

Cristales porosos impregnados con líquidos iónicos para captura y separación de dióxido de carbono,
José Manuel Vicent-Luna y Sofía Calero

Profármacos, ejemplos seleccionados del mercado español I. Profármacos unidos al transportador,
Carolina Burgos, Ana M. Cuadro y Julio Álvarez Builla

La acreditación internacional de química por ANECA-RSEQ, Ana Isabel Bonilla-Calero,
David Carabantes-Alarcón y Miguel Ángel Sastre-Castillo

Entidades colaboradoras



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
MADRID

Socios Corporativos



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

Silvia Lacorte Bruguera
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, CSIC

Óscar Millet
CIC bioGUNE

Gabriel Pinto
Universidad Politécnica de Madrid

M.^a Carmen Redondo
Colegio Estudio

María C. de la Torre
Instituto de Química Orgánica General, CSIC

Gregori Ujaque
Universitat Autònoma de Barcelona

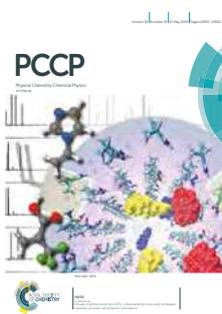
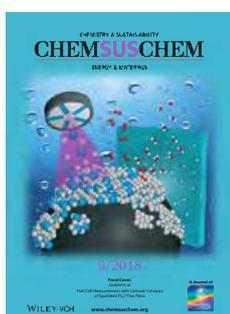
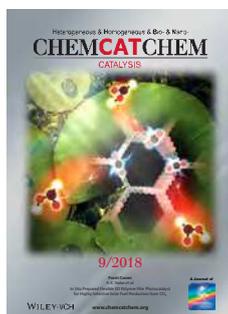
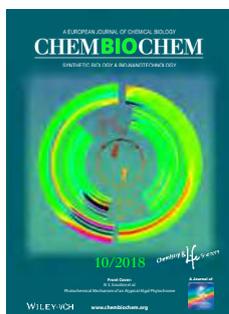
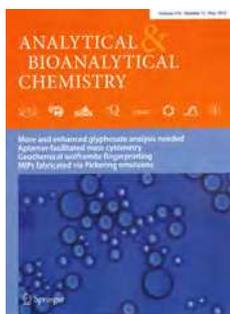
Secretaría Editorial

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

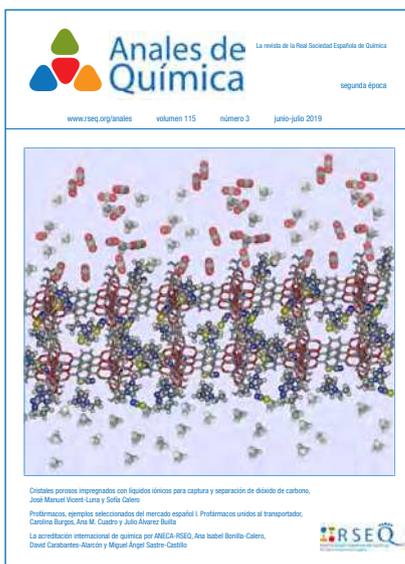
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense Ciudad Universitaria.
28040 Madrid
Tel (+34) 913 944 356. Fax (+34) 915 433 879



Revistas patrocinadas por la Real Sociedad Española de Química



Sumario



Composición y producción:

Moisés Fernández
Edinova Taller Editorial

Editorial	188
<i>Miguel Á. Sierra</i>	
Entrevista Alfredo Pérez Rubalcaba	189
<i>María C. de la Torre y Miguel Á. Sierra</i>	
Cartas al editor	197
Ensayo	
Ensayo Rolf Huisgen y el premio Nobel de Química	198
<i>José Elguero</i>	
Investigación Química	
Cristales porosos impregnados con líquidos iónicos para captura y separación de dióxido de carbono	200
<i>José Manuel Vicent-Luna y Sofía Calero</i>	
Profármacos, ejemplos seleccionados del mercado español I. Profármacos unidos al transportador	209
<i>Carolina Burgos, Ana M. Cuadro y Julio Álvarez Builla</i>	
Nitratos: ¿buenos o malos?	218
<i>Francisco Lloret Pastor</i>	
Historia de la Química	
Hacia la igualdad de género en la historia del sistema periódico	227
<i>Ana Isabel Morales López</i>	
Historia de una Tabla Periódica	235
<i>Luis Sánchez y Agustín Galindo</i>	
Enseñanza de la Química	
El electrón diferencial (o diferenciador). ¿Para qué sirve?	241
<i>Gabino A. Carriedo</i>	
Las dificultades de cristalización de cloruro de sodio (NaCl): un proyecto de investigación integrador del currículo de Ciencias en ESO y Bachillerato	244
<i>Francisco Rojas Melgarejo</i>	
La acreditación internacional de química por ANECA-RSEQ	249
<i>Isabel Bonilla-Calero, David Carabantes-Alarcón y Miguel Ángel Sastre Castillo</i>	
Noticias	255
Política científica	279
Obituario	280
Alfredo Pérez Rubalcaba, el químico que mejoró su entorno	
Radicales (muy) libres	
<i>Traduttore traditore</i>	282
<i>Javier de Mendoza</i>	

Anales de Química está disponible en versión impresa. Para más información, por favor contactar con pyanezs@ucm.es

Miguel Ángel Sierra

“La muerte de cualquier hombre me disminuye, porque estoy ligado a la humanidad; y por tanto, nunca preguntes por quién doblan las campanas, porque están doblando por ti”. Es una frase que ya he usado en estas editoriales porque representa que, al final, todos somos parte de una unidad más grande. Sin embargo, hay ocasiones en las que la pérdida de una persona especial representa algo que te llega adentro, por que esa persona es alguien a quien conoces, respetas y admiras. No pretendo haber sido amigo de Alfredo Pérez Rubalcaba. Ya me hubiera gustado. Sin embargo, sí nos conocíamos desde hace más años de los que quiero acordarme. Éramos jóvenes entonces. Alfredo nos daba clase, unas veces de teoría, la mayor parte, como PNN que era, de prácticas. De aquellos tiempos nos queda el recuerdo de una persona llena de carisma, que sabía enseñar y a quien le gustaba enseñar. Después unas cañas, unas risas y decírnos unos a otros “oye qué tío más majo”.

Hablar de lo que hizo en política Alfredo no es necesario. Para eso están las hemerotecas y de eso hablarán los libros de historia. En lo que a nosotros nos toca, nunca se reconocerá suficientemente su papel en acabar con un sistema educativo decimonónico y escasamente democrático, la Ley de Reforma Universitaria, su participación en establecer un tejido investigador en un país como éste, que carecía hasta de lo más elemental para investigar, y otras tantas cosas que las nuevas generaciones dan por supuestas. Y eso que siempre se quejó de que no le habían dejado llegar hasta el final con las reformas que pretendía.

Consiguió arrancar de un país que despertaba de un letargo de 40 años lo que en aquellos momentos pudo. Con ello cambió la Universidad y puso en marcha la gestión de la Ciencia en España. ¿Qué podría haber sido más? Seguro. Pero, para los que somos lo suficientemente mayores como para tener recuerdos y no tan viejos como para tener nostalgia, significó, entre otras cosas, que pudiéramos enfrentarnos al futuro en nuestro trabajo con esperanza y con ilusión. Obviamente no fue labor únicamente de Alfredo. La oportuna carta al editor de Pepe Elguero, que se publica a continuación, aporta una fotografía con algunas de las personas sin cuyo esfuerzo nunca habríamos llegado a donde estamos ahora. O mejor a donde estábamos hasta ahora, que también esto se lo escuché a Rubalcaba y no solo una vez.

Como he dicho, no voy a entrar a listar sus logros políticos. Otros lo han hecho y lo harán mejor de lo que podría hacerlo yo (alabanzas y críticas incluidas). No obstante, hay una cualidad que demostró siempre (al menos conmigo) y fue su capacidad para escuchar. Su vuelta a este Departamento de Química Orgánica estuvo precedida de críticas, gruñidos, expresiones como “qué viene éste a hacer aquí, ya



veras tú lo que dura”. Y duró. Duró el tiempo que esa amante celosa que al final nos llama a todos le permitió. Verle a las 8 de la noche dando prácticas de segundo, rodeado de sus alumnos, era algo que sorprendía a muchos y a algunos nos admiraba. Me consta que podría haber estado en la Universidad con una reducción completa de clases. Pero no. Cumplía con su decente labor docente como cualquiera de nosotros. Daba su clase de las ocho y media y sus prácticas cuando le tocaba. Ver a un ex vicepresidente del gobierno de tu país dando clases de segundo impresiona. Pero, usando una expresión suya: “ay amigo, algunos tenemos una profesión aparte de la política, otros no y así nos va”.

