T. J. Cossairt, W. T. Grubbs, *J. Chem. Educ.* **2011**, 88, 841-842.
- [12] T. Lehrer, Música de *The Elements*, <http://bit.ly/oOoT3m>, visitada el 27/07/2015.
- [13] T. Lehrer, Letra de *The Elements*, <http://bit.ly/qctu3C>, visitada el 27/07/2015.
- [14] AsapSCIENCE, The New Periodic Table Song (Updated), <http://bit.ly/1NlrRgm>, visitada el 27/07/2015.
- [15] H. G. J. Moseley, *Philos. Mag.*, **1913**, 26 (156), 1024-1034.
- [16] H. G. J. Moseley, *Philos. Mag.*, **1914**, 27 (157-62), 703-713.
- [17] M. Winter, WebElements periodic table, <http://www.webelements.com>, visitada el 27/07/2015.
- [18] Y. Ts. Oganessian, F. Sh. Abdullin, P. D. Bailey, D. E. Benker, M. E. Bennett, S. N. Dmitriev, J. G. Ezold, J. H. Hamilton, R. A. Henderson, M. G. Itkis, Yu. V. Lobanov, A. N. Mezentsev, K. J. Moody, S. L. Nelson, A. N. Polyakov, C. E. Porter, A. V. Ramayya, F. D. Riley, J. B. Roberto, M. A. Ryabinin, K. P. Rykaczewski, R. N. Sagaidak, D. A. Shaughnessy, I. V. Shirokovsky, M. A. Stoyer, V. G. Subbotin, R. Sudowe, A. M. Sukhov, Yu. S. Tsyganov, V. K. Utyonkov, A. A. Voinov, G. K. Vostokin, P. A. Wilk, *Phys. Rev. Lett.* **2010**, 104, 142502 (1-4).
- [19] Tabla periódica de los elementos de Merck. Juego interactivo, <http://bit.ly/1LTHNw2>, visitada el 27/07/2015.

Entrega de Premios y Distinciones 2015 de la RSEQ

El pasado día 20 de noviembre tuvo lugar la entrega de los Premios de la RSEQ del presente año 2015, en sus modalidades de Medalla de la RSEQ, Premios a la Excelencia Investigadora y Premio de Divulgación. En el mismo acto se entregaron las distinciones a los socios con al menos cincuenta años vinculados a la RSEQ, una iniciativa que comenzó el pasado año y que tendrá continuación en años sucesivos.

El acto fue presidido por Marina Villegas, Directora General de Investigación del MINECO, junto con José Manuel Pingarrón (Vicerrector de Transferencia del Conocimiento y Emprendimiento), M.^a Jesús Martínez (Directora del CIB-CSIC), Jesús Jiménez-Barbero (Presidente de la RSEQ) y José Manuel González (Secretario General de la RSEQ). El profesor Luis Castedo pronunció unas palabras de agradecimiento en nombre de los socios con más de 50 años de servicio a la RSEQ. La sesión finalizó con la impartición de la conferencia “Nosotros creamos Química” por Fernando Montil, de BASF. El acto tuvo lugar en el Salón de Actos del Centro de Investigaciones Biológicas del CSIC en Madrid.

Los Premios del año 2015 han sido concedidos a:

MEDALLA DE LA RSEQ (PATROCINADA POR BRUKER ESPAÑOLA)

Profesor José Luis Mascareñas Cid Centro Singular de Investigación en Química Biológica y Materiales Moleculares, Universidad de Santiago de Compostela (CIQUS-USC).

PREMIOS A LA EXCELENCIA INVESTIGADORA

- Profesor a Nuria López Alonso, Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ). Premio patrocinado por CEPESA.
- Profesor Rubén Martín Romo, Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ). Premio patrocinado por la RSEQ.
- Profesor Kilian Muñoz Klein, Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ). Premio patrocinado por Janssen Cilag.
- Profesora Concepció Rovira Angulo, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB-CSIC). Premio patrocinado por la RSEQ.
- Profesor Félix J. Zamora Abanades, Universidad Autónoma de Madrid, (UAM). Premio patrocinado por BASF.

PREMIO DIVULGACIÓN (PATROCINADO POR LA RSEQ)

Doña María Luisa Prolongo Sarria, I.E.S. Manuel Romero. Villanueva de la Concepción, Málaga.



Mesa Presidencial (de izquierda a derecha: Jesús Jiménez Barbero (Presidente de la RSEQ), José Manuel Pingarrón (Vicerrector de Transferencia del Conocimiento y Emprendimiento de la UCM), Marina Villegas (Directora General de Investigación del MINECO), M.^a Jesús Martínez (Directora del CIB-CSIC) y José Manuel González (Secretario General de la RSEQ)



Entrega de la Medalla de la RSEQ al profesor José Luis Mascareñas Cid (CIQUS-USC). Entregan el premio Jesús Jiménez Barbero (presidente de la RSEQ) y Víctor Pidal (Bruker Española)

PREMIOS RSEQ 2015 DE EXCELENCIA Y DIVULGACIÓN



Doctora Nuria López. Entregan el premio: Federico Bonet (CEPSA) y Marina Villegas (MINECO)



Doctor Rubén Martín. Entregan el premio: María Jesús Martínez (CIB-CSIC) y José Manuel Pingarrón (UCM)



Doctor Kilian Muñoz. Entregan el premio: Jesús Jiménez (RSEQ) y Javier Fernández Gadea (JANSSEN)

JANSSEN-CILAG S.A.



Doctora Concepció Rovira. Entregan el premio: Marina Villegas (MINECO) y Jesús Jiménez Barbero (RSEQ)



Doctor Félix Zamora. Entregan el premio: José Carracedo (BASF) y María Jesús Martínez (CIB-CSIC)



Doña María Luisa Prolongo. Premio a la divulgación. Entrega el premio: José Manuel Pingarrón (UCM)

DISTINCIÓN A LOS SOCIOS CON 50 AÑOS DE SERVICIO

Antonio	Bello Antón	Consuelo	López Zumel
Luis	Castedo Expósito	Ramón	Mestres Quadreny
Antonio	Cobo Guzmán	Guillermo	Munuera Contreras
José	Costa López	Juan	Sancho Rof
Agustín	Escardino Benlloch	Amelia	Santos Macias
Daniel	Escolar Méndez	Alfredo	Vara del Campo
Concepción	Fernández Sánchez	Santiago	Vicente Pérez
Enrique	Galvez Ruano		



El profesor Luis Castedo Expósito pronunciando unas palabras de agradecimiento en nombre de los socios con 50 años en la RSEQ

XII Simposio de Investigadores Jóvenes de la Real Sociedad Española de Química Sigma-Aldrich

Del 3 al 6 de noviembre de 2015, Barcelona fue la sede de la 12.^a edición del Simposio de Investigadores Jóvenes de la RSEQ Sigma-Aldrich (XII-SIJ). El congreso representa el punto de unión del grupo especializado de Jóvenes Investigadores Químicos (JIQ-RSEQ) que este año 2015 se ha consolidado como el segundo en número de socios dentro de la RSEQ. Como cada año, el congreso está dirigido a investigadores de todas las áreas de la química menores de 40 años, pretende fomentar la difusión de la investigación realizada por los jóvenes químicos, favorecer la creación de redes de investigación entre los jóvenes y fomentar la interdisciplinariedad de la química del siglo XXI. El simposio se ha celebrado en pleno centro de Barcelona en la Residencia de Investigadores del CSIC y los asistentes han podido disfrutar tanto del nivel científico de las charlas como de la visita al Ayuntamiento de Barcelona durante la primera tarde del congreso. El comité organizador agradece la alta participación, manteniendo el número de participantes de la anterior edición, que se ha podido satisfacer gracias al apoyo económico de varias entidades privadas.

Durante el simposio se entregan los premios RSEQ Sigma-Aldrich que este año han sido otorgados a los doctores Moisés Gulías Costa (Universidad de Santiago de Compostela), Julio Lloret Fillol (Instituto Catalán de Investigación

Química), Carlos Martí Gastaldo (Universidad de Valencia) y Rocío Ponce Ortiz (Universidad de Málaga). También han sido otorgados los premios SusChem-Mestrelab-JIQ al doctor Antonio Jesús Martínez Martínez (Universidad de Strathclyde), en la categoría postdoc; y a Cayetana Zárata Sáez (Instituto Catalán de Investigación Química), en la categoría predoc.

Los participantes al congreso han podido presentar sus trabajos de investigación a través de las ponencias invitadas a cargo de los premiados, ponencias *hot topic*, comunicaciones orales, comunicaciones flash y pósters. Con la adición de las comunicaciones flash, un 70% de los asistentes han tenido la oportunidad de presentar en formato charla su investigación. Como novedad de la 12.^a edición, el taller de empresas ha sido renovado y los asistentes han podido disfrutar de charlas a cargo de Rebecca Brodie (Royal Society of Chemistry), Miriam Plana (SciFinder), Enrique Sánchez (Mestrelab), Bernardo Herradón (Instituto de Química Orgánica General y divulgador científico) y Elisabet Prats (Instituto de Microelectrónica de Barcelona y miembro de Big Van, Científicos sobre Ruedas). Des del comité organizador del XII-SIJ, muchas gracias a todos ellos por su participación y a todos los asistentes por hacer de esta edición, de nuevo, un éxito a nivel científico.



Los participantes al congreso en la Residencia de Investigadores del CSIC

Premio “Emerging Research Award 2015”

Nuestro compañero de la RSEQ y profesor de la Universidad de Alicante, Javier García Martínez, ha sido galardonado con el “Emerging Research Award 2015” que concede la Division of Energy and Fuels de la American Chemical Society. La entrega de este galardón coincidió con la reunión anual de esta sociedad el pasado mes de agosto en Boston, EE. UU. Este premio está destinado a reconocer a jóvenes científicos en etapas tempranas de su carrera que hayan realizado destacadas contribuciones en ciencia básica o aplicada a través de publicaciones, patentes o comercialización de nuevas tecnologías. Ha sido precisamente el trabajo pionero de Javier en el área de las zeolitas mesoporosas y su aplicación a la producción más eficiente de combustibles lo que le ha merecido este importante reconocimiento.

Javier fundó la empresa Rive Technology (www.rivetech.com) durante su etapa postdoctoral en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) para comercializar nuevos catalizadores de refino de petróleo basados en zeolitas mesoporosas. Desde 2012, los catalizadores que comercializa Rive Technology se utilizan en varias refinerías de EE. UU. aumentando sensiblemente la producción de gasolina y diésel así como la eficiencia del proceso. Se trata del primer químico español que recibe este galardón de American Chemical Society.

El profesor García Martínez es actualmente el Director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante (www.nanomol.es) donde trabaja en la aplicación de nuevos nanomateriales en la producción



y almacenamiento de energía. Javier es inventor de 20 patentes, la mayoría en aplicación comercial, y autor de un buen número de artículos y libros científicos siendo los más recientes *Mesoporous Zeolites* Wiley-VCH (2015) y *Chemistry Education* Wiley-VCH (2015).

La trayectoria de Javier ha sido reconocida con varios premios importantes. Cabe destacar el Premio Rey Jaime I en su categoría de Nuevas Tecnologías (2014). El profesor García Martínez es miembro del Consejo de Tecnologías Emergentes del Foro Económico Mundial, de la Global Young Academy y del Bureau de la IUPAC. Nuestra felicitación a Javier por este premio.

Homenaje al profesor Luis Oro con motivo de su 70 cumpleaños

El pasado viernes 27 de octubre tuvo lugar, en el Salón de Actos del edificio Paraninfo de la Universidad de Zaragoza, el homenaje al profesor Luis Oro con motivo de su 70 cumpleaños y su nombramiento como Profesor Emérito. El acto, presidido por el profesor Manuel J. López Pérez (Rector de la Universidad de Zaragoza), contó con las intervenciones de el doctor Fernando J. Lahoz (Director del Instituto de Síntesis Química y Catálisis Homogénea, ISQH), el doctor Luis Griol (Decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza), el doctor Victor Orera (en representación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC) y Doña Pilar Alegría (Consejera de Innovación, Investigación y Universidad del Gobierno de Aragón).

En estas intervenciones se recordaron, además de sus facetas más humanas y su brillante trayectoria científica en el área de la química organometálica, su importante contribución en labores de gestión (especialmente entre los años 1988 y 1994). Se destacó su implicación y compromiso en política científica en esa época, que resul-

taron determinantes en impulsar la Ciencia en España, a través de la creación de estructuras para la gestión de la ciencia hasta entonces inexistentes, situando a España entre las 10 mejores organizaciones del mundo en cuestión de producción científica, tal y como apuntó el doctor Victor Orera.

El acto contó también con la participación del profesor Avelino Corma (Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2014), del Instituto de Tecnología Química (Valencia), y del profesor Jesús Jiménez Barbero, Director del CIC BioGUNE (Bilbao) y Presidente de la RSEQ, que impartieron sendas conferencias divulgativas sobre sus temas de investigación, y con la intervención del profesor Ginés Morata (Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2007), amigo personal del homenajeado, que destacando de nuevo sus labores de gestión en política científica atribuyó al profesor Oro ser “Responsable de la Época de Oro de la Ciencia Española”.



Homenaje al profesor Luis Oro

Finalmente el acto se clausuró con unas emotivas palabras del Emérito Profesor, y con la intervención del Rector de la Universidad de Zaragoza que describió al profesor

Oro como “creador de ciencia, de escuela, de sistema y de historia científica en España”.