Creedme, de lo único que he escuchado a Alfredo quejarse en estos años en la Facultad ha sido de los “amigos” que, una vez fuera de la política, o precisamente por motivos políticos, dejaron de hablarle. Su frase “ay amigo es que fuera del poder dejas de interesar” define muy bien lo que pensaba al respecto. Nunca dejó de echar una mano cuando se le pedía ni de dedicarte un rato si hacía falta. Bien los saben sus alumnos que en su mayoría le adoraban.

No voy a continuar. Me disgustaría caer en el sentimentalismo. Anales de Química vuelve a publicar en homenaje a Alfredo Pérez Rubalcaba la entrevista que concedió a esta revista (y una de las pocas que se permitió en vida), pocos días antes de cesar como Secretario General del PSOE. En nombre de *Anales de Química*, nuestro respeto y nuestra admiración a una gran persona, un político que contribuyó decisivamente a cambiar España, y un excelente Profesor. Además, nuestro cariño y apoyo a nuestra compañera Pilar en estos momentos tan difíciles.

Hasta siempre Profesor Rubalcaba.

Gracias por leer.

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

ALFREDO PÉREZ RUBALCABA

QUÍMICO Y POLÍTICO

Actual Secretario General del PSOE y Diputado en las Cortes por Madrid, Alfredo Pérez Rubalcaba, se licenció en Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid. Realizó su Tesis Doctoral en la Facultad de Ciencias Químicas de esta Universidad de la que en la actualidad es Profesor Titular.

Su ingreso en el PSOE en 1974 le permitió colaborar en diversas comisiones de enseñanza e investigación. Años más tarde, con la llegada del PSOE al gobierno en 1982, Alfredo Pérez Rubalcaba, ejerció distintos cargos relacionados con la Universidad, la investigación y el sistema educativo. Diez años más tarde, en 1992, asumió la cartera de Educación y Ciencia, y posteriormente se hizo cargo del Ministerio de la Presidencia y Relaciones con las Cortes. Volvió al gobierno en el año 2006 como Ministro del Interior, en el año 2010 asumiría también el cargo de Vicepresidente Primero y Portavoz del gobierno.

Rubalcaba nos recibió en su despacho de la calle Ferraz en Madrid, sede central del PSOE el día 10 de Abril de 2014. Después de una conversación informal empezamos la entrevista-conversación que transcurrió de forma relajada.

— Alfredo, según nuestros datos eres el primer químico de tu familia. ¿Qué te llevó a la Química?

Es verdad, no hay ningún químico en mi familia. La historia que os voy a contar probablemente no sea la mejor forma de elegir una carrera. Yo quería hacer Filosofía y Letras pero mi padre no era de la misma opinión. Como tenía muy buenas notas en el Bachillerato él quería que fuese, cómo no, Ingeniero. Entre la Ingeniería y la Filosofía aparecieron las Ciencias. En aquel entonces ya empecé a negociar y le convencí para hacer una carrera de Ciencias. Al terminar el primer año ya tenía claro hacer Química y de ahí hasta ahora.

— *Nosotros pensábamos que fue tu afición por la novela policíaca la que te llevó a la Química.*

No, esta afición es posterior.

— *¿Algún autor favorito?*

La lista sería interminable: empezaría por los norteamericanos, Chandler, McBain, Thompson, Ellroy, Leonard Seguiría por los que podríamos denominar clásicos, Conan Doyle, Poe, Collins, A. Christie, Simenon. Y no podría olvidar a los españoles, Montalbán, Silva, Bartlett, Juan Madrid, Domingo Villar. Cuando empecé a leer novela negra, lo normal era la novela negra americana. Ahora las librerías están llenas de novelas de todos los países. Hay buena novela negra, por supuesto, sueca, china, islandesa griega. Hay un autor griego Petros Márkaris, muy conocido, que escribe novela negra. Describe la actual crisis en Grecia con un gran sentido del humor, como viven los policías la crisis, sin coches, van andando, sin sirenas. Espectacular. Pero también me apasiona la novela policíaca romana, egipcia, de todas las épocas.

— *Nos parece que la Ciencia Ficción está más próxima a la Química.*

Yo me aficiono a la Ciencia Ficción más tarde, cuando terminé la carrera. Fue una amiga, Profesora de Política, Estrella López Keller quien me aficionó a la Ciencia Ficción. Luego dejé la Ciencia Ficción y apareció la novela negra, alrededor de los 90.

— *Es obligado preguntarte ¿dónde te sientes más suelto, en un aula con 100 es-*

tudiantes o en el hemiciclo del Congreso de los Diputados?

¿Sabéis qué pasa?, que no es muy distinto. Veréis, yo tengo una manía y es prepararme mis discursos. Yo me los escribo. Lo he dicho muchas veces y es porque en el fondo una intervención en el Congreso es casi una clase. Por ejemplo, mi última intervención sobre Cataluña. He trabajado en esto todo el fin de semana. El discurso debe tener una lógica, esto viene de mi época como científico. Cada paso tiene que llevar al siguiente y al final a una conclusión. Además, como hacía en mis clases, procuro que mis discursos sean inteligibles, no solo para los que me escuchan en el Parlamento sino para los de fuera. Inevitablemente, a veces, esto quita fuerza política al discurso. Ya sabéis que la política se construye sobre frases muy cortitas y muy claras. Se dice mucho en las agendas políticas que la política es pedagogía. Sin embargo, en mi caso es así, como puede verse en mis discursos y por eso necesito hacerlos yo.

Volviendo a este discurso sobre Cataluña me costó muchísimo. Sabía lo que quería decir pero no encontraba ni el orden ni la lógica. Me entendéis perfectamente como profesores. Seguro que esto os pasa.

— *Claro, además lo que dices nos recuerda mucho a cómo se estructura un trabajo científico.*

Pues claro, o una Tesis Doctoral, lo que os digo sobre cómo preparo mis discursos políticos es muy científico.

— *En este sentido Alfredo, ¿te sientes solo en un Parlamento con tan pocos*

“Una intervención en el Congreso es casi una clase”

científicos? Seguro que además notas diferencias entre una mayoría de abogados y economistas y una abrumadora minoría de científicos.

Si, si, clarísimamente. Los enfoques son completamente distintos. Volvemos a Cataluña. Yo hice un discurso y Rajoy otro. El de Rajoy fue jurídico. El mío fue político. Es verdad que esto puede tener otras interpretaciones. Probablemente Rajoy tenga serios problemas para hacer un discurso político sobre Cataluña y yo no. Ha dicho muchas barbaridades cuando estaba en la oposición. Y además, Rajoy es un registrador de la propiedad y yo soy un químico. Quizá sea eso también.

Hacer una Tesis Doctoral es lo más parecido a hacer una ley. Partes de



En los Jardines del Campus de Ciencias de la Universidad Complutense (hacia 1980).

Hacer una Tesis Doctoral es lo más parecido a hacer una ley

unos hechos experimentales, los analizas y al final tienes unas conclusiones que racionalizan esos hechos experimentales. Este proceso es análogo a hacer una ley. ¿Y sabéis dónde chocan más la ciencia y la política para alguien como yo con una formación científica?, pues en que en un laboratorio si te falla un experimento haces otro y vas cambiando las condiciones experimentales hasta que encuentras lo que buscas. En política no. En política una vez que tomas una decisión ya no es tan fácil volver atrás.

Continuando con esto, en mi época en el Ministerio de Educación hice algo que nunca se había hecho en España, experimentar. Para desarrollar la LOGSE (que dicho sea de paso es una ley mucho mejor de lo que se dice y algún día la historia lo reconocerá así) hicimos experiencias previas. Me daba muchísimo miedo hacer algo sin saber cuál sería su resultado. Esto es lo que le falta a la política, el sistema de prueba y error. Algo que es absolutamente racional para un científico no existe en política. Por eso los científicos somos muchas veces más lentos en la toma de decisiones. Este es un tema que como podéis imaginar no es la primera vez que lo pienso y que he analizado en profundidad.

— Esto es una opinión personal, pero probablemente el nivel de éxito es mayor en las leyes que se elaboran siguiendo un

criterio “experimental” que en aquellas que se hacen de forma “tradicional”.

Si. Esto es muy anglosajón. Para cambiar algo importante, lo razonable sería ver como funcionan los cambios. Lógicamente dentro de unos límites ya que el proceso no se puede llevar al infinito porque no avanzaríamos. Otra cosa que en política es buena es la rectificación (algo que en ciencia se da por supuesto). Pero no os engañéis. En política rectificar se considera que equivale a reconocer un error. ¿Os acordáis de la frase de Fraga *Usted solo acierta cuando rectifica*? La frase es muy buena pero no digáis que no choca con la racionalidad. Oiga no pasa nada, yo he hecho esto, se ha aprobado en las Cortes, ha salido mal y lo rectifico. Pero eso no sucede así, la política tiene reglas que chocan a veces con la racionalidad científica. Tened en cuenta que la política se escribe muchas veces a grandes brochazos: La comunicación es un titular, pero mira debajo. Debajo del titular tiene que haber un sustrato, tiene que haber una base, tiene que haber algo. Esa es mi forma de ver las cosas. No todo el mundo lo ve igual. Hay quién sólo piensa en los titulares.

— Estas ideas derivan sin duda de tu formación.

Si claro. Estudié 5 años de Química y luego estuve 10 años en la Facultad. Me marché con 32 años y había llegado con 17. Son 15 años en los que te moldeas y construyes tus esquemas de razonamiento.

— Hablando de la Facultad y de aquellos años, si te decimos magnesianos, bruto de la cueva de Marinas,

En realidad habéis hecho una mezcla. Es verdad que en la cueva de Marinas había unos aparatos muy sofisticados, “aparatosos”, valga la redundancia. Yo tenía uno un poco más modesto para filtrar magnesianos. Lo llamábamos el “bruto mecánico”. En aquel momento ponían en televisión una serie que se llamaba Mazingher Z. Este robot tenía enemigos, me acuerdo ahora de uno que se llamaba Brutus. Yo a cada experimento le ponía el nombre de uno de estos. Mis compañeros de laboratorio recortaban el cromo correspon-

diente y lo ponían allí.

— *Un miembro del comité editorial (no te voy a decir quién) nos dijo que cantabas como Serrat y que además los hacías muy bien. ¿Sigues cantando?*

Bueno, ya no canto o canto poco. Pero sí, cantaba bien. Eso es muy cántabro. Los cántabros solemos cantar bien,

“**Otra cosa que en política es buena es la rectificación**”

ahí queda eso, y en mi casa cantábamos muy bien. La verdad es que yo imitaba a Serrat y canto bien todavía, eso sí con registros un poco diferentes, me gustaba cantar. En el Norte es muy frecuente que las fiestas familiares acaben cantando. Mi madre hacía una segunda maravillosa.

— *Estos son recuerdos de los que te conocen.*

Sí, seguro que me han oído cantar. Además, yo cantaba mucho en el laboratorio mientras trabajaba.

“**Para correr delante de la policía hay que ir con la masa**”

— *Ahí, animando al magnesiano.*

Sí. Yo trabajaba en aquella época en un laboratorio desde el que se veían las mejores puestas de Sol del mundo. Son maravillosas, diferentes completamente en primavera o en otoño.

¿El otro día fui a la Facultad, sabéis? Voy a contaros una cosa. Yo a veces voy a la Facultad. Pocas, pero si me veis por allí pensad que algo pasa porque suelo ir cuando estoy mal. No voy mucho, pero subo al Departamento me tomo un café con los amigos, y bueno.

— *Todo el mundo sabe que fuiste un velocista brillante. Tenías los 100 m por debajo de los 11s. Recordando aquella época, correr así de bien tuvo que ser muy útil delante de la policía*

No, no. Os voy a explicar, no. Veréis, para correr delante de la policía hay que ir con la masa. Si corres mucho y te destacas te ven. Lo ideal era estar en el centro, rodeado. Correr mucho no era bueno, todo lo contrario. Había que reprimirse. Si te ponías el primero te atizaban. Siempre en una “mani” hay que ir en el grupo del centro.

“**Mi generación llegó a la política de forma completamente distinta a como se llega ahora**”

— *¿En aquellos momentos pensabas que llegarías a ser Ministro del Interior?*

No, para nada. Mi generación llegó a la política de forma completamente distinta a como se llega ahora. Ahora decides entrar en política, incluso hay gente que estudia para ello, lo que me parece bien. En mi generación no. Lo último que imaginé es que iba a dedicarme a la política. Yo me hice antifranquista. Me fastidiaba la dictadura y de ahí pasé a la izquierda. Pero fue cuando mataron a Enrique Ruano cuando descubrí que no había libertad. Como veis fue algo, muy elemental.

— *¿Así decidiste dejar la Química?*

No. Yo era responsable de universidad del Partido Socialista en aquel momento. Bueno, exactamente era responsable de los profesores no numerarios (PNNs). De allí salió mucha gente relativamente joven que luego se dedicó a la política. Yo trabajé en el programa de universidades del PSOE en el 82. De hecho, creo que la redacción final de ese programa la hice yo. Cuando nombraron a José María Maravall Ministro de Educación me llamó un día y me dijo que lo razonable era que quien había cocinado el programa lo aplicase. Tengo que decir que Jose Mari era amigo mío y esto me pareció sensato. Pero le dije “vale, Jose, pero yo no

voy a dejar mi carrera científica, todo lo más un año o dos” y, bueno, aquí estoy.

— *¿No te arrepientes? ¿No añoras la Universidad?*

Me daba tanta pena, que cuando iba a la Secretaría de Estado que entonces estaba en Serrano 150, bajaba por la N-VI y pasaba por delante de la Facultad de Biológicas. Oye, me daba tanta pena que tuve que cambiar de ruta. Lo echo realmente de menos. Intenté aguantar. Estuve dando clases mientras era Director General. Después lo dejé y volví otra vez entre el 96 y el 2000. Fijaos si lo echo de menos.

— *Si te parece, pasamos a una parte más política. Hemos tenido durante la democracia muchas leyes de educación, lo que para los docentes es como poco desconcertante. ¿No te parece que es necesario un pacto de estado sobre la educación que dure 40 años como se hace fuera de aquí?*

No ha habido tantas leyes. La estructura del sistema educativo español la cambia la ley de 1970 de Villar Palasi y el siguiente cambio es el de 1992 con la LOGSE. Después ha habido cambios pero no en lo fundamental. La estructura educativa no ha cambiado desde el 92. Se han hecho muchas reformas parciales, aunque tampoco tantas. Si os dais cuenta la ley de Pilar del Castillo no llegó a entrar en vigor porque el PSOE la bloqueó en 2004. Después vino la ley de calidad de 2006 y ahora la que acaba de hacer Wert. Cada Ministro de Educación tiene la necesidad, no sé muy bien el porqué, de decir que ha hecho algo histórico. Muchas leyes que se han vendido como cambios fundamentales del sistema educativo son solo cambios



Con José María Maravall, hacia 1983.

“Los mecanismos de creación de excelencia deben entrar en el sistema educativo progresivamente”

la sociedad del conocimiento en la que vivimos el fracaso escolar, que como os digo es un fracaso social, te puede llevar al final a una situación de exclusión social. La sociedad a la que vamos exige cada vez más conocimiento y eso hace que el fracaso escolar sea un drama social, que puede crear legiones de excluidos.

Los mecanismos de creación de excelencia son más complicados de establecer. Estos mecanismos deben entrar en el sistema educativo progresivamente. Buscar excelencia en primaria me parece que carece de sentido, en bachillerato ya tiene más sentido y en la universidad todo el sentido. En el doctorado todo debe ser excelencia.

Esto nos lleva a otro problema y es que el tratamiento de la excelencia se confunde a menudo. Se oye por ejemplo, “mi hijo tiene muchos sobresalientes y está en clase con gente que suspende y entonces se me retrasa”. Eso cuando los niños tienen seis, siete años es una monstruosidad. La educación en los niveles obligatorios debe buscar que todos los jóvenes salgan adelante, la igualdad de resultados. Después ya no. Después hay que alcanzar la igualdad de oportunidades que, por supuesto, es compatible con la excelencia.

Es verdad que se dice que nuestro sistema educativo tiene un problema con la excelencia, nos lo dice “PISA”. Esto de PISA es tan discutible. Yo no estoy tan seguro. Os voy a dar un dato, los estudiantes Erasmus miden la calidad de un sistema en los niveles más altos. Los resultados de los estudiantes Erasmus españoles son excelentes. Lo mismo pasa con nuestros estudiantes postdoctorales.

— Una pregunta muy concreta. ¿Qué va hacer el PSOE con la ley Wert si gana las elecciones y vuelve al gobierno?

La vamos a derogar. La ley Wert es un pastiche. Tiene una parte ideológica como es meter la religión católica en el currículo académico y hacer valer la

menores. Desgraciadamente, se ha instaurado la idea de que ha habido muchas leyes de educación, pero no es cierto.

¿Tú crees entonces que no es necesario un pacto de estado? Lo que percibimos los que estamos implicados en la docencia es que hay cambios constantes. Esto provoca un verdadero desconcierto. Por ponerte un ejemplo, hemos llegado a cambiar el sistema de calificación de Tesis Doctorales 2 veces en menos de 3 meses.

Esos son cambios de forma. Cambios de fondo, de estructura, no los ha habido. Un cambio de fondo sería, por ejemplo, declarar la enseñanza obligatoria hasta los 18 años. Eso sí te cambia la vida. Eso sí, cambios menores los hay con frecuencia. En primaria y en secundaria cada comienzo de curso. Pero os voy a decir una cosa: quien piense que el derecho administrativo cambia por si solo la educación se equivoca. Para cambiar lo que pasa dentro de un aula hacen falta muchas otras cosas.