Acto de entrega de la Cuarta Edición de los Premios de Investigación GEPRONAT 2014 del Grupo Especializado de Química de Productos Naturales de la RSEQ

Durante la celebración XXXV Reunión Bienal de la RSEQ en el PALEXCO en A Coruña, y dentro del Simposio de titulado “Productos Naturales en la señalización química en sistemas biológicos” que tuvo lugar el 20 de julio de 2015, se procedió al acto de entrega de los premios de investigación GEPRONAT 2014. Dicho acto fue presidido por el Presiden-

te de la Real Sociedad Española de Química, don Jesús Jiménez Barbero, al que acompañaron el Presidente del Grupo Especializado de Química de Productos Naturales (GEPRONAT), el doctor Carlos Jiménez González, y el doctor José Javier Fernández Castro Vicepresidente del Grupo. Estos premios pretenden promover la investigación científica de



Mesa presidencial, de izquierda a derecha: Carlos Jiménez González (Presidente del Grupo Especializado de Química de Productos Naturales), Jesús Jiménez Barbero (Presidente de la RSEQ) y José Javier Fernández Castro (Vicepresidente del Grupo)

calidad y la innovación en el área de productos naturales (PN), así como premiar la labor científica individual de sus investigadores que por su trayectoria científica de excelencia hayan destacado en la investigación en algunas de las facetas de la química y de la transferencia de tecnología al sector industrial en química de PN.

En primer lugar, se hizo entrega del premio al investigador nobel en Química de Productos Naturales que fue otorgado a la **doctora María Pérez Bosch**. La doctora Pérez Bosch se doctoró en 2002 por la Univ. de Barcelona, con mención europea fruto de dos estancias en la Univ. degli Studi di Milano. Es profesor Asociada en la Facultad de Farmacia de la UB y ocupa una plaza de Técnico Superior de Investigación vinculada al grupo de los profesor es Joan Bosch y Mercedes Amat. Ha publicado 33 artículos científicos, es coautora de un capítulo de libro en la colección *The Alkaloids: Chemistry and Biology* y ha codirigido 4 tesis doctorales.

A continuación, se procedió a la entrega del Premio a la innovación en investigación en química de PN al doctor **Antonio Hernández Daranas**. El doctor Antonio Hernández se doctoró por la Univ. de La Laguna en el campo de los PN de origen marino. Ha trabajado en laboratorios de las Univ. de Rhode Island, Leeds y el Imperial College London. Ha publicado más de 50 trabajos de investigación. Actualmente trabaja como investigador contratado en el Centro de Investigaciones Biomédicas de Canarias donde estudia la estructura y bioactividad de metabolitos marinos utilizando RMN y profiling metabólico.

Después, tuvo lugar la entrega del premio a la transferencia de tecnología al sector industrial y a la creación de EBT'S a la doctora **Carmen Cuevas Marchante**. Licenciada en Ciencias Químicas y Doctora en Química Orgánica por la Univ. del País Vasco bajo la dirección del doctor Claudio Palomo. Estudios postdoctorales en el Departamento de Farmacología de la Universidad de Alcalá de Henares y Master Degree (PDD) por el IESE. Se incorporó a PharmaMar en 1997. Desde entonces ha ocupado distintos puestos de responsabilidad en el área de I+D. En 2003 fue promocionada a su actual puesto, que incluye las áreas de Descubrimiento de Fármacos, Química Médica, Preclínica y Propiedad Industrial. Autora de más de 100 publicaciones científicas y 30 solicitudes de patentes. Entre otros logros de innovación en el campo de los PN hay que resaltar que la es la responsable del desarrollo del innovador proceso de síntesis en escala de Yondelis. Participa habitualmente como conferenciante en universidades y centros especializados.

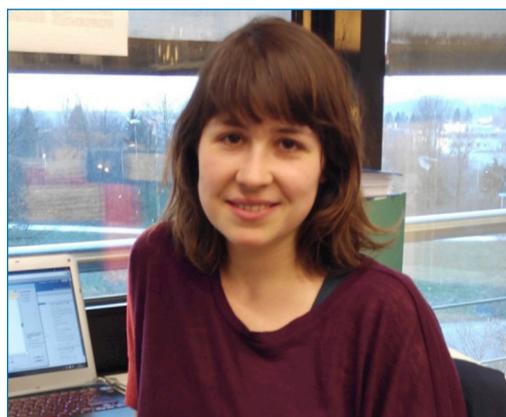
Seguidamente, se procedió a la entrega del premio a la excelencia en la investigación en química de productos naturales al profesor **Alejandro Fernández Barrero**. Como deferencia al galardonado, teniendo en cuenta que ha sido primer presidente del Grupo y uno de los principales im-

pulsores de su fundación, se le entregó una medalla de oro en vez de la de plata.

El doctor Alejandro Fernández Barrero es Doctor en Química por la Univ. de Salamanca (1975). Después de trabajar como Jefe del Laboratorio de Química Orgánica del Centro de I+D de CEPESA en Torrejón de Ardoz (1977-78), retornó a la USAL como Profesor Adjunto en la Facultad de Farmacia durante los años 1978-1983. Desde entonces es Catedrático de la Univ. de Granada, donde ha sido Director del Dpto de Química Orgánica. Experto en Química de PN ha sido co-fundador, Presidente y Vicepresidente del GEPRO-NAT de la RSEQ. Ha publicado alrededor de 250 artículos científicos y varios capítulos de libro, y ha dirigido 50 Tesis Doctorales. Editor de un número especial sobre Terpenoides en la revista *Molecules* y otro sobre Síntesis de PN en *Natural Product Communications*. Es miembro del Consejo Editorial de *Current Organic Chemistry* y Editor de *NPC*. Es coinventor en una decena de patentes de aplicación, en el ámbito de los terpenoides de interés industrial. Ha impulsado la transferencia de resultados de I+D hacia el Sector Industrial, dando lugar a la empresa BIOFLOW SUR y ha sido Asesor Científico y colaborador de varias empresas de Biotecnología y Química Fina.

Además, dentro del mismo acto se comunicó el resultado del premio a la mejor Tesis Doctoral en Química de Productos Naturales que recayó en la doctora **Adriana Lorente Crivillé** cuya Tesis Doctoral ha sido dirigida por la doctora Mercedes Álvarez y el doctor Fernando Albericio. Estudió química y el máster en química orgánica avanzada en la UB. Posteriormente, realizó su tesis doctoral por la UB en el IRB Barcelona, en el departamento de Química y farmacología molecular. Actualmente es investigadora postdoctoral en la Universidad de Zúrich.

El acto se cerró con la intervención del Presidente del Grupo Especializado y unas palabras de clausura del doctor Jiménez Barbero, Presidente de la RSEQ.



Premio Mejor Tesis Doctoral, Adriana Lorente Criville

Antonio Aldaz Riera (1943-2015)

El 27 de octubre falleció a los 72 años el profesor Antonio Aldaz Riera. Nacido en 1943 en Murcia, se licenció en Ciencias Químicas en 1965. Al acabar la licenciatura, entró como profesor ayudante en la Universidad de Murcia, donde realizó su tesis doctoral bajo la dirección del profesor Juan Sancho Gómez sobre el comportamiento polarográfico de los iones Y(III) y Sc(III) en diversos disolventes. Una vez leída la tesis en 1968, y tras un breve periodo como catedrático de instituto que le permitió reafirmar su vocación investigadora, pasó a ser profesor adjunto de la recién fundada Universidad Autónoma de Madrid, donde estuvo hasta 1971. En ese año ganó las oposiciones de catedrático de universidad, incorporándose como profesor agregado a la Universidad de Sevilla. En 1977 regresa a la Universidad Autónoma de Madrid como catedrático de universidad y en 1981 se traslada a la Universidad de Alicante donde se jubila en 2013 pasando a ser profesor emérito.

Durante su larga trayectoria científica trabajó en casi todas las áreas de la Electroquímica. Publicó más de 300 artículos en revistas internacionales, fue coautor de 14 patentes nacionales e internacionales y director de 30 tesis doctorales, dejando tras él un gran número de discípulos en las universidades donde trabajó. Precisamente, los títulos de las tesis doctorales dirigidas permiten hacer una evolución histórica de la investigación en Electroquímica en España. En las décadas del 1950 y 1960, los estudios de procesos electroquímicos se realizaban principalmente sobre electrodos de mercurio, dada la excelente reproducibilidad de los mismos. Es ahí donde centra sus primeros trabajos como investigador, en su propia tesis doctoral y en la primera tesis que dirigió. En 1972, siendo ya catedrático, tiene lugar un hecho importante en su carrera y que probablemente marcó su trayectoria posterior: en ese año obtuvo una beca de la fundación Juan March para estudios en el extranjero, realizando una estancia de 9 meses en el Laboratoire d'Electrolyse del CNRS en Meudon (Francia), uno de los referentes mundiales de la investigación en Electroquímica en aquellos años. En esa estancia, se introdujo en el estudio de la Electrocatalisis en electrodos sólidos, implantando de forma pionera esa línea de investigación en



España. A partir de su llegada a la universidad de Alicante, diversifica sus líneas de investigación realizando estudios tanto fundamentales como aplicados en colaboración con empresas de baterías redox, de electrosíntesis orgánica, de ingeniería electroquímica y de tratamiento de efluentes por métodos electroquímicos. Una de las líneas que más éxitos aportó a su grupo de investigación en la Universidad de Alicante fue la de los estudios en electrodos monocristalinos y vino a través de los contactos existentes con el Profesor Clavilier del laboratorio de Meudon, donde había hecho su estancia y con el que desarrolló una fructífera colaboración que duró hasta el final. Por otra parte, y tal vez en el extremo opuesto de la escala de la investigación, el profesor Aldaz se sentía orgulloso de haber podido impulsar el que la Universidad de Alicante fuera pionera en el desarrollo de procesos electroquímicos a nivel de planta piloto-preindustrial, lo que, sin duda, resultó ser innovador

en la universidad española y acercó más la Electroquímica al mundo industrial. En los últimos años, sus esfuerzos se centraron en trasladar las metodologías empleadas en los electrodos sólidos policristalinos y monocristalinos a los estudios con nanopartículas metálicas. Su trabajo recibió numerosos premios y distinciones, destacando el premio de la Real Sociedad Española de Química en Química-Física 2002, el premio Solvay-CEOE a la Investigación Química 2004 y el premio CIDETEC a la trayectoria científica en Electroquímica 2013, además de ser Fellow de la International Society of Electrochemistry, un honor reservado a menos del 5% de los miembros de la citada sociedad.

Como docente, con su aire de científico despistado, siempre intentó trasladar a sus alumnos una visión distinta de la Electroquímica, tratando de espolear su curiosidad y su sentido crítico y diseñando experimentos y problemas que permitiesen entender los conceptos básicos. Fue autor de un libro docente de Electroquímica, además de varios capítulos en obras conjuntas sobre el tema, que daban una visión alternativa de la Electroquímica. Los que tuvimos la suerte de trabajar con él admirábamos siempre sus vastos conocimientos de la Electroquímica y sobre todo su gran espíritu crítico, que le llevaba a cuestionar cualquier verdad establecida y examinarla bajo enfoques no convencionales. Al preguntarle cualquier duda científica, la tormenta de ideas que generaba permitía aclarar la duda, pero creaba en su interlocutor otras dudas adicionales en con-

ceptos que aparentemente daba por sentados, estableciéndose entonces una dialéctica enriquecedora que permitía aprovechar todos sus conocimientos.

Como compañero y jefe, no hay palabras para definirlo: cercano, preocupado, atento y sensible a cualquier situación en la que pudiera aportar su ayuda y su compromiso. Pero, además, Toni supo dedicar siempre una parte de su tiempo a atender a cualquier investigador o grupo de investigación que llamó a su puerta. Siempre con el espíritu abierto de quien quiere colaborar y aportar sus conocimientos en pro del avance científico. En ese sentido, fue un incansable defensor de la Electroquímica como disciplina útil y necesaria para la sociedad. Eso es hoy evidente si pensamos en el desarrollo de baterías, pilas de combustible, sensores, etc. Su conocimiento y visión global han permitido marcar directrices de trabajo útiles plantear proyectos de investigación en problemas de interés abordables y actuales. En resumen, Toni fue un verdadero "maestro" de la Electroquímica: investigador, docente y divulgador. No nos queda más que rendir homenaje a una figura cuyo recuerdo y estela deben siempre perdurar en el acervo científico y humanista de la Electroquímica Española.

VICENTE MONTIEL LEGUEY
ENRIQUE HERRERO RODRÍGUEZ
JUAN M. FELIU MARTÍNEZ
Instituto de Electroquímica,
Universidad de Alicante

José Ignacio Escudero, *Manual de Nomenclatura Química. Historia, Formulación y Nomenclatura de las Principales Especies Químicas*, Quinquerreme Editores, 2013. 324 págs. Esta obra está escrita en castellano y pertenece a la disciplina de la Química.

ANTECEDENTES DEL AUTOR

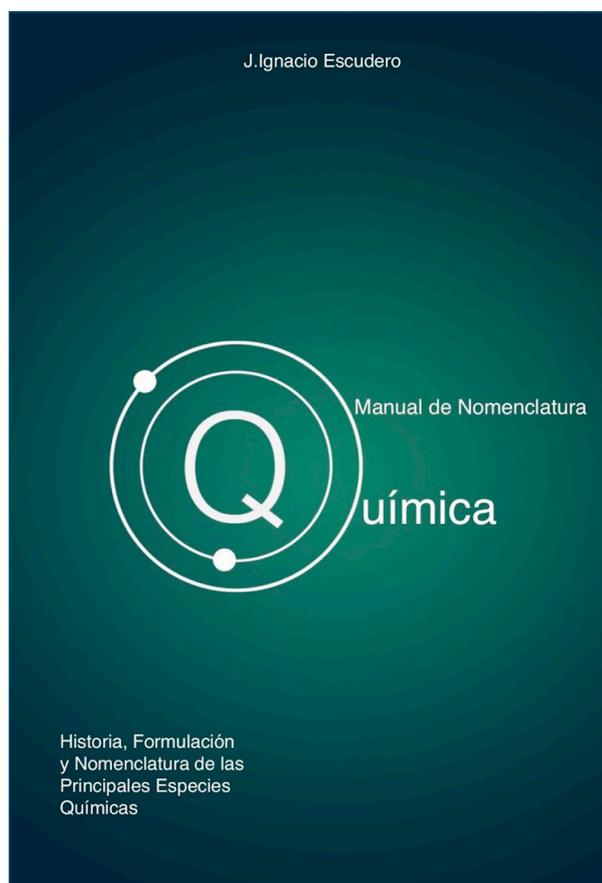
José Ignacio Escudero Molina nació en diciembre de 1957. Es Ingeniero Técnico Forestal. Ha realizado trabajos de prevención y extinción de incendios y labores de repoblación forestal. Es profesor de Física y Química de enseñanza secundaria desde 1989.