Nuestro sistema educativo tiene una estructura similar a la del finlandés, que es uno de los mejores sistemas educativos del mundo. Nuestro problema, no es estructural, no es “macro” sino “micro”. En vez de organizar una pelea sobre cómo estructuramos la secundaria, deberíamos preguntarnos cómo cambiar lo que pasa en el aula, me refiero a la atención del profesor al alumno. Siendo claro: la formación de los profesores.

Yo creo que ésta es nuestra asignatura pendiente. Un sistema distinto de formación del profesorado. Ahí fui co-barde. Cuando hicimos la LOGSE fuimos conservadores en el tema clave de la formación inicial del profesorado. Al final, es esencial establecer cómo se forma un profesor.

Un pacto educativo, sí. Esto nadie lo sabe. En la última legislatura de Zapatero, Ángel Gabilondo tuvo un pacto cerrado. Os preguntareis por qué no se cerró. Pues por el sistema de admisión de alumnos en los centros educativos. Esto es un problema ideológico: no es lo mismo que el alumno elija el centro que el centro elija al alumno. El PP quería a toda costa que los centros eligieran a sus alumnos y ahí acabó todo.

— En este país hay una resistencia muy fuerte cuando se trata de promover la excelencia educativa. Se habla de falta de igualdad, trato discriminatorio ¿No consideras que lo que se debe promover es la igualdad absoluta de oportunidades pero, al mismo tiempo, hacer una política de estado para promover la excelencia en los distintos niveles educativos?

Este es un magnífico debate. Es verdad que las políticas educativas se preocupan más del que fracasa que del que sale adelante. Y tiene lógica. El fracaso escolar es un fracaso social además de individual. Os voy a decir más y esto no lo percibe la gente: en

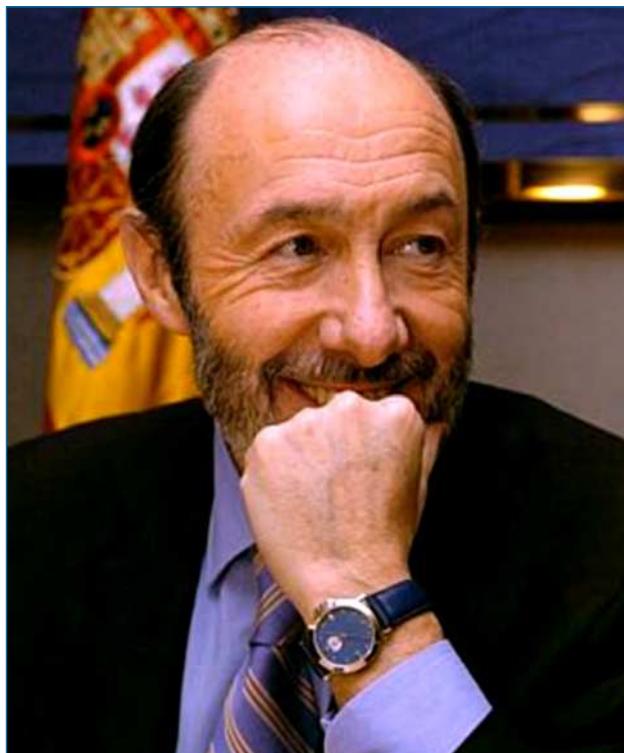
“Derogaremos la ley Wert”

nota en esta asignatura para becas, selectividad etc. Este tema estaba ya “pacificado”. El sistema educativo tenía un equilibrio bastante conseguido entre el que quiere estudiar religión y el que no quiere. Por poner otro ejemplo, también es ideológico permitir que los solares destinados a la educación se pongan en manos de la educación privada o prolongar los conciertos educativos hasta seis años. No sé si os habéis dado cuenta, pero es la primera vez en la historia en la que desaparece el carácter de servicio público de la educación. La educación española ha sido un servicio público desde los años 70 del siglo pasado. ¿Por qué lo quitan si es evidente para cualquiera que es un servicio público? Por ideología.

Luego está la cuestión de la formación profesional. Corremos el riesgo de volver a los 70, en los que la FP era una vía educativa de segunda división. Nosotros tratamos de que a la formación profesional se accediese con el título de ESO, creamos una FP superior y todo esto porque creemos que nuestro sistema educativo tiene que tener dos ramas interconectadas: la profesional y la académica. La Universidad está al final del todo y, en los años 70 y 80 se “quedó” con toda la educación superior. Ese error se intentó corregir en la LOGSE con la creación de la FP superior. No toda la enseñanza superior debe estar en la Universidad, ese es mi criterio. La ley Wert coloca otra vez la FP como una salida para gente “que no pasa”.

— ¿Entonces cuál es el futuro?

El futuro es la flexibilidad. Si miramos lo que hay por ahí fuera, en países como Estados Unidos, que tienen tasas de educación superior más altas que la nuestra, la gente va y viene de la Universidad. Hacen un curso, pasan a trabajar, vuelven a la Universidad, incluso mientras trabajan. Nos tenemos que meter en la cabeza que la formación en la Universidad debe cubrir toda una vida. Lo veis, ¿no? Tal cual van las cosas, los trabajadores van a tener que actualizarse permanentemente, lo que implica flexibilidad. O lo que es lo mismo, que alguien que haya hecho FP pueda entrar



Alfredo Pérez Rubalcaba en 2006.

en la Universidad en cualquier momento de su vida profesional si lo desea o si lo necesita. Esto, que se hace rutinariamente en otros países, me parece mucho más justo en términos sociales: el estar fuera de la Universidad unos años por los motivos que sean y no quedar excluido para siempre del sistema educativo. Así se enriquece al país en términos de justicia social y además es el futuro de la Universidad.

“El futuro de la educación es la flexibilidad”

— ¿Hay que cambiar entonces el concepto actual de Universidad?

Pues claro. La Universidad tiene que ser más flexible, más dinámica, sin las rigideces actuales. Necesitamos una Universidad distinta en la que se pueda estudiar por la mañana, por la tarde, incluso por la noche, en la que te puedas reincorporar en función de tus necesidades. Vamos a una Universidad completamente distinta.

— ¿Y de dónde van a salir los recursos para poner esto en marcha?

Este sistema no es más caro. Se trata de mejor organización y mayor flexibilidad. Yo tengo claro que hay que ir hacia esto. En cualquier caso, España no saldrá adelante reduciendo su gasto educativo. Y eso es lo que está pasando en los últimos dos años.

— Otro problema es el empobrecimiento de la formación en Ciencias que está experimentando el país.

“Hay que pagar mejor a los profesores y formarlos de una manera análoga al MIR”

Yo creo, otra vez, que tiene que ver con la formación inicial del profesorado, sobre todo en Bachillerato. En todo caso, lo del empobrecimiento habría que medirlo. No es lo mismo que estudie un 20% de la población o que estudie un 60%. El tópico de que los estudiantes están cada vez peor formados se oye desde la época de los griegos.

“

El problema de fondo es la relación entre la administración y el trabajador, no el que alguien sea funcionario o contratado

”

Como anécdota personal, a los 7 días de estar en la Facultad el catedrático de química nos dijo: “no sabéis nada, no como yo que hice tres reválidas, cuatro pruebas, etcétera”. Yo pensé “qué tipo más desagradable, seguro que yo no haré esto nunca”. Pues mira por dónde, un día, tendría yo 29 ó 30 años, estaba yo dando clase de Química en 1.º de Biológicas y me encontré a mí mismo diciendo “no sabéis nada, no como nosotros,”. Sin embargo, algo debe pasar con las nuevas generaciones cuando la sociedad avanza y avanza.

— Pero la realidad es que en la ESO y en el Bachillerato la docencia en Ciencias se ha reducido considerablemente.

No lo sé. Tendría que mirarlo. Pero lo que pasa es que en ESO y en Bachillerato cada vez son más las cosas que enseñar y los horarios no se pueden ampliar. De todas formas esta percepción sobre la educación es general. Cada vez que hay un problema en la sociedad española aparece la palabra educación. Que los niños son muy gordos, esto se arregla con educación, que se conduce mal, esto se arregla con educación y así sucesivamente. Esto se traduce en una fuerte presión sobre el sistema educativo. A la educación se le carga con todo y al final tenemos un problema.

— ¿Cómo solucionamos el problema?

Otra vez los sistemas de formación inicial de profesorado son la base del problema. Habría que formar a nuestros profesores de una manera análoga al MIR. No todos los licenciados pueden enseñar, especialmente a los adolescentes. Por eso, un periodo de formación de dos años tipo MIR es necesario. Además, hay que pagar mejor a los profesores. No tanto al comienzo de la carrera profesional, cuanto al final. Cuando fijas el sueldo de alguien estableces en realidad las prioridades del Estado. El trabajo de los profesores hay que reconocerlo social y económicamente.