FUENTE UTILIZADAS

El autor utiliza unas 50 fuentes literarias, la mayoría de ellas libros o manuales, la bibliografía abarca desde el año 1788 hasta el 2010. Para la primera parte del libro esta bibliografía está más enfocada en formulación. Se pueden destacar entre otras fuentes literarias utilizadas las siguientes: *Nomenclatura y Formulación. Normas de la IUPAC. Química Inorgánica. Química orgánica*, Edelvives 2004 (hay que tener en cuenta que el año 2005 la IUPAC propuso nuevas normas de formulación y nomenclatura de sustancias inorgánicas. Dichas normas fueron traducidas al español en el año 2007 por Miguel A. Ciriano, España, y Pascual Román Polo, España. C-e: mciriano@unizar.es). *Introducción a la nomenclatura de las sustancias químicas*. W. R. Peterson Ed. Reverté, Barcelona, 2010. *Manual de Química orgánica*. Hans Beyer, Wolfgang Walter Ed. Reverté, Barcelona, 1987. *The origin of chemical names*. W. E. Flood. Londres, 1963. *Lecciones elementales de Química*, Ed. Fascimil Extramuros, Sevilla, 2007. *Rocas y minerales*. Ronald Louis Bonewitz. Ed. Omega. Barcelona, 2009.

MÉTODO DE TRABAJO

El autor ha utilizado una recopilación de apuntes de clase que ha ido ampliando con el tiempo. Divide el libro en dos partes: en la primera “intenta mantener el formato de un manual de formulación al uso”; en la segunda “describe todas las sustancias usadas en la primera parte atendiendo a



Autor: José Ignacio Escudero
Páginas: 324
ISBN: 978-84-15861-04-1
Publicación: 2013

su uso más común y a su importancia histórica”. Trata de clasificarlas etimológicamente porque esa etimología relaciona más fácilmente unas sustancias con otras y eso, según el autor, añade un valor pedagógico.

PROPÓSITO

Tiene la finalidad de crear una obra relajada, presentando una visión general de las especies químicas basada en relaciones lógicas o históricas. Supone que el lector del libro

tiene que tener unos conocimientos mínimos de química, “nivel de enseñanza secundaria” y pretende que el lector no tenga que leer el texto completo ya que la lectura continuada según el autor resulta repetitiva. La primera parte carece de ejercicios para practicar formulación, el autor solo pretende usar el libro como guía. Clasifica las sustancias según su “fama” sin usar una clasificación química con el fin de que el libro pueda ser utilizado por artesanos, profesionales o estudiantes y que consulten de manera directa las sustancias que le interesen. Pretende que el nombre de las sustancias químicas se quede más fácilmente en la memoria si atiende a su uso común o histórico.

ORGANIZACIÓN

La obra está organizada en dos partes, finalizando con un apartado de apéndices, bibliografía, glosario, índice de sustancias y bibliografía.

CONTENIDOS

La primera parte contiene una introducción histórica de la nomenclatura Química, conceptos generales, y la formulación tanto de química inorgánica como de química orgánica. La segunda parte contiene una descripción genérica de una serie de sustancias seleccionadas por el autor clasificándolas en: elementos, gases, óxidos, tierras, bases, ácidos y sales, minerales, colorantes y pigmentos, disolventes, betunes, combustibles, grasas, aceites, ceras, resinas y gomas, polímeros adhesivos, explosivos, venenos, plaguicidas y desinfectantes.

EVALUACIÓN

Limitaciones o aspectos más débiles del trabajo

Cuando uno se enfrenta a escribir un libro basado en nomenclatura y formulación, para estudiantes preuniversitarios se está enfrentando a dos grandes retos, uno que es “justo en los comienzos de la enseñanza de la química donde debemos ser claros, y rigurosos para evitar las confusiones futuras” y otro que “desde hace años existe La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) organismo internacional reconocido, durante mucho tiempo, como la máxima autoridad mundial en las decisiones sobre nomenclatura química, terminología con reglas de formulación que están claramente descri-

tas”. Si bien es cierto que el autor pretende escribir una obra relajada, debe luchar de forma continuada con no caer en un intento de extrema sencillez que resulte erróneo o confuso. En este libro hay una buena intención con un resultado generalista. Con referencia al rigor científico, en la primera parte el autor presenta representaciones gráficas de los compuestos inorgánicos, en un intento de desarrollar sus fórmulas, que *no* son adecuadas, pudiendo dar lugar a confusión sobre la estructura real del compuesto en cuestión. El intento de explicar la formulación en el caso de compuestos de coordinación y sus sales, aunque en el libro es bastante breve, no es adecuado ya que el autor menciona que: “actualmente no existe unanimidad en la forma de nombrar a los ligandos” lo cual no es correcto y la figura correspondiente al complejo de hierro con cianuros, no es recomendable por la misma causa que he mencionado anteriormente. La lectura de la formulación de los compuestos orgánicos, es más clara que la formulación de inorgánica. Otro gran reto de enorme dificultad a la hora de escribir un libro de química es la división y clasificación de las sustancias, en un intento por parte del autor de organizar las sustancias atendiendo a su uso común y a su etimología, nos encontramos con algunos encasillamientos que pueden causar ciertas dudas a los lectores sobre por ejemplo el estado físico del compuesto, sobre su clasificación como elemento o compuesto o incluso sobre su carácter ácido o básico entre otros. La obra no mantiene un formato homogéneo que a veces dificulta el seguimiento, además distintos tipos de letra, con tamaños excesivamente pequeños en algunas de las tablas mostradas impiden una lectura clara. Presenta también algunos errores tipográficos en algunas de las tablas.

Puntos fuertes del texto, aciertos y contribuciones.

Abarca diferentes áreas de la química lo que lo hace recomendable a lectores generalistas que tengan curiosidad por aspectos variados. Tiene datos curiosos y enfoca el trabajo desde la antigüedad, con cierto carácter histórico que le da un aspecto más novelesco a las descripciones. La introducción de citas correspondientes a textos antiguos hace la lectura más amena. El nivel es adecuado para artesanos, profesionales o estudiantes de enseñanza secundaria.

M.^a PILAR AMO OCHOA
pilar.amo@uam.es

Percy Julian o el sueño americano

David Sucunza Sáenz

La oficina editorial de *Anales de Química* detectó que, en el número anterior, se produjo un error de maquetación. Este error se corrigió en el número correspondiente y a continuación se publica de nuevo la versión correcta.

Resumen: Texto narrativo que tiene como protagonista al químico estadounidense Percy Lavon Julian (1899-1975), pionero de la síntesis total de productos naturales y la producción de hormonas esteroideas.

Palabras clave: Percy Julian, fisostigmina, síntesis total, productos naturales, hormonas esteroideas.

Abstract: Narrative that features the American chemist Percy Lavon Julian (1899-1975), pioneer of the total synthesis of natural products and the production of steroid hormones.

Keywords: Percy Julian, physostigmine, total synthesis, natural products, steroid hormones.

Percy Julian se encontraba en una situación límite. Su única oportunidad pasaba por lograr un descubrimiento que le destacase dentro del panorama químico del momento. Si no lo conseguía, su carrera como científico habría terminado. Y esa era la ambición que le había movido toda su vida, por lo que tenía que agarrarse a esta última ocasión como a un clavo ardiendo. Pero no le quedaba mucho tiempo. Sus superiores en la Universidad de dePauw lo habían dejado claro, debería abandonar la institución en cuanto agotase los fondos que había obtenido para iniciar su trabajo.

Su situación no era justa, desde luego. Pero, como cualquier negro nacido en Alabama en las postrimerías del siglo XIX, sabía que no habitaba en un mundo justo. No al menos con él. Luchaba en un país de blancos con reglas puestas por blancos. Si algo había aprendido en sus treinta y cinco años de existencia era eso. El sistema de segregación que imperaba en el sur de Estados Unidos por aquella época no dejaba lugar a dudas. De hecho, si echaba la vista atrás, perfectamente podía comparar su vida con una larga y extenuante carrera de obstáculos.

Nunca había tenido la oportunidad de seguir un camino expedito. Una y otra vez se había visto frenado por una sociedad llena de prejuicios. Desde su Montgomery natal, donde los negros no podían acceder a una educación superior y hasta las bibliotecas públicas les quedaban vedadas. Para qué, si estaban destinados a labores manuales. Menos mal que sus padres nunca habían pensado así. Él empleado de ferrocarriles, ella maestra, ambos se habían esforzado en conseguir que sus hijos complementaran en casa la modesta formación escolar que el estado estimaba suficiente para los de su raza. El pequeño Percy, además, mostraría siempre una brillantez singular. En él se auna-



Figura 1. Percy Julian (en los años 40)

ban talento y determinación. Unas cualidades que en los siguientes años habría de desarrollar al límite para obtener un doctorado en química orgánica, un éxito colosal para un nieto de esclavos.

No fueron pocos los obstáculos a los que se había enfrentado para alcanzar este logro. Pero todos los fue superando gracias a una perseverancia fuera de lo corriente. A pesar de no haber podido acceder al instituto, a los 17 años había conseguido una de las pocas becas que la Universidad de dePauw concedía a estudiantes negros. Allí cumpliría con la ardua tarea de compaginar sus estudios en la facultad con otros preparatorios en un instituto, además de trabajar para costearse su manutención. Un reto del que había salido airoso gracias a la misma voluntad inquebrantable de la que haría gala toda su vida y que iba acompañada de una ambición que ni de lejos se



D. Sucunza

Universidad de Alcalá
Departamento de Química Orgánica y Química Inorgánica
Edificio de Farmacia. Ctra. Madrid-Barcelona Km. 33,6
28871, Alcalá de Henares
C-e: david.sucunza@uah.es

Recibido: 17/06/2015. Aceptado: 30/07/2015.

vio colmada con un simple graduado. En dePauw, Julian había descubierto su vocación por la investigación química y hecho el firme propósito de no cejar en su empeño hasta obtener un doctorado.

Los prejuicios que despertaba su color de piel, sin embargo, limitaban sus posibilidades y había pasado dos años como maestro en una escuela para negros hasta encontrar una oportunidad, que finalmente llegó a través de una beca de la Universidad de Harvard. Todavía podía recordar la euforia del momento, no existía lugar mejor para iniciar una carrera científica. Poco podía imaginar en ese instante que unos meses después se vería obligado a cerrar en falso la experiencia. El motivo, demasiadas mentes bien pensantes no aceptaban que un negro fuese profesor de alumnos blancos. Y sin la posibilidad de ganar un sueldo como docente no había manera de cumplir su objetivo, por lo que había tenido que abandonar esta prestigiosa institución con tan solo una maestría.

Tardaría tres largos años hasta conseguir una segunda ocasión, esta vez gracias a una beca para estudiar en Europa de la Fundación Rockefeller. La disfrutaría en Viena, donde el nazismo todavía no había aparecido y su color de piel solo suponía una nota exótica. Allí, Julian había vivido algunos de sus años más felices, libre de prejuicios de raza que le impidiesen llevar una animada vida social y sobresalir en su trabajo. Tanto, que su supervisor en la universidad, el experto en productos naturales Ernst Späth, describiría más tarde al estadounidense como el doctorando más brillante de su larga carrera investigadora.

Y así, en 1931, el doctor Julian había regresado a Estados Unidos, dispuesto a enfrentarse de nuevo a las mismas barreras raciales que había dejado a su partida. Pero esta vez no iba a resultar fácil frenarle, la experiencia europea le había cargado de conocimientos y ánimos y no tenía ninguna intención de renunciar a su carrera científica. Este era el propósito con el que había aceptado su actual puesto de profesor asistente en la universidad de dePauw, si bien la triste realidad social de su país lo había vuelto a colocar en una situación comprometida. Como ya le había sucedido en Harvard, le habían prohibido impartir clases. La poderosa sección local de la Legión Estadounidense había presionado a sus superiores hasta conseguirlo. Por eso necesitaba significase como un investigador de prestigio, no se le ocurría otra manera de reforzar su débil posición dentro de la universidad. Estaba obligado a lograr un éxito de especial mérito. Y no había encontrado desafío más estimulante que realizar la primera síntesis de la fisostigmina, un alcaloide con importantes aplicaciones médicas e historia singular.^[1]

Las primeras crónicas sobre el *Esere* databan de mitad del siglo XIX. Procedían de distintos misioneros de la iglesia presbiteriana de Escocia que divulgaron su buena nueva en el actual sureste de Nigeria. Allí, en la desembocadura del río Calabar, se extendía por aquella época una abigarrada área portuaria donde barcos ingleses y holandeses habían recalado con frecuencia en busca de aceite

de palma, igual que unas décadas antes lo habían hecho para comprar esclavos. Y como todavía su dominio colonial no estaba plenamente asentado, tanto unos como otros habían aparentado guardar pleitesía al reyezuelo de la zona, un déspota que, de acuerdo a las narraciones conservadas, administraba justicia entre sus súbditos mediante un irracional método de origen ancestral.

Varios europeos asistieron como testigos a estos juicios divinos. Sus relatos cuentan como los sospechosos condenados por brujería, una acusación habitual en un pueblo que creía su vida regida por ocultos poderes espirituales, eran obligados a ingerir varias semillas de una leguminosa tóxica, el *Esere*, que en Europa se conocería como haba de Calabar. El veredicto llegaba solo, si el amargor de los alcaloides de las semillas llevaba al reo a vomitar, éste se salvaba y era absuelto; si por el contrario no expulsaba las habas, el veneno hacía su efecto y la muerte evidenciaba su culpabilidad. A partir de este patrón común, los testimonios atestiguan la existencia de distintas modificaciones. En ocasiones, se aplastaban las semillas y se ponían en agua, utilizando la emulsión lechosa resultante. Otras, el proceso se realizaba a petición del propio sospechoso, que veía en esta prueba una manera de demostrar su inocencia. Incluso se habían utilizado en duelos, en los que cada contrincante debía comer una mitad de una misma haba y que perfectamente podían terminar con los dos adversarios muertos.



Figura 2. Haba de Calabar

La toxicidad del *Eseré* proviene del alcaloide fisostigmina, que es segregado por la planta para alejar a sus depredadores y al que, curiosamente, también se le habían descubierto diversos usos en medicina, desde su empleo como antídoto en intoxicaciones de sustancias con propiedades anticolinérgicas hasta el tratamiento del glaucoma. Aclaremos que éste no es un caso aislado.^[2] Son varios los venenos tribales que han encontrado aplicación como fármacos. Por poner otro ejemplo, la tubocurarina presente en el temido curare, el tóxico que los indios de la Amazonía utilizan en sus cerbatanas y que mencionaron con pavor los primeros conquistadores españoles, ha sido utilizada como relajante muscular en anestesia. Un aparente contrasentido que se puede explicar acudiendo a la famosa sentencia del médico y alquimista suizo Paracelso “solamente la dosis hace al veneno”. Toda sustancia llega a ser dañina a partir de cierta cantidad y, al mismo tiempo, por debajo de ese umbral no solamente puede ser inocua sino también valiosa, como ocurre en estos casos.

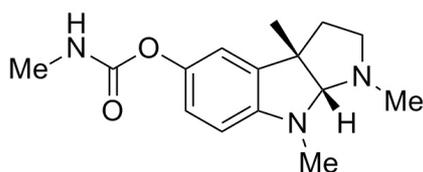


Figura 3. Estructura de la fisostigmina

Eso sí, ni todos los venenos tienen aplicaciones médicas ni el camino que lleva de un empleo a otro es trivial. En el caso de la fisostigmina, este trayecto se había completado gracias al tesón de un puñado de científicos tan brillantes como audaces.^[3] Como Robert Christison, el médico escocés que había descrito los efectos tóxicos del haba de Calabar tras experimentar con ella en propia persona, o Mary Walker, que había descubierto que este alcaloide es un eficaz tratamiento contra la miastenia gravis a pesar del desdén de sus colegas masculinos. Julian, que también sabía lo que era sufrir los prejuicios de sus iguales, pretendía sumarse a esta distinguida lista. Su síntesis no solo serviría para ratificar definitivamente la estructura química de la fisostigmina sino también para desarrollar un método de obtención alternativo a la extracción de la fuente natural.

Se trataba, sin embargo, de un desafío superlativo que estaba requiriendo un esfuerzo igual de extremo. Además, su equipo de trabajo se reducía a dos personas, su fiel compañero de fatigas Josef Píkl, con el que colaboraba desde sus felices días en Viena, y él mismo. Ambos llevaban meses compartiendo interminables jornadas laborales que se extendían a los fines de semana. No les quedaba otra ya que, a la propia dificultad del proyecto y su comprometida situación en dePauw, había que sumar un hándicap añadido. No estaban solos en la carrera. Nada menos que el gran Robert Robinson, que dirigía en la Universidad de Oxford uno de los grupos de investi-

gación en química orgánica más pujantes del momento, perseguía el mismo objetivo. Y solo habría premio para uno, para el primero que culminase con éxito la síntesis del ansiado alcaloide.

Como dos grupos de alpinistas que encaran la ascensión a un mismo pico desde distintas caras, Julian y Robinson habían diseñado dos rutas sintéticas diferentes destinadas a finalizar en un mismo punto. Pero al contrario de los montañeros, ellos podían seguir las evoluciones de su contrincante. Los artículos que ambos científicos iban publicando con sus resultados preliminares les habían servido para vigilarse desde la distancia. Y daba la sensación de que el equipo británico estaba haciendo valer su mayor fuerza de trabajo. En su última comunicación, Robinson había descrito la síntesis del intermedio eserethol, lo que le situaba a tan solo dos pasos de la meta. Pero algo no cuadraba. Julian acababa de obtener ese mismo compuesto y sus propiedades físicas no coincidían con las descritas por su rival.

¿Qué estaba ocurriendo? Sólo había una respuesta posible, en algún punto de su ruta sintética uno de los dos grupos había obtenido un compuesto no esperado y había seguido adelante sin percatarse de que se estaba alejando del camino correcto. Un error que resultaba del todo comprensible, al fin y al cabo solo disponían de dos técnicas para elucidar la estructura química de los productos obtenidos, el análisis elemental, con la que deducían la fórmula molecular, y los ensayos de derivatización, con los que determinaban los grupos funcionales presentes en ella. El problema era saber quién de los dos se había equivocado.

Julian, que había realizado los ensayos de elucidación con sus propias manos, estaba convencido de la validez de sus datos. Tenían que ser los británicos los confundidos. Pero no lo sabría con certeza hasta finalizar la síntesis de la fisostigmina y comparar las propiedades físicas del compuesto obtenido con las del alcaloide extraído del haba de Calabar. Demasiado tiempo, no podía esperar tanto. E incluso aunque pudiese no tenía la menor intención de hacerlo. Necesitaba un golpe de efecto y por ello estaba a punto de jugarse toda su todavía incipiente carrera científica a una sola carta.

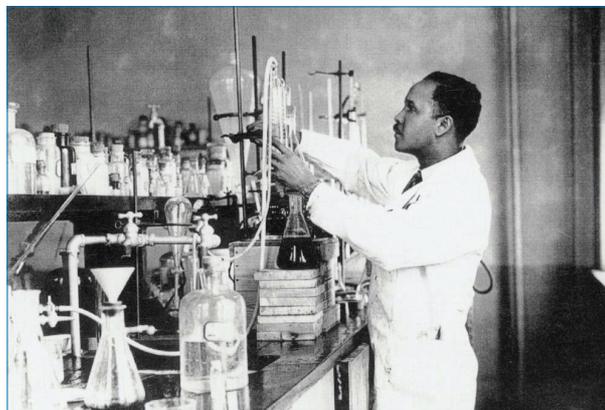


Figura 4. Percy Julian trabajando en su laboratorio

Antes de enviar su cuarta comunicación sobre la síntesis de la fisostigmina, Julian la revisó por última vez. En ella, describía su síntesis del intermedio eserethol y las discrepancias con los resultados de Robinson. Y no se había andado por las ramas:

“En una serie de diez excelentes artículos, Robinson y sus colegas han descrito las síntesis de dos compuestos, que denominan “*d,l*-Eserethol” y “*d,l*-Esermethol”. Sin embargo, su “*d,l*-Eserethol” no es el compuesto descrito en esta comunicación como “*d,l*-Eserethol”, cuya composición no admite dudas. Creemos que los autores británicos han cometido un error, el compuesto que reseñan como “*d,l*-Eserethol” no es la sustancia correcta y nosotros estamos describiendo por primera vez el verdadero “*d,l*-Eserethol”.^[4]

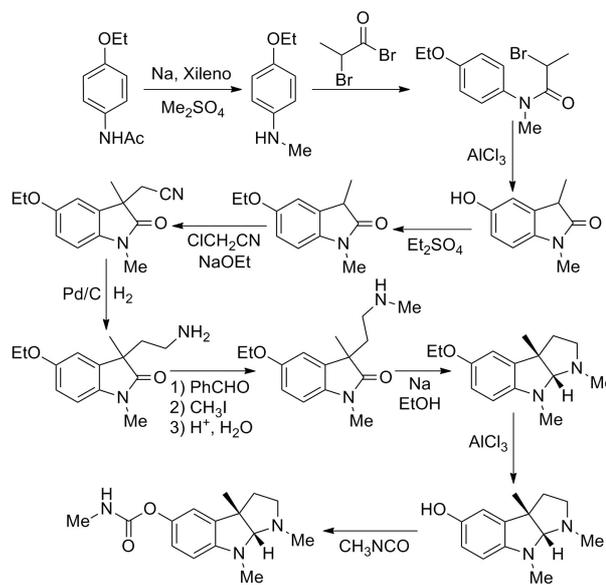
La suerte estaba echada. Si, como creía, estaba en lo cierto, su nombre reluciría como pocos en el panorama de la química orgánica del momento. Pero, si se equivocaba, habría cuestionado en falso resultados publicados por un científico de enorme prestigio y caería en el descrédito. Daba vértigo de solo pensarlo. Así que no lo hizo más, introdujo el manuscrito en un sobre y lo entregó para que fuese enviado a la sede de la *American Chemical Society*.

Las semanas siguientes fueron de enorme tensión. Julian confiaba plenamente en sus resultados pero sabía que siempre existe margen para el error. Y que este le saldría muy caro. Poco después de la publicación de su comunicación en el *Journal of American Chemical Society* recibió un telegrama de su antiguo supervisor en Harvard. Decía: “Rezo porque tengas razón. Te espera un negro futuro si no es así”.

Pero no habría de qué preocuparse. Julian y Pikel continuaron su trabajo hasta completar la síntesis de la fisostigmina y su producto fundió exactamente a la misma temperatura que el alcaloide extraído, prueba inequívoca de que se trataba del mismo compuesto químico. La carrera estaba ganada. Serían sus nombres los que figurarían como autores de la primera síntesis total de este producto natural, que publicaron en una quinta y definitiva comunicación en el *Journal of American Chemical Society*.^[5] (Véase Esquema 1).

Laboratorios de todo el mundo enviaron telegramas de felicitación. Tal y como deseaba Julian, su logro le había aupado a la primera fila del escaparate científico del momento. Pero no le sirvió para continuar en de Pauw. Los gerifaltes de la universidad aplaudieron su éxito pero mantuvieron su decisión de no renovar el contrato. No había marcha atrás. Simplemente, la sociedad en la que vivían no admitía que un negro impartiese clases a alumnos blancos. Poco importaba la brillantez de Julian, se enfrentaba a un muro infranqueable. A pesar de haberse significado como uno de los químicos más talentosos de su generación, se veía expulsado del mundo académico para no volver jamás.

La síntesis total de la fisostigmina publicada en 1935 por Julian y Pikel figura hoy como un hito de la química



Esquema 1. Síntesis total de la fisostigmina de Julian y Pikel (1935)

orgánica.^[6] En una época en la que no existían la mayoría de las técnicas de determinación estructural ni muchas de las reacciones utilizadas actualmente, constituye una de las primeras síntesis de una molécula compleja a partir de compuestos de partida simples. Un trabajo pionero que, no solo demostró el potencial de una disciplina científica que iniciaría su edad dorada una década más tarde, sino que, además, dio lugar a notables aplicaciones prácticas. Por ejemplo, posibilitó la obtención de análogos de este alcaloide, algunos de los cuales han acabado formando parte de nuestra farmacopea. La neostigmina, empleada contra la miastenia gravis, o la rivastigmina, que se ha mostrado eficaz en el tratamiento contra la demencia, se encuentran entre los más destacados.

Nuestro protagonista, sin embargo, se benefició poco de su éxito. Llegaría a ver su labor reconocida, pero para ello tuvo que esperar hasta el final de su carrera. Y mientras tanto, su vida siguió siendo un continuo porfiar en una sociedad que catalogaba a sus ciudadanos por el color de su piel. Muchas puertas se le cerraron por culpa de los prejuicios racistas. Como la de la compañía Dupont, que le llamó para una de las entrevistas de trabajo más cortas que se recuerda. “Lo siento, no sabíamos que era negro” se disculparon sus directivos al ver a Julian en persona.

No hablamos de un caso aislado, “nunca hemos contratado a un investigador negro, no sabemos si funcionaría” se convirtió en respuesta habitual a sus solicitudes de empleo en los meses siguientes a su salida de de Pauw. Aunque siempre hay alguien capaz de ver más allá. En este caso se llamaba William J. O’Brien y ejercía como vicepresidente de la compañía Glidden, quien ofreció a Julian el puesto de director de investigación en su departamento de productos procedentes de la soja, situado en Illinois. Acertó de pleno. Durante los 18 años que pasó en

Glidden, Julian desarrolló más de 100 patentes, transformando su área en la más boyante de la empresa. Desde plásticos y pegamentos hasta aditivos alimentarios y comida para perros, multitud de productos derivados de la soja inundaron el mercado. También hormonas esteroideas, para las cuales Julian desarrolló un método de obtención a escala industrial a partir del producto natural presente en la soja estigmasterol.

Al fin, Julian veía como su esfuerzo redundaba en cierto reconocimiento y bonanza económica. Glidden ganó mucho dinero gracias a él pero también le pagó en consonancia, por lo que pudo mudarse con su mujer y sus dos hijos a un elegante suburbio a las afueras de Chicago, Oak Park. Un alto salario, sin embargo, no equivale a aceptación social y hubo quien no aceptó de buen grado su llegada a este exclusivo barrio. En pocas semanas, su vivienda sufrió un incendio provocado y una explosión causada por una bomba. Nada de eso le arredró, Julian residiría en Oak Park el resto de su vida.

Allí fundaría en 1953 los laboratorios Julian, iniciando así su carrera como empresario. Una arriesgada apuesta con la que buscaba centrarse en la producción de hormonas esteroideas, industria que vivía por aquel entonces sus años de máximo esplendor,^[7] y que le obligó a abandonar Glidden y empeñar toda su fortuna, pero que se demostró totalmente acertada. Ocho años más tarde, GlaxoSmithKline compró su compañía por dos millones de dólares y le hizo millonario. Y, con este nuevo estatus, también llegaría un tardío reconocimiento del mundo académico, que le concedió diversos galardones. Pasados los sesenta años, Julian era un hombre rico y respetado, pero no por ello menos emprendedor. Gracias al dinero de la venta de sus laboratorios, acometería su última aventura, la creación del Julian Research Institute, una organización sin ánimo de lucro dedicada a formar a jóvenes químicos que dirigió hasta su muerte.