“

No se invierte más en investigación en España porque estamos ciegos y, queriendo arreglar el presente, nos olvidamos del futuro

”

“

En I+D es fundamental un pacto de estado

”

— Pasamos si te parece a la Universidad. La Universidad española se está haciendo vieja manteniendo un sistema de funcionariado del siglo XIX en una Universidad del siglo XXI. Además, la rigidez del sistema universitario está provocando una centrifugación de talentos a los centros de investigación de excelencia semi-privados que han creado las comunidades autónomas (ICIQ, IMDEAs, BERCS, CICs, CIQUS, etc). También se han desarrollado organizaciones de captación de talento investigador como ICREA, IKEEBASQUE, etc, que pueden reforzar el perfil investigador de la Universidad.. ¿Qué opina el PSOE sobre estas nuevas formas de gestionar la investigación?.



Alfredo Pérez Rubalcaba en 2011.

El problema que tenemos es que la carrera universitaria empieza cuando inicias la tesis doctoral y esto no debería ser así. La carrera universitaria debería empezar al terminar la tesis doctoral. No digo que se alcance la estabilidad con 35 años pero tampoco puedes pretender estabilizarte cuando acabas la tesis doctoral. No es posible dar un puesto de trabajo estable a todo aquel que acaba una tesis doctoral. La Universidad se ha llenado y sencillamente no hay más plazas. ¿Qué ocurre entonces? Si le ofreces a alguien una carrera que consiste en hacer una tesis doctoral y tener que estar esperando a los 35 para estabilizarse se va a la empresa.

Respecto al funcionariado, siempre se culpa a los funcionarios de todos los males. El problema de fondo es la relación entre la administración y el trabajador, no el que alguien sea funcionario o contratado. Yo era un partidario decidido del contrato laboral pero no hay tantas diferencias entre esto y el funcionariado. Si lo analizas a fondo y miras las plantillas de los ministerios ves que de allí no se mueve nadie, ni contratados ni funcionarios. Cuando entras a formar parte de la administración, esto te da estabilidad. Es verdad que la estabilidad funcionarial está legalmente establecida, pero la laboral lo está *de facto*. El problema no es el tipo de relación laboral que se establece sino la naturaleza del empleador. Más bien lo que habría que hacer es un sistema de incentivos. Lo intentamos con los sexenios y aquello funcionó a medias. Somos conscientes de que tenemos un problema y de que éste es serio. El PSOE lo abordará.

— *Nos queda el tema de la investigación. Recientemente Science ha publicado un estudio científico sobre el efecto inmediato que tiene la inversión en ciencia en la economía. ¿Entonces por qué no se invierte más en investigación en España?*

Porque estamos ciegos. Queriendo arreglar el presente nos olvidamos del futuro. ¿Qué ha pasado en la Ciencia? Pues que antes un descubrimiento tardaba 10 años en llegar a la industria y ahora no tarda más de 6 meses. Antes la investigación era inversión en desarrollo a largo plazo, ahora no, ahora es a corto y medio. Por lo tanto lo que está haciendo el Gobierno del PP es disparatado. El otro día sin ir más lejos al portavoz del PNV, que es un catedrático, se le escapó una frase “yo no quiero que España sea un país de camareros”. Rajoy se aprovechó inmediatamente y contestó: “eso es clasista”. Vale es una expresión muy desafortunada, pero todos sabemos lo que quiso decir: si te olvidas de la investigación, si te olvidas de la educación, estas yendo a un modelo social que a medio e incluso a corto plazo vas a pagar. Estás yendo a un modelo en el que solo podrás competir bajando salarios y recortando servicios sociales. Ese es el fondo del problema.

— *¿Y por qué no se puede cambiar esto a corto plazo?*

Las políticas de investigación y desarrollo son políticas que exigen estabilidad. La investigación es como subir en bicicleta al Alpe d'Huez. Si dejas de pedalear te vas para abajo. Hay que estar pedaleando constantemente. Construir un sistema de investigación cuesta 20 años y si lo abandonas en tres años te lo has cargado. Dejas a la gente joven fuera y se acabó.

— *El problema es que la situación actual de la investigación es demoleadora.*

Sí. Rajoy dijo en el debate sobre el estado de la Nación que iba a meter mil personas en I+D, mil titulados de FP. Y yo le dije: oiga, ¿quién le ha contado a usted esa milonga? ¿Quién le ha dicho a usted que nuestro mayor problema es colocar a técnicos de FP? Nuestro problema es que los investigadores entre 25 y 35 años no tienen estabilidad, muchos se están yendo y otros se están desanimando. Que los laboratorios están sin recursos. Que nuestros científicos tienen que estar todo el día pensando en cómo mantener sus equipos. El sistema de I+D tiene que ir creciendo a una velocidad que se debería establecer digamos cada 10 años. Veis, en I+D es fundamental un pacto de estado. Como hablábamos antes, el pacto de estado en educación no es fácil, los modelos educativos tienen un fundamento ideológico muy profundo Pero en I+D es que esta “chupao”. Un pacto de I+D para 10 años, se lo propuse a Rajoy en la primera reunión que tuvimos en esta legislatura, le pareció interesante, luego pusieron a Carmen Vela y hasta ahora.

Lo que es indudable es que la I+D es importante. Po-



Que la primera institución de investigación del país haya estado a punto de colapsar por 100 millones de € es como una broma. Es un chiste



demos admitir que cada gobierno puede hacer las cosas de distinta manera, pero lo que es indudable es que o crecemos en recursos humanos y materiales o esto se acaba. Entonces, sí que es un pacto sencillo, cada año durante los próximos 10 años los dos grandes partidos vamos a hacer los presupuestos del estado de tal manera que el gobierno de turno va a disponer de unas décimas más del PIB para I+D cada año. El acuerdo está hecho. Luego dejamos al gobierno que decida si se lo dedica a investigación fundamental, aplicada o a las dos. Pero el sistema ya tiene una inercia y un soporte sobre el que crecer.

Además no pueden bajar las plantillas, hay que mantener becas doctorales y postdoctorales creciendo un 5%, etc. El pacto es simple y además no es caro. El sistema de pensiones es caro. Estoy de acuerdo en que crezca pero es caro, pero la inversión en ciencia NO. Y esto es la columna vertebral del futuro. Una de mis mayores frustraciones, ahora que ya me voy, es no haber conseguido que este tema se tratara en los medios de comunicación como merece. He hecho varias preguntas al Presidente sobre investigación en esta legislatura no las encontrareis en los periódicos.

— *El CSIC, la mayor institución pública de investigación del país y la tercera de Europa acaba de pasar por una etapa crítica. La pregunta es directa: ¿Tiene futuro el CSIC? ¿Tenéis algún plan sobre el CSIC?*

Sí, por supuesto. Tengo una historia sobre el CSIC que algún día escribiré. Siempre he creído en el CSIC. Yo hice



Con Pilar Goya en 2011.

“
*Que los científicos
vayan y vengan
está muy bien,
el problema
es que ahora
se van y no vuelven*
”

mi *postdoc* en un centro mixto CNRS-Universidad de Montpellier, y en Alemania conocí bien la Sociedad Max Planck. La idea del CSIC funciona magníficamente en estos países. ¿Que si el CSIC tiene futuro? Claro que lo tiene. Tiene muchas ventajas. Una muy importante es que el Estado sólo tiene en este momento un aparato ejecutor de ciencia que es el CSIC. El CSIC debería ser un instrumento para atraer excelencia y hacerlo con la Universidad.

Además: que la primera institución de investigación del país haya estado a punto de colapsar por 100 millones de € es una broma, es un chiste. Dicen además que los 100 millones son herencia socialista. Si da igual, si lo hicimos mal y si diciendo que el PSOE tiene la culpa de la situación, el PP le da al CSIC los 100 millones pues mañana mismo. Ya está bien de echar las culpas a la herencia recibida. Lo que hay que hacer es resolver los problemas. No voy a hacer comparaciones demagógicas con los bancos, pero comparad los 100 millones con el dinero que ha recibido la banca. No puede ser. Esto es una falta de sentido absoluto de lo que es la prioridad política.