Percy Julian falleció en 1975 dejando una enorme huella tras de sí. A pesar de las enormes dificultades que se vio obligado a enfrentar, brilló en cada una de las empresas que acometió. Científico de prestigio, empresario de éxito, filántropo respetado, siempre lamentó no haber tenido la oportunidad de seguir su carrera científica de la manera que hubiese deseado, pero pocos químicos pueden presumir de una vida laboral más fructífera. Más aún, su lucha por ser valorado por sus méritos y no por su color de piel fue y sigue siendo un ejemplo para una sociedad que, en el curso de una vida humana, ha sabido evolucionar desde la segregación absoluta hasta la elección como máximo gobernante de un individuo de una raza que antaño fue vista como inferior.^[8]

AGRADECIMIENTOS

El autor quisiera agradecer a Patricia Estevan sus lecturas críticas y a Eric Calderwood su ayuda con la traducción del texto extraído de la referencia^[4].



Figura 5. Sello estadounidense dedicado a Percy Julian.
Fotografía: Arch. Soc. Esp. Oftalmol. 2012, 87, 197

BIBLIOGRAFÍA

- [1] (a) R. W. D. Nickalls, E. A. Nickalls, *Anaesthesia* **1988**, *43*, 776-779. (b) L. Spinney, *New Scientist* **2003**, *178*, 48-49. (c) A. Proudfoot, *Toxicol. Rev.* **2006**, *25*, 99-138.
- [2] M. Pijoan, *Offarm.* **2007**, *26*, 104-116.
- [3] S. Scheindlin, *Mol. Interv.* **2010**, *10*, 4-10.
- [4] P. L. Julian, J. Pikl, *J. Am. Chem. Soc.*, **1935**, *57*, 563-566.
- [5] P. L. Julian, J. Pikl, *J. Am. Chem. Soc.*, **1935**, *57*, 755-757.
- [6] *Synthesis of physostigmine*, National Historic Chemical Landmarks program, American Chemical Society, **1999** <<http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/julian.html>>.
- [7] (a) *The 'Marker Degradation' and Creation of the Mexican Steroid Hormone Industry 1938-1945*, National Historic Chemical Landmarks program, American Chemical Society, **1999** <<http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/progesteronesynthesis.html>>. (b) D. Sucunza, *Cabeza de negro, Naukas* **2014** <<http://naukas.com/2014/02/06/cabeza-de-negro/>>.
- [8] Para más información sobre la vida de Percy Julian: (a) B. Witkop, *Percy Lavon Julian, 1899-1975*, en *Biographical Memoirs*, vol. 52, The National Academy Press, Washington, D.C., **1980**. (b) B. Witkop, *Heterocycles* **1998**, *49*, 9-27. (c) *Documental Forgotten Genius* del canal PBS Nova, **2007** <<http://www.pbs.org/wgbh/nova/physics/forgotten-genius.html>>. (d) *Web Science alive!: The life and science of Percy Julian* <<http://www.chemheritage.org/percy-julian/>>.

Normas de publicación de la revista *Anales de Química* de la RSEQ

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES

La revista *Anales* se edita trimestralmente. Los artículos se publican en español y deben tener (utilizando la plantilla de *Anales de Química*, ver abajo) una extensión máxima de 8 páginas, 5 si son de las áreas Enseñanza y Didáctica de la Química, Aula y Laboratorio o Historia de la Química.

Los manuscritos se enviarán en un solo archivo pdf conteniendo el texto, las figuras, tablas, esquemas y gráficos integrados en el texto. Para la preparación de los manuscritos se recomienda el empleo de la plantilla Word disponible en la web ([Plantilla Manuscritos Anales](#) - 95.95 kB). En la web de *Anales de Química* también existe a disposición de los autores un artículo que puede emplearse como modelo para la preparación de manuscritos ([Artículo Modelo](#) 755.71 kB).

Los manuscritos deben ir acompañados de una carta al Editor (en formato pdf) en la que se incluya la información de contacto del autor principal y el tipo de contribución a *Anales de Química* (Investigación Química, Aula y Laboratorio, Historia de la Química). Adicionalmente, deben sugerirse cuatro revisores competentes en la materia, indicando su nombre y su correo electrónico. En esa misma carta deberá explicitarse que el artículo remitido es original, que no se ha publicado previamente y que no se está considerando para su publicación en otra revista.

Es responsabilidad del autor principal informar al resto de autores acerca del estado de recepción, revisión o publicación del manuscrito.

Una vez aceptado el manuscrito, para la confección final del artículo, las figuras, tablas, esquemas, gráficos y fotografía/s del/los autores deberán remitirse en formato original, cada una como un archivo independiente y todo ello en un archivo tipo zip.

Se recomienda a los autores que envíen propuestas atractivas para la portada de la revista (con una calidad mínima de 600 dpi) y formato original o EPS.

PREPARACIÓN DE LOS MANUSCRITOS

Se recomienda la preparación de manuscritos empleando la plantilla de *Anales de Química*. Los manuscritos deben respetar las siguientes secciones: título, filiación de los autores, fotografía de los autores, resumen (español e inglés), palabras clave (español e inglés), introducción, exposición del trabajo, conclusiones, agradecimientos y bibliografía.

Primera Página. En esta página debe aparecer el título del manuscrito, los nombres de los autores, sus fotografías, filiación, dirección postal completa, y dirección de correo electrónico del autor principal o de contacto, que se puede identificar mediante un asterisco. También se incluirán en esta primera página cinco palabras clave y un resumen de un máximo de 100 palabras, en español y en inglés.

Texto. Deberá incluir referencias relevantes al tema que se presenta y su exposición se hará de modo que resulte atractivo y divulgativo. En la mayoría de los artículos se sugiere a los autores comenzar con una visión global del tema tratado para finalizar considerando los aspectos más particulares de la investigación presentada.

Tablas. Deben numerarse consecutivamente y situarse a continuación del texto donde se mencionan. En la parte superior de cada tabla, debe aparecer un título que describa su contenido, sin necesidad de recurrir al texto. Si se necesita especificar algún detalle se puede indicar como nota al pie de Tabla.

Figuras. Las fotografías y figuras serán originales y sin derechos de reproducción. Las fórmulas se enviarán en formato Chemdraw siguiendo los ajustes ACS. Todas las figuras o esquemas deben situarse detrás del párrafo de texto en el que se mencionan, y deben numerarse en orden consecutivo. Cada figura debe presentar al pie una leyenda que indique el número de figura correspondiente y una pequeña descripción, preferiblemente menor de cuatro líneas. Las figuras se deben preparar para un formato de una columna (8,5 cm de anchura) o de dos columnas (17,5 cm de anchura máxima).

Bibliografía. Como norma general, se evitarán, dentro de lo posible, referencias a la Wikipedia, o enlaces web que no sean fuentes de solvencia contrastada. En el texto, los números deben aparecer como superíndices (por ejemplo, Wittig¹) y, si procede, después de las marcas de puntuación (por ejemplo, Correa.²). Los nombres de las revistas deben abreviarse de acuerdo al Chemical Abstracts Service Source Index (CASSI) [en caso de duda, consúltese: www.cas.org/expertise/cascontent/caplus/corejournals.html] y deben seguir el estilo general de las revistas patrocinadas por la Real Sociedad Española de Química, como se muestra en los siguientes ejemplos:

Artículos de revistas:

- ¹ a) B. M. Trost, *Chem. Eur. J.* (1998, 4, 2405-2412);
 b) S. Grimme, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2006, 45, 4460-4464.
² J. García-Martínez, *An. Quím.* 2006, 102(1), 11-18.

Libros:

³ D Tullius en *Comprehensive Supramolecular Chemistry*, Vol. 5 (Eds.: J. L. Atwood, J. E. D. Davies, D. D. MacNicol, F. Vögtle, K. S. Suslick), Pergamon, Oxford, 1996, pp. 317-343.

Cartas al Editor. Las cartas al editor deben tener una extensión máxima de medio A4 escritas a 1.5 espacios y paso 12. Estas cartas se publicarán sin editarse y no serán sometidas a revisión, excepto si se refieren a personas o instituciones de forma ofensiva.

Artículos de Opinión. Los artículos de opinión tendrán una extensión máxima de cuatro A4 escritas a 1.5 espacios y paso 12. Serán revisados por el Editor General y dos Editores Asociados y se aprobarán para su publicación por el comité editorial. Adicionalmente, el equipo editorial podrá solicitar artículos de opinión si lo estima oportuno. En este caso será el editor asociado el responsable de aceptar o rechazar el artículo.

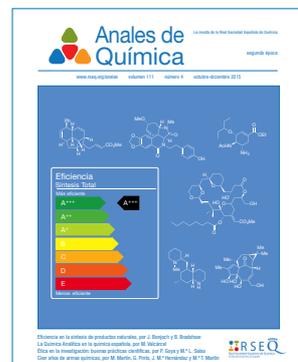
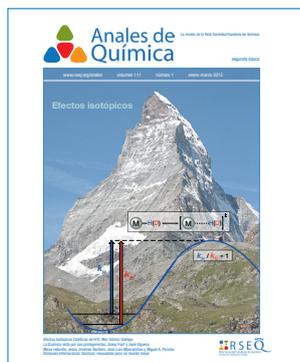
A partir de enero de 2016, se rechazarán todos los artículos que incumplan estas normas

© 2015 Real Sociedad Española de Química



ENVÍA TUS ARTÍCULOS A
www.analesdequimica.es





DIVULGACIÓN DE LA QUÍMICA

• **Amo-Ochoa, Pilar**

Luz fría: ¿una bombilla dentro de la nevera? • 2015, *111* (3) 166-172.

• **Garrido Escudero, Amalio**

Véase, Pinto Cañón, Gabriel.

• **Pinto Cañón, Gabriel**

Ciencia y arte: las pinturas de los calendarios MAXAM (antes Unión Española de Explosivos) como recursos para la difusión y la enseñanza de la química. • 2015, *111* (2), 104-108.

• **Val Castillo, Otilia**

Historia de la evolución de la tabla periódica de los elementos químicos: un ejemplo más de la aplicación del método científico. • 2015, *111* (2), 109-117.

ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA

• **Alejo Armijo, Alfonso**

Véase, Marchal Ingrain, Antonio.

• **Arranz Mascarós, Paloma**

Véase, Marchal Ingrain, Antonio.

• **Fontecha Cámara, María A.**

Véase, Marchal Ingrain, Antonio.

• **Marchal Ingrain, Antonio**

Escuela de la Ciencias UJA. Nueva propuesta de la Universidad de Jaén para acercar la Ciencia a los escolares • 2015, *111* (4), 239-246.

• **Moreno Martínez, Luis**

La evolución histórica de la química y su utilidad pública • 2015, *111*, (4), 230-238.

• **Román Polo**

La tabla periódica de los elementos químicos para niños y abogados • 2015, *111*, (4), 247-253.

ENSEÑANZA EN EL AULA

• **Hernández, José María**

Véase, Pinto Cañón, Gabriel.

• **Martín, María Teresa**

Véase, Pinto Cañón, Gabriel.

• **Martín Manuela**

Véase, Pinto Cañón, Gabriel.

• **Moreno Gómez, Esteban**

El modelo atómico de la materia en la formación científica del profesorado de las primeras etapas educativas. • 2015, *111* (3), 181-187.

• **Pinto Cañón, Gabriel**

El reactivo de Tollens: de la identificación de aldehídos a su uso en nanotecnología. Aspectos históricos y aplicaciones didácticas. • 2015, *111* (3), 173-180.

HISTORIA DE LA QUÍMICA

• **Bertomeu Sánchez, José Ramón**

Venenos, polémicas y fuga de cerebros: el bicentenario del *Traité des poisons* de Mateu Orfila (1787-1853). • 2015, *111* (1), 48-55.

- **Hernández, José María**
Véase, Martín, Manuela.
- **Martín, Manuela**
Cien años de armas químicas • **2015, 111**, (4), 224-229.
- **Martín, María Teresa**
Véase, Martín, Manuela.
- **Sucunza Sáenz, David**
Percy Julian o el sueño americano • **2015, 111** (3), 161-165.
- **Pinto, Gabriel**
Véase, Martín, Manuela.
- **Wisniak, Jaime**
François Joseph Jérôme Nicklès: 1. Cristalografía, isomorfismo, amalgamación y permeabilidad • **2015, 111** (2), 92-97.
François Joseph Jérôme Nicklès: 2. Teoría de los olores, fuego líquido, flúor y electromagnetismo • **2015, 111** (2), 98-103.

INVESTIGACIÓN QUÍMICA

- **Bonjoch, Josep**
Eficiencia en la síntesis total de productos naturales • **2015, 111**, (4), 203-211.
- **Bradshaw, Ben**
Véase, Bonjoch, Josep.
- **Corcuera, María A.**
Véase, Fernández-d'Arlas, Borja.
- **Goya, Pilar**
Ética en la investigación: buenas prácticas científicas • **2015, 111**, (4), 212-217.
- **Eceiza, Arantxa**
Véase, Fernández-d'Arlas, Borja.
- **Fernández-d'Arlas, Borja**
Caracterización estructural de poliuretanos segmentados elastoméricos bajo deformación uniaxial • **2015, 111**, (2), 83-91.
- **Gómez Gallego, Mar**
Efectos Isotópicos Cinéticos de H/D: un clásico en el estudio de reacciones mediadas por metales de transición en el XXI • **2015, 111**, (1), 29-40.

- **Salas, M.^a Luisa**
Véase, Goya, Pilar.
- **Vicente, Rubén**
Catálisis con zinc como herramienta en síntesis orgánica • **2015, 111**, (1), 41-47.

LA QUÍMICA VISTA POR SUS PROTAGONISTAS

- **Delgado Martín, Julio**
De Woodward a Whitesides • **2015, 111**, (3), 153-160.
- **Font Cierco, Josep**
Química 1950-2000 • **2015, 111**, (1), 21-24.
- **Elguero, José**
La Química vista por sus protagonistas • **2015, 111**, (1), 25-28.
- **Martín Lomas, Manuel**
Una visión personal de la investigación química en España desde 1958 • **2015, 111**, (2), 77-82.
- **Valcárcel, Miguel**
La Química Analítica en la química española • **2015, 111**, (4), 218-223.