— *Esta es una sensación que tenemos los que trabajamos en la Universidad. Nos parece que la idea de los políticos sobre promover la excelencia es fichar estrellas. ¿Qué pasa con nuestros jóvenes? Haciendo un símil con el fútbol, tu que eres del Real Madrid, es como fichar figuras en el extranjero y abandonar la cantera. Nuestros jóvenes, los mejores, con una categoría internacional están investigando en el extranjero. ¿Qué hará el PSOE con esto? ¿Habrá alguna forma de recuperar a esta gente?*

Hay un argumento que usan mucho los científicos y es “Usted ha gastado mucho en mí, deme una plaza”. Yo cuando lo oigo no me parece adecuado, aunque tiene un fondo de verdad. El argumento no es que se ha gastado mucho en mí. Es que, desde un punto de vista del interés nacional, los jóvenes están en su mejor momento productivo y están produciendo fuera. Es como el fútbol, puedes vender a un chaval de 17 años porque no sabes lo que va a ser, lo puedes vender a los 32 en la fase final de su carrera, pero si es un genio y tiene 25 años, ¡no lo vendas! Ese es el problema que tenemos con los jóvenes, están en el mejor momento, en el más productivo y están produciendo fuera de España. Que los científicos vayan y vengan está muy bien, el problema es que estos se van y no vuelven. Los alemanes que no son tontos lo saben perfectamente y se están llevando científicos, médicos, ingenieros. Entonces, habrá que buscar formas para que vuelvan.



En su despacho de la Sede Central del PSOE en Madrid el día de esta entrevista.

Con esto termina la entrevista. Agradecemos a Alfredo su tiempo y su excelente disposición y concluye diciendo que es un placer.

MARÍA C. DE LA TORRE
MIGUEL A. SIERRA

Galicia, agosto de 1983

Esta foto de 1983 corresponde a una reunión organizada por el CSIC en Galicia con el propósito de discutir el futuro de la ciencia en España. Me trae el recuerdo de un par de cosas, una alegre y una triste. La primera, una España unida en busca de un futuro mejor para nuestra ciencia, sin fronteras ni entre autonomías ni entre ideologías. La segunda, la desaparición de uno de los seres humanos más extraordinarios que he conocido, nuestro compañero Alfredo Pérez Rubalcaba. Su luminosa inteligencia, su ironía (en su sonrisa y en su mirada), su absoluta honradez, han cambiado la historia de España y nos han hecho a todos mejores.

¿Qué eran en 1983?

1. Carlos Dávila Pérez de Camino. Periodista político *Diario 16*.
3. Antonio Cendrero Uceda, Catedrático de Geología, Vicerrector de la UIMP.
9. Ramón Cercós Bolaños, director del Instituto de Opinión Pública (precursor del CIS).
10. Francisco Javier Sanz Fernández. Ingeniero agrónomo. Catedrático de Universidad, diputado por Valencia del PSOE.
11. M.^a Dolors Encabo (esposa de Carles Gasòliba).
12. José Elguero Bertolini. Químico. Investigador Científico. Presidente del CSIC.
13. Alfredo Pérez Rubalcaba. Químico. Director del Gabinete Técnico de la Secretaría de Estado de Universidades e Investigación.

14. Carles Gasòliba i Böhm. Economista. Diputado de CiU.
15. Adolfo Martínez Gimeno, Director General del INIA.
16. Manuel Dabrio Bañuls. Químico. Vicepresidente de Infraestructura y Centros del CSIC.
17. Uxío Santiago Labarta Fernández. Biólogo. Director del Gabinete de Estudios de la Presidencia del CSIC.
18. Javier López Facal. Filólogo. Vicepresidente de Relaciones Internacionales del CSIC.
19. Carmina Virgili Rodón. Geóloga. Secretaria de Estado de Universidades e Investigación.
20. Domingo González Álvarez. Físico. Catedrático de Universidad, Universidad de Zaragoza. Fundador del CONAI.
21. Miguel Ángel Almodóvar Martín. Gabinete de Comunicación de la Secretaría de Estado de Universidades e Investigación.
22. Juan Rojo Alaminos. Físico.
24. Gabriel Ferraté Pascual. Ingeniero Industrial. Rector de la Universidad Politécnica de Cataluña.
25. Jesús Sebastián Audina. Biólogo. Vicepresidente de Política Científica del CSIC.
26. Miguel Ángel Quintanilla Fisac. Profesor de Lógica y Filosofía de la Ciencia, Universidad de Salamanca. Senador del grupo socialista.

JOSÉ ELGUERO
Instituto de Química Médica
CSIC



1. Carlos Dávila; 3. Antonio Cendrero; 4. Brown Bronwen (esposa de Antonio Cendrero); 7. Ana María Tizón (esposa de Miguel Ángel Quintanilla); 8. Angelines (esposa de Carlos Dávila); 9. Ramón Cercós; 10. Javier Sanz; 11. M.^a Dolors Encabo (esposa de Carles Gasòliba); 12. José Elguero; 13. Alfredo Pérez Rubalcaba; 14. Carles Gasòliba; 15. Adolfo Martínez Gimeno; 16. Manuel Dabrio; 17. Uxío Labarta; 18. Javier López Facal; 19. Carmina Virgili; 20. Domingo González; 21. Miguel Ángel Almodóvar; 22. Juan Rojo; 23. Soledad Sánchez (esposa de Jesús Sebastián); 24. Gabriel Ferraté; 25. Jesús Sebastián; 26. Miguel Ángel Quintanilla

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

Rolf Huisgen y el premio Nobel de Química 2019

José Elguero

Suena que el premio Nobel de Química de este año será para Karl Barry Sharpless^[1,2] por la reacción “click” o para Emmanuelle Charpentier y Jennifer Doudna por las metodologías basadas en los CRISPR. Cuando escribo esto (y espero que cuando se publique, si es aceptado) aún no se sabe quiénes serán los galardonados (se anunciará a las 11.45 del día 9 de octubre de 2019).

A mí me parece inaceptable que se premie a quien lo mejora y no a quien lo descubre; lo normal sería que se premiase a los dos. Es como si dieran el premio Nobel de Fisiología o Medicina a Waksman por la estreptomycin (que se lo dieron en 1952) y no a Fleming por la penicilina (quien lo obtuvo en 1945).

Creemos que no es chovinismo pedir que Francisco Juan Martínez Mojica reciba un tercio del premio Nobel de Química si en Estocolmo deciden premiar a las técnicas CRISPR.

De la misma manera, si se decide premiar la química “click”, Rolf Huisgen debe acompañar a Barry Sharpless. Es verdad que Huisgen tiene 99 años y que su salud está muy deteriorada, pero mientras siga en vida lo puede recibir.

Miembro correspondiente extranjero de la Real Academia de Ciencias, en su laboratorio de Múnich efectuaron estancias posdoctorales algunos de nuestros más eminentes colegas: Joaquín Plumet (Complutense), Pere de March (UAB), Francisco Palacios (UPV, Vitoria), Joaquín Morán

(Salamanca). Yo tengo un recuerdo muy vivo de cuando Rosa y yo comimos con él en Mons (Belgica), a finales de septiembre de 1974 con ocasión del “Xth European Colloquium on Heterocyclic Chemistry”.

Nosotros le hemos dedicado varios trabajos^[3,4,5] y recientemente hemos explorado teóricamente una reacción de Castells que Huisgen y Morán trataron en vano de reproducir.^[6]

Las reacciones 1,3-dipolares no solo son un método sintético esencial en química heterocíclica y, por lo tanto, en química médica,^[7] sino que han ejercido una influencia decisiva en las reglas de Woodward-Hoffmann.^[8,9,10] Comenta este último el efecto que tuvo sobre Woodward una conferencia de Huisgen de 1961.^[11,12] Sus trabajos sobre el uso de isótopos estables para determinar el mecanismo de las reacciones han tenido también una gran influencia.

Muchas veces y desde hace mucho se ha sugerido que merece el premio Nobel.^[13,14] Huisgen ha publicado 565 trabajos y tiene un $h = 82$; Sharpless ha publicado 492 trabajos y tiene un $h = 119$. Huisgen hace mucho que ya no publica mientras que Sharpless está en un momento álgido de su vida profesional. Sin embargo, hoy es más fácil publicar y ser citado que en la mejor época de Huisgen (su pico de citas se sitúa alrededor de 1970; el de Sharpless, entre 2011 y 2015). En sus trabajos más citados de 2002, Sharpless cita a Huisgen en los respectivos títulos: *A stepwise Huisgen cycloaddition process: Copper(I)-catalyzed regioselective “ligation” of azides and terminal alkynes* (7.820 citas),^[15] *A click chemistry approach to tetrazoles by Huisgen 1,3-dipolar cycloaddition: Synthesis of 5-sulfonyl tetrazoles from azides and sulfonyl cyanides* (356 citas)^[16] y *A click chemistry approach to tetrazoles by Huisgen 1,3-dipolar cycloaddition: Synthesis of 5-acyltetrazoles from azides and acyl cyanides* (242 citas).^[17]

Entonces, ¿por qué ya no es premio Nobel? Hay tres biografías importantes sobre Rolf Huisgen, las tres publicadas en *Helvetica Chimica Acta*: la de Seeman de 2005,^[18] la



J. Elguero

Profesor de Investigación
“Ad Honorem”
Instituto de Química Médica, CSIC
C-e: iqmb17@iqm.csic.es

Recibido: 23/05/2019. Aceptado: 17/06/2019.

de Rüdhardt, Sauer y Sustman, también de 2005,^[19] y finalmente la de Houk de 2010.^[20] Los datos más interesantes figuran en la de Seeman.^[18] Hay que recordar que cuando Hitler llega al poder Huisgen tiene 12 años y cuando Hitler fallece, 24 años. En su autobiografía,^[21] Huisgen escribe que contradecía a su padre cuando este decía que Joseph Goebbels era el diablo encarnado; que nunca militó en el NSDAP pero que siente tener que confesar que nunca participó en la resistencia activa al nazismo y que hoy (el libro es de 1994) se da cuenta de que la “estrategia evasiva” es una de las principales razones por las que más de la mitad de la humanidad lleva el yugo de los regímenes opresivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sharpless ya recibió un tercio de premio Nobel de Química en 2001 por la reacción de oxidación con catalizadores enantioselectivos).
- [2] Algunas voces añaden el nombre de Carolyn R. Bertozzi.
- [3] (80 cumpleaños): J.-L. M. Abboud, C. Foces-Foces, R. Notario, R. E. Trifonov, A. P. Volovodenko, V. A. Ostrovskii, I. Alkorta, J. Elguero, Basicity of N-H and N-methyl-1,2,3-triazoles in the gas phase, in solution, and in the solid state – An experimental and theoretical study, *Eur. J. Org. Chem.* **2001**, 3013-3024.
- [4] (85 cumpleaños): T. Mas, C. Pardo, J. Elguero, Use of Tröger’s base as a scaffold for new chiral molecular tweezers: Synthesis of trimeric, fused Tröger’s bases, *Helv. Chim. Acta* **2005**, *88*, 1199–1207.
- [5] (85 cumpleaños): R. M. Claramunt, C. López, S. Lott, M. D. Santa María, I. Alkorta, J. Elguero, Solid-state NMR study of the tautomerism of acetylacetone included in a host matrix, *Helv. Chim. Acta* **2005**, *88*, 1931-1942.
- [6] J. Elguero, I. Alkorta, The extraordinary richness of the reaction between diazomethane and tetracyanoethylene: can computational calculations shed light on old papers? *New J. Chem.* **2019**, in press.
- [7] R. Sustmann, Rolf Huisgen’s contribution to organic chemistry, emphasizing 1,3-dipolar cycloadditions, *Heterocycles* **1995**, *40*, 1-18.
- [8] R. B. Woodward, R. Hoffmann *J. Am. Chem. Soc.* **1965**, *87*, 395–397; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1969**, *8*, 781-932;
- [9] R. Huisgen, 1,5-Electrocyclizations – An important principle of heterocyclic chemistry, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1980**, *19*, 947-973.
- [10] J. Elguero, Synthèse et réactivité d’hétérocycles pentagonaux: réactions électrocycliques et transpositions sigmatropiques, *Bull. Soc. Chim. Fr.* **1971**, 1925–1932. En los agradecimientos se dice que se han tenido cuenta los comentarios de J. Castells, R. Huisgen, R. Jacquier, A. R. Katritzky y Nguyen Trong Anh.
- [11] R. Hoffmann, A claim on the development of the frontier orbital explanation of electrocyclic reactions, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 6588-6590.
- [12] J. I. Seeman, Woodward–Hoffmann’s stereochemistry of electrocyclic reactions: from day 1 to the JACS receipt date (May 5, 1964 to November 30, 1964), *J. Org. Chem.* **2015**, *80*, 11632-11671.
- [13] P. S. Marchand, Overlooked by the Nobel, *C&EN* **2016**, *94*, 4-5.
- [14] F. R. Novara, J. Bäckvall, K. Houk, The importance of Nobel prizes for today’s research, *ChemViews*, 08 marzo 2018, from *Chem. Eur. J.*
- [15] V. V. Rostovtsev, L. G. Green, V. V. Fokin, K. B. Sharpless, Copper(I)-catalyzed regioselective “ligation” of azides and terminal alkynes, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, *41*, 2596-2599.
- [16] Z. P. Demko, K. B. Sharpless, A click chemistry approach to tetrazoles by Huisgen 1,3-dipolar cycloaddition: Synthesis of 5-sulfonyl tetrazoles from azides and sulfonyl cyanides, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, *41*, 2110-2113.
- [17] Z. P. Demko, K. B. Sharpless, A click chemistry approach to tetrazoles by Huisgen 1,3-dipolar cycloaddition: Synthesis of 5-acyltetrazoles from azides and acyl cyanides, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, *41*, 2113-2116.
- [18] J. I. Seeman, *Rolf Huisgen: A gentleman scholar with energy and passion*, *Helv. Chim. Acta* **2005**, *88*, 1145-1153.
- [19] C. Rüdhardt, J. Sauer, R. Sustman, *Rolf Huisgen: Some highlights of his contributions to organic chemistry*, *Helv. Chim. Acta* **2005**, *88*, 1154-1184.
- [20] K. N. Houk, *Rolf Huisgen’s profound adventures in chemistry*, *Helv. Chim. Acta* **2010**, *93*, 1241-1260.
- [21] R. Huisgen, The adventure playground of mechanisms and novel reactions (profiles, pathways & dreams), J. L. Seeman, Ed. 1994.

Cristales porosos impregnados con líquidos iónicos para captura y separación de dióxido de carbono

José Manuel Vicent-Luna y Sofía Calero

Resumen: La captura y separación de dióxido de carbono es un problema candente debido a las implicaciones energéticas y medio ambientales que conllevan las emisiones de este gas. La búsqueda de materiales que mejoren los procesos industriales convencionales supone todo un reto que se complica aún más con un abanico de prometedoras posibilidades emergentes. En este artículo, analizaremos una de las opciones que se han propuesto recientemente para procesos de captura y separación de dióxido de carbono. Esta consiste en el uso de estructuras porosas cristalinas impregnadas de líquidos iónicos. El uso de métodos de simulación molecular pioneros nos permitirá identificar el efecto que ejerce en el proceso de captura y separación la naturaleza del disolvente, la composición de líquido iónico y la distribución de este en los poros del cristal.

Palabras clave: MOFs, simulación molecular, gases de efecto invernadero, tamiz molecular.

Abstract: Carbon dioxide capture and separation is a burning problem for the energetic implications that the emissions of this gas entail. The search of proper materials that improve conventional industrial processes is a challenge that gets even more complicated with a range of promising emerging possibilities. In this work, we analyze one of the options that have recently been proposed for carbon dioxide uptake and separation processes. This consists of the use of crystalline porous materials impregnated with ionic liquids. The use of state of the art molecular simulation methods allows us to identify the effect exerted in these processes by the nature of the solvent, the composition of the ionic liquid, and its distribution inside the pores of the crystal.

Keywords: MOFS, molecular simulation, greenhouse gases, molecular sieve.

INTRODUCCIÓN

El aumento de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera se ha convertido en una preocupación a nivel mundial. Esta preocupación se debe entre otros factores a la ya indiscutible efecto de las emisiones de gases de efecto invernadero en la aceleración del calentamiento de la Tierra.^[1-2] La captura eficiente de dióxido de carbono es por tanto uno de los grandes retos de la sociedad actual. Por otra parte, no podemos perder de vista el interés energético que tiene la separación de este gas de otros gases como el metano o el nitrógeno.

Tres de las mezclas más relevantes desde el punto de vista energético que contienen en mayor o menor medida dióxido de carbono son el biogás, el gas natural y el gas de combustión. El biogás está compuesto principalmente por

metano, seguido de dióxido de carbono y en menor medida por otros gases como el nitrógeno y el sulfhídrico. Se origina a partir de reacciones de biodegradación de compuestos orgánicos. El gas natural también contiene mayoritariamente metano, y en proporción variable nitrógeno y dióxido de carbono además de hidrocarburos como el etano, butano, propano y trazas de otros más pesados. Por último, el gas de combustión que se libera a la atmósfera a partir de procesos de combustión, esta formado mayoritariamente por nitrógeno. Contiene también dióxido de carbono y un pequeño porcentaje de otros gases contaminantes. En este trabajo nos referimos al gas de combustión producido en las plantas de energía, cuyo procesamiento puede realizarse a escala industrial. En primera aproximación, y para hacer un estudio de materiales óptimos que permitan la separación de estas mezclas de gases, se suele simplificar recurriendo a mezclas binarias CO_2/CH_4 y CO_2/N_2 . Uno de los principales métodos para la captura y separación del dióxido de carbono es el uso de un disolvente líquido, capaz de capturar pequeñas fracciones de este gas de una mezcla que contenga principalmente nitrógeno o metano. Recientemente se han propuesto disolventes que maximicen la captura de este gas, es decir, aquellos en los que la solubilidad del dióxido de carbono sea elevada. En este contexto es donde introducimos los líquidos iónicos a temperatura ambiente, como nueva generación de disolventes con excelentes propiedades.