OPINIÓN

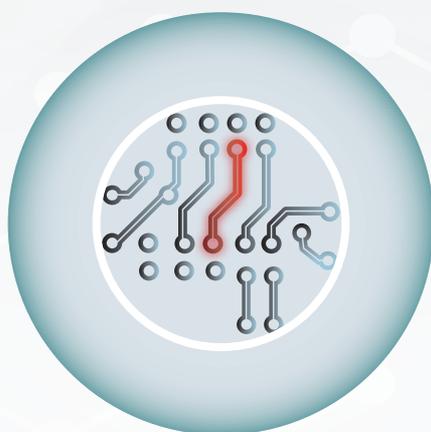
- **Costero, Ana M.**
El mejor investigador, ¿es el mejor profesor? • **2015, 111**, (1), 11-12.
- **Elguero, José**
La singularidad de la Química • **2015, 111**, (4), 202.
- **Pérez, Pedro J.**
Acceso abierto (*Open Access*) para las publicaciones científicas: quién, cuándo y cómo • **2015, 111**, (2), 66-67.
Acceso abierto para las publicaciones científicas: otra vuelta de tuerca • **2015, 111**, (3), 144-145.
- **Román Polo, Pascual**
España ha sido expulsada de la IUPAC por no pagar las cuotas anuales • **2015, 111**, (1), 13-15.
- **Yus, Miguel**
Reviews, índices de impacto y de Hirsch: reflexiones personales • **2015, 111**, (2), 68-69.

MATERIALS TO DRIVE INNOVATION



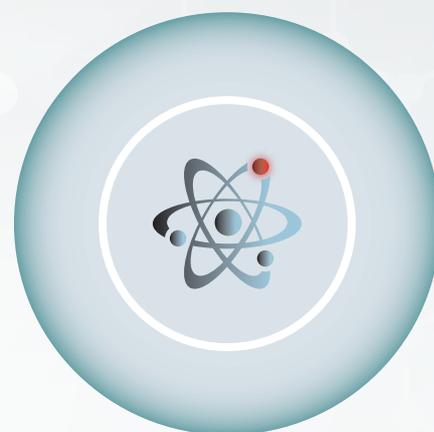
BIOMEDICAL

- Materials for drug delivery, bone and tissue engineering
- PEGs, biodegradable and natural polymers
- Functionalized nanoparticles
- Block copolymers and dendrimers
- Nanoclays



ELECTRONICS

- Nanowires
- Printed electronics inks and pastes
- Materials for OPV, OFET and OLED
- Nanodispersions
- CNTs and graphene
- Precursors for PVD, CVD and sputtering



ENERGY

- Electrode and electrolyte materials for batteries and fuel cells
- Hydrogen storage materials, including MOFs
- Phosphors
- Thermoelectrics
- Nanomaterials
- Precursors for nanomaterials and nanocomposites

Find more information on our capabilities at

aldrich.com/matsci

*Enabling Science to
Improve the Quality of Life*

Order/Customer Service: sigma-aldrich.com/order
Technical Service: sigma-aldrich.com/techservice
Development/Custom Manufacturing Inquiries **SAFC**® safcglobal@sial.com
Safety-related Information: sigma-aldrich.com/safetycenter

World Headquarters
3050 Spruce St.
St. Louis, MO 63103
(314) 771-5765
sigma-aldrich.com



Guía Breve para la Nomenclatura de Química Inorgánica

R. M. Hartshorn (Nueva Zelanda),* K.-H. Hellwich (Alemania), A. Yerin (Rusia), T. Damhus (Dinamarca), A. T. Hutton (Sudáfrica). *C-e: inorganic.nomenclature@iupac.org, Patrocinado por: [División de Nomenclatura Química y Representación Estructural de la IUPAC](#).

Traducido y adaptado por: Miguel A. Ciriano (España),[‡] Pascual Román Polo (España). [‡]C-e: mciriano@unizar.es.

INTRODUCCIÓN

La adopción universal de una nomenclatura química consensuada es una herramienta clave para la comunicación eficiente en las ciencias químicas, para la búsqueda con ordenadores en bases de datos y con fines regulatorios, tales como los asociados a la salud y la seguridad o a la actividad comercial. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC en sus siglas inglesas) ofrece recomendaciones sobre la naturaleza y el uso de la nomenclatura química.¹ Los fundamentos de esta nomenclatura se muestran aquí y en los documentos complementarios sobre los sistemas de nomenclatura de [química orgánica](#)² y [polímeros](#),³ con hipervínculos a los documentos originales. Un resumen general de la nomenclatura química se puede encontrar en [Principles of Chemical Nomenclature](#).⁴ Detalles mayores se pueden hallar en [Nomenclature of Inorganic Chemistry](#) coloquialmente conocido como el Libro Rojo,⁵ y en las publicaciones relacionadas con [compuestos orgánicos](#) (el Libro Azul)⁶ y [polímeros](#) (el Libro Púrpura).⁷ Cabe señalar que muchos compuestos pueden tener nombres no-sistemáticos o semi-sistemáticos (algunos de los cuales no son aceptados por la IUPAC, por ejemplo, porque son ambiguos) y las reglas IUPAC permiten dar más de un nombre sistemático a un compuesto en muchos casos. La IUPAC está elaborando la identificación de los nombres individuales preferidos a efectos de regulación ([Preferred IUPAC Names](#) o PINs).

Nota: En este documento, el símbolo ‘=’ se utiliza para dividir los nombres que resultan ser demasiado largos para el formato de la columna, a menos que ya haya un guión presente en el nombre.

Los límites entre compuestos ‘orgánicos’ e ‘inorgánicos’ son difusos. Los tipos de nomenclatura descritos en este documento son aplicables a los compuestos, moléculas e iones que no contienen carbono y también a muchas estructuras que contienen carbono (Sección 2), principalmente los que contienen elementos de los grupos 1–12. La mayoría de los compuestos de boro se tratan mediante una nomenclatura especial.⁸

1 NOMBRES ESTEQUIOMÉTRICOS O DE COMPOSICIÓN

Un **nombre estequiométrico** o **de composición** sólo proporciona información sobre la composición de un ion, molécula o compuesto y puede estar relacionado bien con la fórmula empírica o con la molecular de esa especie. No proporciona ninguna información estructural.

Para las **especies homoatómicas**, donde únicamente hay un elemento, el nombre se forma (Tabla 1) combinando el nombre del elemento con el **prefijo multiplicador** pertinente (Tabla 2). Los iones se nombran añadiendo los números de carga entre paréntesis, *p. ej.*, (1+), (3+), (2–) y para (la mayoría de) los nombres de los aniones homoatómicos se añade la terminación ‘uro’ en lugar de las terminaciones de los nombres de los elementos: ‘eso’, ‘ico’, ‘o’, ‘io’, ‘ogeno’, ‘ono’, u ‘oro’.⁹ Las excepciones incluyen el cinc, el oxígeno y los elementos del grupo 18 que acaban en ‘on’, donde la terminación ‘uro’ se añade a los nombres de los elementos. Para algunos elementos (*p. ej.*, S, Fe, Ag, Au) se usa la raíz del nombre en latín antepuesta a la terminación ‘uro’ (*cf.* Sección 2.3).⁹ Algunos iones pueden tener nombres tradicionales aceptables (que se usan sin números de carga).

Se permite la publicación de este documento por cualquier medio bajo la condición de que sea completo e inalterado. Copyright de la versión inglesa © IUPAC & De Gruyter 2015. Publicado en [Pure Appl. Chem.](#) **87**, 1039–1049 (2015).

¹ Disponible gratuitamente (en versión inglesa) en:

(a) <http://www.iupac.org/publications/pac/>; (b) <http://www.chem.qmul.ac.uk/iupac/>

² K.-H. Hellwich, R. M. Hartshorn, A. Yerin, T. Damhus, A. T. Hutton, Brief Guide to the Nomenclature of Organic Chemistry, *Pure Appl. Chem.*, en preparación.

³ R. C. Hiorns, R. J. Boucher, R. Duhlev, K.-H. Hellwich, P. Hodge, A. D. Jenkins, R. G. Jones, J. Kahovec, G. Moad, C. K. Ober, D. W. Smith, R. F. T. Stepto, J.-P. Vairon, J. Vohlidal, *Pure Appl. Chem.* **84**(10), 2167–2169 (2012).

⁴ *Principles of Chemical Nomenclature – A Guide to IUPAC Recommendations, 2011 Edition*, G. J. Leigh (Ed.), Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K., ISBN 978-1-84973-007-5.

⁵ *Nomenclature of Inorganic Chemistry – IUPAC Recommendations 2005*, N. G. Connelly, T. Damhus, R. M. Hartshorn, A. T. Hutton (Eds.), Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K., ISBN 0-85404-438-8.

⁶ *Nomenclature of Organic Chemistry – IUPAC Recommendations and Preferred Names 2013*, H. A. Favre, W. H. Powell (Eds.), Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K., ISBN 978-0-85404-182-4.

⁷ *Compendium of Polymer Terminology and Nomenclature – IUPAC*

Recommendations 2008, R. G. Jones, J. Kahovec, R. Stepto, E. S. Wilks, M. Hess, T. Kitayama, W. V. Metanomski (Eds.), Royal Society of Chemistry, Cambridge, U.K., ISBN 978-0-85404-491-7.

⁸ Referencia 4, Capítulo 10.

⁹ Referencia 5, Tabla IX.

Tabla 1. Ejemplos de especies homoatómicas

Fórmula	Nombre	Fórmula	Nombre
O ₂	dióxígeno	Cl [–]	cloruro(1–) o cloruro
S ₈	octaazufre	I ₃ [–]	triioduro(1–)
Na ⁺	sodio(1+)	O ₂ ^{2–}	dióxido(2–) o peróxido
Fe ³⁺	hierro(3+)	N ₃ [–]	trinitruro(1–) o azida

Tabla 2. Prefijos multiplicadores para especies simples y complejas

Nº	Simple	Complicado	Nº	Simple	Complicado
2	di	bis	8	octa	octakis
3	tri	tris	9	nona	nonakis
4	tetra	tetrakis	10	deca	decakis
5	penta	pentakis	11	undeca	undecakis
6	hexa	hexakis	12	dodeca	dodecakis
7	hepta	heptakis	20	icosa	icosakis

Los **compuestos binarios** (los que contienen átomos de dos elementos) se nombran estequiométricamente combinando los nombres de los elementos y escribiendo, por convenio, el elemento al que se llega primero cuando se sigue la flecha de la secuencia de los elementos (Figura 1) como si se tratara de un anión. Así, al nombre de este elemento formalmente ‘electronegativo’ se le da la terminación ‘uro’ y se coloca el primero en el nombre del compuesto, siguiéndole la preposición ‘de’ y el nombre del elemento formalmente ‘electropositivo’ (Tabla 3).

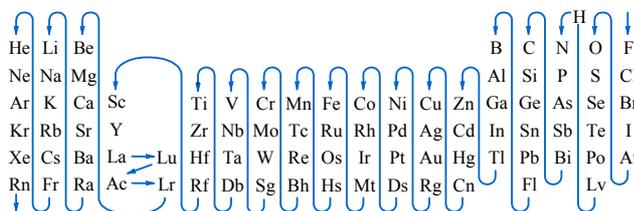


Figura 1. Secuencia de los elementos.

Tabla 3. Ejemplos de compuestos binarios

Fórmula	Nombre	Fórmula	Nombre
GaAs	arsenuro de galio	FeCl ₂	dicloruro de hierro o cloruro de hierro(II)
CO ₂	dióxido de carbono	FeCl ₃	tricloruro de hierro o cloruro de hierro(III)
CaF ₂	difluoruro de calcio o fluoruro de calcio	H ₂ O ₂	dióxido de dihidrógeno o peróxido de hidrógeno

De nuevo, los prefijos multiplicadores (Tabla 2) se aplican cuando sea necesario, y se pueden usar nombres alternativos¹⁰ aceptables. La estequiometría puede deducirse en algunos casos mediante los números de oxidación, o puede estar completamente implícita cuando no existe ninguna duda, como en el fluoruro de calcio.

Generalmente, las **especies heteropoliatómicas** pueden nombrarse de manera similar usando la nomenclatura de composición, pero, a menudo, se utiliza la nomenclatura de sustitución¹¹ o la de adición (Sección 2). En este último caso, también se proporciona información sobre la manera en que los átomos están conectados. Por ejemplo, POCl₃ (o PCl₃O, nombre de composición: tricloruro óxido de fósforo) recibe un nombre de adición en la Tabla 10.

Ciertos iones tienen nombres tradicionales cortos, que se utilizan comúnmente y se aceptan todavía (*p. ej.*, amonio, NH₄⁺; hidróxido, OH[–]; nitrito, NO₂[–]; fosfato, PO₄^{3–}; difosfato, P₂O₇^{4–}).

Los compuestos inorgánicos, en general, pueden ser combinaciones de cationes, aniones y especies neutras. Por convenio, el nombre de un compuesto está formado por los nombres de las especies que lo componen: los aniones preceden a los cationes y los componentes neutros van al final (Véanse ejemplos en la Tabla 4).

Tabla 4. Uso de los prefijos multiplicadores en los nombres de composición

Fórmula	Nombre
Ca ₃ (PO ₄) ₂	bis(fosfato) de tricalcio
Ca ₂ P ₂ O ₇	difosfato de dicalcio
BaO ₂	dióxido(2–) de bario(2+) o peróxido de bario
MgSO ₄ ·7H ₂ O	sulfato de magnesio heptahidratado
CdSO ₄ ·6NH ₃	sulfato de cadmio—amoniacado (1/6)
AlK(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	bis(sulfato) de aluminio y potasio—agua (1/12) o bis(sulfato) de aluminio y potasio dodecahidratado
Al ₂ (SO ₄) ₃ ·K ₂ SO ₄ ·24H ₂ O	tris(sulfato) de dialuminio—sulfato de dipotasio—agua (1/1/24)



¹⁰ Referencia 4, Tabla P10.

¹¹ Referencia 5, Capítulo IR-6.

El número de cada entidad presente se tiene que especificar con el fin de reflejar la composición del compuesto. Con este propósito, los prefijos multiplicadores (Tabla 2) se añaden al nombre de cada especie. Los prefijos a usar con los nombres de entidades sencillas son ‘di’, ‘tri’, ‘tetra’, *etc.*, o ‘bis()’, ‘tris()’, ‘tetrakis()’, *etc.*, para el caso de especies que ellas mismas contienen prefijos multiplicadores o localizadores. También hay que tener cuidado en las situaciones en las que un prefijo multiplicador simple puede ser malinterpretado, *p. ej.*, tris(yoduro) tiene que usarse para 3I^- en lugar de triyoduro (que se usa para I_3^-), y bis(fosfato) en lugar de difosfato (que se usa para $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$). Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 4. No hay elisión de vocales (*p. ej.*, tetraacua, pentaóxido), excepto en el caso especial de monóxido.

Los nombres de los componentes neutros se separan por guiones extra largos (—) sin espacios. Los compuestos inorgánicos pueden ser, a su vez, componentes en **compuestos de adición** (formales) (últimos cuatro ejemplos de la Tabla 4). Las relaciones de los componentes pueden indicarse, en general, usando un descriptor estequiométrico con un paréntesis después del nombre (véanse los tres últimos ejemplos de la Tabla 4). En el caso especial de los hidratos, los prefijos multiplicadores pueden ser usados con el término ‘hidrato’.

2 COMPLEJOS Y NOMENCLATURA DE ADICIÓN

2.1 Enfoque general

La nomenclatura de adición se desarrolló para describir las estructuras de entidades de coordinación, o complejos, pero este método también se extiende con facilidad a otras entidades moleculares. Se considera que los complejos mononucleares consisten en un átomo central, a menudo un ion metálico, que está unido a moléculas pequeñas o iones adyacentes, que se denominan ligandos. Los nombres de los complejos se construyen (Tabla 5) añadiendo los nombres de los ligandos *antes* que los de los átomos centrales, utilizando los prefijos multiplicadores pertinentes. Las fórmulas se construyen añadiendo los símbolos o abreviaturas de los ligandos *después* de los símbolos de los átomos centrales (Sección 2.7).

Tabla 5. Generación de nombres de complejos: ligandos sencillos

Estructura a nombrar		
Átomo(s) central(es)	cobalto(III)	2 × renio
Identifique y nombre los ligandos	amoniaco → ammino agua → acua	cloruro → cloruro
Construya el nombre	cloruro de acuapentaamminocobalto(III)	bis(tetraclorurorenato)= (Re—Re)(2-) de cesio

2.2 Átomo(s) central(es) y ligandos

El primer paso consiste en identificar el(los) átomo(s) central(es) y, por tanto, los ligandos. Por convenio, los electrones implicados en el enlace entre el átomo central y un ligando se considera que pertenecen al ligando (y esto determinará su nombre).

Cada ligando se nombra como una entidad separada utilizando la nomenclatura oportuna,⁴ generalmente de sustitución para ligandos orgánicos^{2,4,6} y de adición para ligandos inorgánicos. Un número pequeño de moléculas comunes e iones tienen **nombres especiales** cuando se encuentran en complejos. Por ejemplo, un ligando agua se representa en el nombre completo con el término ‘acua’. Un ligando amoniaco se representa por ‘ammino’ mientras que el monóxido de carbono unido al átomo central por el átomo de carbono se describe con el término ‘carbonilo’ y el monóxido de nitrógeno unido por el nitrógeno se representa por ‘nitrosilo’. Los nombres de **ligandos aniónicos** que terminan en ‘uro’, ‘ito’ y ‘ato’ no se modifican en el nombre de adición completo del complejo. Nótese que la desinencia ‘uro’ se utiliza también para los ligandos halogenuro y ‘óxido’ no se modifica. Por convenio, un solo átomo de hidrógeno coordinado se considera siempre aniónico y se representa en el nombre por el término ‘hidruro’, mientras que el dihidrógeno coordinado se trata generalmente como una entidad neutra donadora de dos electrones.

2.3 Construcción de los nombres de adición

Una vez nombrados los ligandos, puede construirse el nombre. Para ello se citan los nombres de los ligandos en orden alfabético antes del nombre del(los) átomo(s) central(es) *sin tener en cuenta* las cargas de los ligandos.

Si hubiera más de un ligando de un tipo particular unido de igual modo al átomo central, el número de esos ligandos idénticos se indica mediante el prefijo multiplicador adecuado para ligandos simples o complicados (Tabla 2), sin cambiar el orden alfabético de los ligandos establecido previamente. El orden de colocación de los signos de inclusión que se usa en los nombres cuando se necesita más de un signo de inclusión es: (), [()], { () }, { { () } }, *etc.*

Los **enlaces metal-metal** se indican colocando los símbolos de los átomos centrales entre paréntesis, en cursiva y conectados por un guión extra largo (—) después del nombre del complejo (sin dejar espacios). El **número de carga** del complejo o el **número de oxidación** del átomo central se añade como afijo al nombre del complejo. Para los **aniones** que se nombran por nomenclatura de adición se le da la desinencia ‘ato’ al nombre del átomo central, de igual modo que se usa la terminación ‘uro’ para los aniones monoatómicos (Sección 1). En algunos casos, por tradición, la raíz latina se usa para los nombres ‘ato’ como en

sulfato (para azufre), ferrato (para hierro), cuprato (para cobre), argentato (para plata), estannato (para estaño), aurato (para oro) y plumbato (para plomo).¹² Finalmente, las reglas de la nomenclatura de composición (Sección 1) se utilizan para combinar los nombres de adición de entidades de coordinación neutras o iónicas con los nombres de cualquier otra entidad que forma parte del compuesto.

2.4 Especificación de la conectividad

Algunos ligandos se pueden unir a un átomo central por distintos átomos en diferentes circunstancias. Especificar qué átomo ligante (coordinante) está unido en un complejo dado puede lograrse añadiendo **términos-κ** al nombre del ligando. El término-κ incluye la letra griega κ seguida del símbolo del elemento del átomo ligante en letra cursiva. Para ligandos más complicados el término-κ se coloca frecuentemente dentro del nombre del ligando a continuación del grupo al que se refiere. Pueden indicarse uniones idénticas múltiples a un átomo central añadiendo el número adecuado como un superíndice entre los símbolos κ y el del elemento (véase la Tabla 6). Estas posibilidades se discuten con detalle en el Libro Rojo.¹³ Si los átomos ligantes de un ligando son contiguos (es decir, están enlazados directamente), se usa en su lugar un **término-η**, por ejemplo en muchos compuestos organometálicos (Sección 2.6) y en el peróxido complejo de la Tabla 6.

Para ligandos que tienen la posibilidad de unirse mediante más de un modo de coordinación se requiere el uso de un término-κ. Casos típicos son el tiocianato, que puede unirse por el átomo de azufre (tiocianato-κS) o por el átomo de nitrógeno (tiocianato-κN) y el nitrito, que puede unirse por el átomo de nitrógeno (M—NO₂, nitrito-κN) o por un átomo de oxígeno (M—ONO, nitrito-κO). Los nombres pentaamino(nitrito-κN)cobalto(2+) y pentaamino(nitrito-κO)cobalto(2+) se usan para describir los dos nitrito-complejos isómeros catiónicos. En la Tabla 6 se encuentran más ejemplos de construcción de nombres usando los términos-κ para especificar la conectividad de los ligandos. Si en un complejo existe más de un átomo central, se puede usar también un término-κ para indicar a qué átomo central está unido el ligando (Sección 2.5).

Tabla 6. Generación de nombres de complejos: ligandos complicados

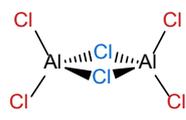
Estructura a nombrar		
Átomo central	cobalto(III) → cobaltato(III)	platino(II)
Identifique y nombre los ligandos	2,2',2''-(etano-1,2-diil= dinitrilo)tetraacetato → 2,2',2''-(etano-1,2-diil= dinitrilo) tetraacetato	cloruro → cloruro trifenilfosfano
Especifique los átomos ligantes	2,2',2''-(etano-1,2-diil= dinitrilo-κ²N) tetraacetato-κ⁴O	<i>no se necesita para cloruro trifenilfosfano-κP</i>
Construya el nombre	[2,2',2''-(etano-1,2-diil= dinitrilo-κ²N) tetraacetato-κ⁴O]cobaltato(III) de bario	diclorurobis(trifenil= fosfano-κP)platino(II)
Estructura a nombrar		
Átomo central	cobalto(III)	molibdeno(III)
Identifique y nombre los ligandos	etano-1,2-diamina peróxido → peróxido	cloruro → cloruro 1,4,8,12-tetracyclopentadecano
Especifique los átomos ligantes	etano-1,2-diamina-κ ² N η²-peróxido	<i>no se necesita para cloruro 1,4,8,12-tetracyclopentadecano-κ³S¹,S⁴,S⁸</i>
Construya el nombre	bis(etano-1,2-diamina-κ²N)= (η²-peróxido)cobalto(III)	triclouro(1,4,8,12-tetracyclopentadecano-κ³S¹,S⁴,S⁸)molibdeno(III)

2.5 Ligandos puente

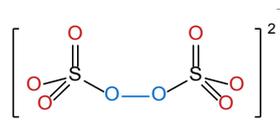
Los ligandos puente son aquellos que están unidos a más de un átomo central. Se diferencian en los nombres por la adición del prefijo ‘μ’ (letra griega mu) con el prefijo y el nombre del ligando puente separados uno del otro y del resto del nombre por guiones. Con esto es suficiente si el ligando es monoatómico, pero si el ligando es más complicado puede ser necesario especificar qué átomo ligante del ligando está unido a qué átomo central. Ciertamente, este es el caso en el que los átomos ligantes sean de tipo diferente y donde se pueden usar los términos-κ con esta finalidad.

¹² Referencia 5, Tabla X.

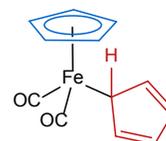
¹³ Referencia 5, Sección IR-9.2.4.



di- μ -cloruro-bis(di-cloruroaluminio(III))
[Cl₂Al(μ -Cl)₂AlCl₂]



μ -peróxido-1 κ O¹,2 κ O²-bis(tri-oxidosulfato)(2-)
[O₃S(μ -O₂)SO₃]²⁻



dicarbonil(η^5 -ciclopentadienuro)(ciclopenta-2,4-dien-1-uro- κ C¹)hierro
o dicarbonil(η^5 -ciclopentadienil)(ciclopenta-2,4-dien-1-il- κ C¹)hierro

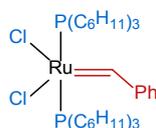
2.6 Compuestos organometálicos

Los compuestos organometálicos contienen al menos un enlace entre un átomo metálico y un átomo de carbono. Se nombran como compuestos de coordinación mediante el sistema de nomenclatura de adición (véase más arriba).

El nombre de un ligando orgánico **que se une por un átomo de carbono** puede derivarse al tratar el ligando como un anión o como un grupo sustituyente neutro. Así, el compuesto [Ti(CH₂CH₂CH₃)Cl₃] puede llamarse **tricloruro(propan-1-uro)titanio** o **tricloruro(propil)titanio**. De igual modo, para el ligando -CH₃ puede usarse 'metanuro' o 'metil'.

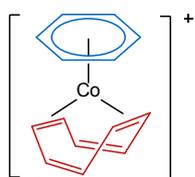
Si un ligando orgánico forma **dos o tres enlaces sencillos metal-carbono** (con uno o más centros metálicos), el ligando puede considerarse como un di- o tri-anión, en cuyo caso se usan las terminaciones 'diuro' o 'triuero' sin eliminar la 'o' terminal del hidrocarburo progenitor. De nuevo, se encuentran muy frecuentemente los nombres que se derivan de considerar este tipo de ligandos como grupos sustituyentes con los sufijos 'diil' o 'triil'. Así, el ligando bidentado -CH₂CH₂CH₂- se llamaría propano-1,3-diuro (o propano-1,3-diil) si quelata a un centro metálico y μ -propano-1,3-diuro (o μ -propano-1,3-diil) si puentea dos átomos metálicos.

Los compuestos organometálicos que contienen un **enlace múltiple metal-carbono** reciben nombres de prefijos sustituyentes derivados de los hidruros progenitores que finalizan con el sufijo 'ilideno' para un enlace doble metal-carbono y con 'ilidino' para un enlace triple. Estos sufijos sustituyen a la terminación 'ano' del hidruro progenitor o, más generalmente, se añaden al nombre del hidruro padre con inserción de un localizador y elisión de la 'o' terminal si existe. Así, la entidad CH₃CH₂CH= como ligando se llama propilideno y (CH₃)₂C= se llama propan-2-ilideno. La metodología 'diuro'/'triuero' descrita anteriormente se puede usar también en esta situación. Sin embargo, los términos 'carbeno' y 'carbino' no se usan en nomenclatura sistemática.

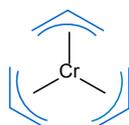


dicloruro(fenilmetilideno)bis(triciclohexilfosfano- κ P)rutenio,
dicloruro(fenilmetanodiuro)bis(triciclohexilfosfano- κ P)rutenio,
o (bencilideno)diclorurobis(triciclohexilfosfano- κ P)rutenio

La naturaleza especial del enlace de hidrocarburos insaturados con metales de modo 'side on', a través de sus electrones- π , requiere el **convenio eta (η)**. En esta nomenclatura 'hapto' el número de átomos *contiguos* del ligando coordinados al metal (la hapticidad del ligando) se indica por un superíndice sobre el símbolo eta, por ejemplo, η^3 ('eta tres' o 'trihapto'). El término- η se añade como un prefijo al nombre del ligando o a la porción del nombre del ligando más adecuada para indicar la conectividad, con localizadores si fuese necesario.



(η^6 -benceno)[(1,2,5,6- η -cicloocta-1,3,5,7-tetraeno)cobalto(1+)]

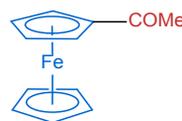


tris(η^3 -prop-2-en-1-uro)cromo,
tris(η^3 -prop-2-en-1-il)cromo,
o tris(η^3 -alil)cromo

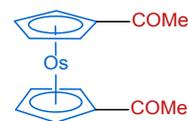
Una lista de **ligandos insaturados con enlaces- π** neutros y aniónicos puede encontrarse en el Libro Rojo.¹⁴

Nótese que el ligando ubicuo η^5 -C₅H₅, estrictamente η^5 -ciclopenta-2,4-dien-1-uro, se llama también aceptablemente η^5 -ciclopentadienuro o η^5 -ciclopentadienilo. Si el grupo ciclopenta-2,4-dien-1-uro se coordina por un solo átomo de carbono a través de un enlace σ se añade un término- κ para indicar explícitamente ese tipo de enlace. Sin embargo, el símbolo η^1 no debe usarse ya que el convenio eta se aplica solamente al enlace de átomos contiguos en un ligando.

Las moléculas discretas que contienen dos ligandos η^5 -ciclopentadienuro *paralelos* en una estructura 'sandwich' en torno a un metal de transición, como en bis(η^5 -ciclopentadienuro)hierro, [Fe(η^5 -C₅H₅)₂], se llaman genéricamente **metalocenos** y pueden recibir nombres 'oceno'; en este caso ferroceno. Estos nombres 'oceno' pueden usarse de la misma manera que se usan los nombres de hidruros progenitores en la nomenclatura de sustitución, cuyos nombres de grupos sustituyentes toman las formas de 'ocenil', 'ocenodil', 'ocenotriil' (con inserción de los localizadores pertinentes).



1-ferroceniletan-1-ona



1,1'-(osmoceno-1,1'-diil)di-(etan-1-ona)

Por convenio, los compuestos 'organoelemento' de los **elementos de los grupos principales** se nombran mediante la nomenclatura de sustitución si derivan de los grupos 13–16, pero con la nomenclatura de adición si derivan de los grupos 1 y 2. En algunos casos se usa la nomenclatura de composición si se va a transmitir poca información estructural. El Libro Rojo suministra más detalles.¹⁵

2.7 Fórmulas de los compuestos de coordinación

Las fórmulas en línea de las entidades de coordinación se escriben entre corchetes para especificar la composición de la entidad. El proceso global se muestra en la Tabla 7. El símbolo del átomo central se coloca en primer lugar y le siguen los símbolos o abreviaturas de los ligandos (en orden alfabético según el modo que se presenten en la fórmula). Cuando sea posible, el átomo que se coordina (ligante) debe colocarse más próximo al átomo central para proporcionar más información sobre la estructura del complejo. Por este mismo motivo, los ligandos puente deben colocarse entre los símbolos de los átomos centrales cuando sea posible (véanse ejemplos en la Sección 2.5). Generalmente, las fórmulas y abreviaturas de los ligandos se colocan entre signos de inclusión (salvo que el ligando contenga un solo átomo) y debe recordarse que los corchetes se reservan para definir la esfera de coordinación. La presencia de ligandos múltiples se indica con un subíndice a la derecha y a continuación del signo de inclusión o del símbolo del ligando.

Tabla 7. Generación de fórmulas lineales para complejos

Estructura		
Átomo(s) central(es)	Co	2 \times Re
Ligandos	NH ₃ , OH ₂	Cl
Ensamble la fórmula	[Co(NH ₃) ₅ (OH ₂)]Cl ₃	Cs ₂ [Cl ₄ ReReCl ₄]
Estructura		
Átomo(s) central(es)	Co	Pt
Ligandos abreviados	2,2',2'',2'''-(etano-1,2-diil)dinitrilo= tetraacetato \rightarrow edta	Cl trifenilfosfano \rightarrow PPh ₃
Ensamble la fórmula	Ba[Co(edta)] ₂	[PtCl ₂ (PPh ₃) ₂]

¹⁴ Referencia 5, Tabla IR-10.4.

¹⁵ Referencia 5, Sección IR-10.3.

2.8 Oxoácidos inorgánicos y compuestos relacionados

Los oxoácidos inorgánicos y los aniones que se forman al eliminar sus hidrones (H^+) ácidos, tienen nombres tradicionales que son muy conocidos y pueden encontrarse en muchos libros de texto: ácido sulfúrico, sulfato; ácido nítrico, nitrato; ácido nitroso, nitrito; ácido fosfórico, fosfato; ácido arsénico, arsenato; ácido arsenioso, arsenito; ácido silícico, silicato; etc. Estos nombres se retienen en la nomenclatura de la IUPAC por dos razones, en primer lugar, porque son los nombres usados invariablemente en la práctica y, en segundo lugar, porque juegan un papel especial en la nomenclatura orgánica cuando se necesitan nombres para sus derivados orgánicos. No obstante, todos los oxoácidos y sus derivados pueden considerarse como entidades de coordinación y nombrarse sistemáticamente mediante la nomenclatura de adición (Tabla 8).¹⁶

Tabla 8. Ejemplos de oxoácidos inorgánicos y derivados

Fórmula	Nombre tradicional u orgánico	Nombre de adición
H_2SO_4 o $[S(O)_2(OH)_2]$	ácido sulfúrico	dihidroxidodioxidoazufre
$(CH_3)_2SO_4$ o $[S(O)_2(OMe)_2]$	sulfato de dimetilo	dimetoxidodioxidoazufre o dimetanolatodioxidoazufre
H_2PHO_3 o $[P(H)(O)(OH)_2]$	ácido fosfónico*	dihidroxidohidrurooxido= fósforo
$PhP(O)(OH)_2$	ácido fenilfosfónico	(fenil)dihidroxidooxido= fósforo

*Nota: El término 'ácido fosforoso' se ha utilizado en la bibliografía para las especies llamadas ácido fosfónico en la Tabla 8 y para aquellas con la fórmula $P(OH)_3$, trihidroxidofósforo. En el segundo sentido se utiliza en la nomenclatura orgánica.

Los nombres tradicionales de los oxoácidos pueden modificarse conforme a reglas establecidas para nombrar derivados formados por **reemplazo funcional**.¹⁶ Así, 'tio' denota reemplazamiento de =O por =S; los prefijos 'fluoro', 'cloro', etc. y los infijos 'fluorídico', 'clorídico', etc., denotan reemplazo de -OH por -F, -Cl, etc.; 'peroxi'/'peroxo' denota reemplazo de -O- por -OO- y así sucesivamente (Tabla 9).

Si todos los grupos hidroxilo de un oxoácido son reemplazados, el compuesto ya no es un ácido y no se nombra como tal sino que tendrá un **nombre de clase funcional**,¹⁶ como por ejemplo, un halogenuro de ácido o una amida. Dichos tipos de compuestos pueden nombrarse de nuevo sistemáticamente mediante la nomenclatura de adición (Tabla 10).

Una construcción especial se usa en los **nombres de hidrogeno**, que permite la indicación de los hidrones unidos a un anión sin especificar exactamente dónde. En dichos nombres, la palabra 'hidrogeno' (sin tilde) se coloca al principio del nombre con un prefijo multiplicador (si fuese pertinente) y sin espacio entre ella y el resto del nombre, el cual se encierra entre paréntesis. Por ejemplo, dihidrogeno(difosfato)(2-) denota $H_2P_2O_7^{2-}$, un ion difosfato al que se le han añadido dos hidrones en posiciones desconocidas o al menos no especificadas.

Los nombres comunes de oxoácidos parcialmente deshidronados, tales como hidrogenofosfato, HPO_4^{2-} , y dihidrogenofosfato, $H_2PO_4^-$, pueden considerarse casos especiales de dichos nombres de hidrogeno. En estos nombres simplificados, se excluyen el número de carga y los paréntesis. De nuevo, estos aniones particulares pueden nombrarse sistemáticamente mediante la nomenclatura de adición. La palabra 'hidrogeno' se coloca *separada* al

Tabla 9. Ejemplos de derivados de oxoácidos inorgánicos y aniones formados por reemplazo funcional

Fórmula	Nombre que indica el reemplazo funcional	Nombre de adición
H_3PS_4 o $[P(S)(SH)_3]$	ácido tetratiofosfórico o ácido fosforotetratioico	tris(sulfanuro)sulfuro= fósforo
H_2PFO_3 o $[PF(O)(OH)_2]$	ácido fluorofosfórico o ácido fosforofluorídico	fluorurodihidroxido= oxidofósforo
$S_2O_3^{2-}$ o $[S(O)_3(S)]^{2-}$	tiosulfato o sulfurotioato	trioxidosulfuro= sulfato(2-)
$[O_3S(\mu-O_2)SO_3]^{2-}$	peroxidisulfato	véase la Sección 2.5

Tabla 10. Ejemplos de clases de nombres funcionales y sus correspondientes nombres de adición

Fórmula	Nombre de clase funcional	Nombre de adición
PCl_3O	tricloruro de fosforilo	triclorurooxidofósforo
SCl_2O_2	dicloruro de sulfurilo	diclorurodioxidoazufre
$S(NH_2)_2O_2$	diamida sulfúrica	diamidodioxidoazufre

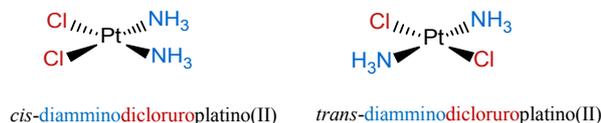
¹⁶ Referencia 5, Capítulo IR-8.

formar los nombres análogos en la nomenclatura orgánica; por ejemplo, hidrogeno sulfato de dodecilo, $C_{12}H_{25}OS(O)_2OH$. Esta diferencia entre los dos sistemas tiene como consecuencia que el ion HCO_3^- , que contiene carbono, pueda llamarse igual de correctamente 'hidrogeno carbonato' o 'hidrogenocarbonato' (pero nunca bicarbonato).

3 ESTEREODESCRITORES

La geometría aproximada alrededor del átomo central se describe mediante un **símbolo del poliedro** colocado al principio del nombre. El símbolo se construye con letras mayúsculas cursivas para la geometría y un número que indica el número de coordinación. Símbolos de poliedros que se usan frecuentemente son: *OC-6* (octaedro), *SP-4* (plano-cuadrado), *T-4* (tetraedro), *SPY-5* (pirámide cuadrada) y *TBPY-5* (bipirámide trigonal). Listas más completas pueden obtenerse en la referencia.¹⁷

Las posiciones relativas de los grupos ligantes en torno a un átomo central se describen mediante un **índice de configuración**, que se determina de un modo particular para cada tipo de geometría,¹⁸ basado en las prioridades de Cahn-Ingold-Prelog de los grupos ligantes^{19,20} y puede cambiar si varían los ligandos aunque la geometría permanezca invariable. También puede describirse la configuración absoluta. Generalmente, los índices de configuración se utilizan solamente cuando existe más de una posibilidad y se tiene que identificar un estereoisómero en particular. Los estereodescriptores completos de los complejos plano-cuadrados de platino que se muestran a continuación son (*SP-4-2*) y (*SP-4-1*) para los isómeros *cis* y *trans*, respectivamente. Alternativamente, puede usarse una serie de estereodescriptores tradicionales en situaciones particulares. Así, los isómeros posibles para un centro plano-cuadrado coordinado por dos grupos ligantes de un tipo y dos de otro se describen como *cis* (si los ligandos idénticos están próximos uno del otro) o *trans* (si están opuestos uno al otro).



Los centros octaédricos con cuatro ligandos de un tipo y dos de otro también pueden describirse como *cis*- (si los dos ligandos idénticos están coordinados próximos uno del otro) o *trans*- (si están opuestos). Los centros octaédricos con tres ligandos del mismo tipo pueden describirse como *fac*- (facial) si los tres ligandos de un tipo particular se localizan en los ángulos de una cara del octaedro o *mer*- (meridional) si no lo están (se encuentran en un plano que contiene dos aristas del octaedro).

4 RESUMEN

Este documento proporciona un esquema de las reglas de nomenclatura esenciales para elaborar nombres y fórmulas de compuestos inorgánicos, de coordinación y organometálicos. El documento complementario de sistemas de nomenclatura de **química orgánica**² también será de utilidad al lector.

Los nombres y las fórmulas sólo cumplen la mitad de su papel cuando se crean y se usan para describir o identificar compuestos, por ejemplo, en publicaciones. Conseguir que alcancen plenamente su papel requiere que el lector de un nombre o fórmula sea capaz de interpretarla con éxito, por ejemplo, generando un diagrama estructural. El presente documento también está destinado a ayudar en la interpretación de nombres y fórmulas.

Finalmente, queremos advertir que la IUPAC ha dado recomendaciones sobre la representación gráfica de estructuras químicas y sus configuraciones estereoquímicas.^{21,22}

¹⁷ Referencia 4, Tabla P5; Referencia 5, Tablas IR-9.2 e IR-9.3.

¹⁸ Referencia 5, Sección IR-9.3.3.

¹⁹ R. S. Cahn, C. Ingold, V. Prelog, *Angew. Chem.* **78**, 413–447 (1966), *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **5**, 385–415 y 511 (1966).

²⁰ V. Prelog, G. Helmchen, *Angew. Chem.* **94**, 614–631 (1982), *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, **21**, 567–583 (1982).

²¹ J. Brecher, K. N. Degtyarenko, H. Gottlieb, R. M. Hartshorn, G. P. Moss, P. Murray-Rust, J. Nyitrai, W. Powell, A. Smith, S. Stein, K. Taylor, W. Town, A. Williams, A. Yerin, *Pure Appl. Chem.*, **78**(10), 1897–1970 (2006).

²² J. Brecher, K. N. Degtyarenko, H. Gottlieb, R. M. Hartshorn, K.-H. Hellwich, J. Kahovec, G. P. Moss, A. McNaught, J. Nyitrai, W. Powell, A. Smith, K. Taylor, W. Town, A. Williams, A. Yerin, *Pure Appl. Chem.*, **80**(2), 277–410 (2008).