Los líquidos iónicos a temperatura ambiente, RTILs (del inglés room temperature ionic liquids) o simplemente ILs, son sales compuestas por un catión orgánico y un



J. M. Vicent-Luna



S. Calero

Dpto de Sistema Físicos, Químicos y Naturales
Universidad Pablo de Olavide
Ctra. Utrera km 1, 41013, Sevilla
C-e: jmviclun@upo.es scalero@upo.es

Recibido: 11/02/2019. Aceptado: 11/04/2019.

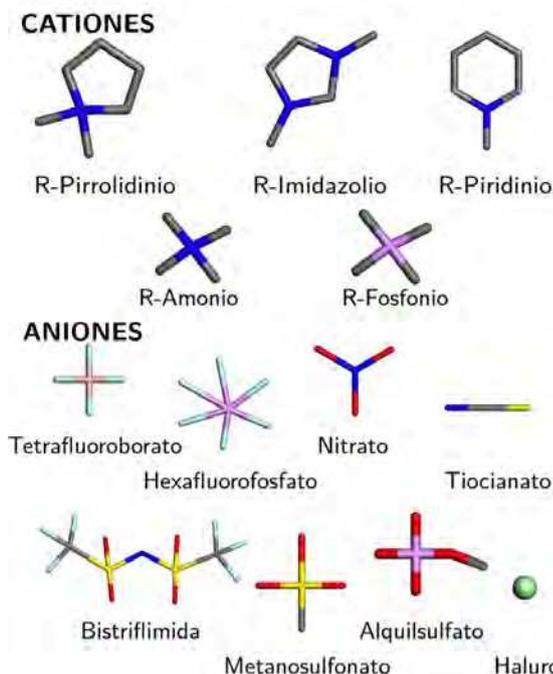


Figura 1. Algunos de los cationes y aniones más comunes que componen un líquido iónico. Los átomos de hidrógeno de los cationes se han omitido para simplificar la figura

anión inorgánico u orgánico, que se presentan en estado líquido en un amplio intervalo de temperaturas, generalmente por debajo del punto de ebullición del agua. La combinación de un gran número de cationes y aniones (véase Figura 1), origina una enorme variedad de compuestos que presentan diferentes propiedades físico-químicas. Entre ellas podemos destacar de forma general la estabilidad química, electroquímica y térmica, además de la baja presión de vapor, lo que hace que tengan una volatilidad prácticamente nula. Por otra parte, los ILs tienen en general alta capacidad calorífica, viscosidad y conductividad iónica. Son también compuestos poco inflamables y de baja toxicidad.^[3] Todo esto les hace relativamente compatibles con el medioambiente y facilita su aplicabilidad.^[4,5] Se usan comúnmente como catalizadores,^[6] disolventes,^[7] membranas,^[8] lubricantes,^[9] fluidos para la transferencia de calor,^[10] electrolitos en capacitores^[11-14] y células solares^[15-16] o como componentes de cristales líquidos para la fabricación de pantallas LCD.^[17] Por otra parte, se pueden obtener compuestos sólidos con propiedades muy deseables combinando los ILs con otros materiales como por ejemplo polímeros o gelatinas.^[18] Además de todas las aplicaciones mencionadas, los ILs también se están utilizando en captura y separación de gases^[19] y en la extracción de componentes de mezclas en estado líquido, como es el caso de la separación de alcoholes y agua.^[20]

Una de las aplicaciones más interesantes de los ILs es su papel en procesos absorción y separación de gases, especialmente de aquellas mezclas que contienen dióxido de carbono, ya que este gas es muy soluble en ILs.^[21] La alta solubilidad se debe a que la molécula interacciona fuertemente con el anión que constituye el IL, aunque se desco-

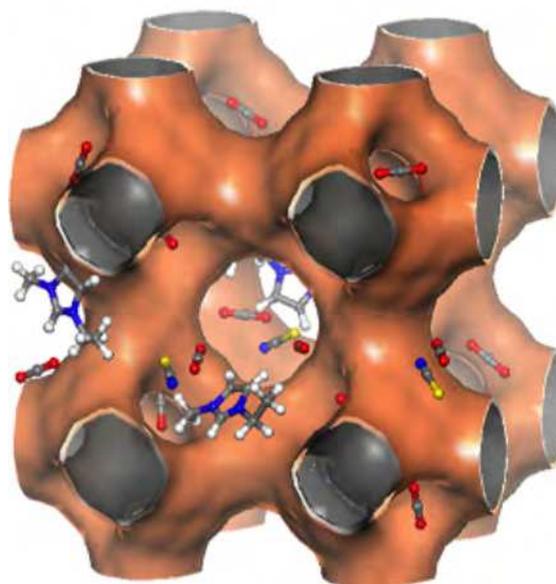


Figura 2. Visualización de la superficie del MOF Cu-BTC impregnado con líquido iónico para la adsorción de dióxido de carbono

necen aún algunos de los mecanismos moleculares implicados en esta interacción. De hecho, se han llevado a cabo diversos estudios sobre la naturaleza del catión y del anión con el objetivo de identificar los mecanismos moleculares que gobiernan los procesos de absorción de dióxido de carbono en ILs e identificar así el líquido más eficiente para capturar y/o separar el gas.^[22] Sin embargo, esta tarea es compleja y además costosa dada la gran cantidad de ILs que se pueden sintetizar.

Aunque los ILs ofrecen grandes ventajas, también hay que hacer referencia a los inconvenientes relacionados con su uso. Por una parte, estos compuestos tienen un elevado coste comparado con el de otros disolventes convencionales. Además, los ILs son sistemas muy densos y a su vez viscosos. Esto hace que su capacidad de captura de dióxido de carbono pueda ser menor que la que se obtiene con algunos sólidos porosos. Dentro de los posibles sólidos porosos con capacidad de captura de dióxido de carbono se encuentran los carbones activados, zeolitas, cristales metal-orgánicos (MOFs) y orgánico covalentes (COFs), etc. Todos ellos se caracterizan por tener poros nanométricos que ocupan gran parte de su volumen total. Esto hace que tengan área superficial alta y explica su utilidad como tanques moleculares y también como filtros moleculares. Recientemente, se ha propuesto impregnar de ILs este tipo de materiales porosos (véase Figura 2) con el objetivo de mejorar sus propiedades de captura y separación de gases.

Existen miles de estructuras porosas y ese número se incrementa casi a diario. Si eso se une a la gran cantidad de ILs disponibles, el número de compuestos híbridos que se podría generar resulta inabordable. Es aquí donde las técnicas de simulación molecular son impagables aliadas ya que permiten hacer una selección o barrido previo e identificar así los materiales idóneos para una aplicación deter-

minada. Utilizando técnicas de simulación molecular podemos obtener además una gran cantidad de información de los procesos reales, a un bajo coste y a relativamente gran escala. Los procesos de absorción y adsorción de gases en líquidos y sólidos porosos pueden ser identificados mediante cálculos derivados del método de Monte Carlo.^[23] En estas simulaciones se imponen, por ejemplo, el potencial químico y temperatura, y con estas condiciones termodinámicas se obtiene la cantidad de adsorbato que captura cada adsorbente. Estos cálculos también proporcionan las energías y entropías de los adsorbatos y cómo estas propiedades varían con la topología y la composición química de los adsorbentes. Por otra parte, aplicando métodos de dinámica molecular, podemos obtener la velocidad a la que se mueve el adsorbato dentro del poro del material y por tanto sus propiedades de transporte. Esta información es esencial para poder identificar los mecanismos moleculares que intervienen en la captura y separación del dióxido de carbono.

La estrategia de combinar materiales porosos con ILs para mejorar la captura de dióxido de carbono fue propuesta utilizando simulación molecular por Jiang *et al.*^[24] en 2011 y por nuestro grupo de investigación en 2013.^[25] En ambos estudios se concluye que los MOFs y/o COFs (del inglés metal-organic frameworks y covalent organic frameworks) que se impregnan con cierta cantidad de líquido iónico mejoran sus capacidades de adsorción, comparados con la estructura original. Este hallazgo fue corroborado posteriormente mediante estudios experimentales^[19, 26] que confirmaron la viabilidad de la combinación de ILs y materiales porosos. Desde entonces, han surgido numerosos estudios de estos materiales híbridos tanto en el ámbito teórico^[27-29] como en el experimental.^[30]

En este artículo discutiremos cómo la presencia de ILs en el interior de las cavidades de MOFs y COFs mejora la separación de dióxido de carbono de otros gases como nitrógeno o metano. Analizaremos el efecto de la concentración de IL, de la naturaleza del anión y de la organización del IL dentro de los poros. Los ILs que vamos a evaluar aquí se componen del catión [EMIM]⁺ (1-etil-3-metilimidazolio) y de los aniones [SCN]⁻ (tiocianato), [Tf₂N]⁻ (bistriflimida), [BF₄]⁻ (tetrafluoroborato), [PF₆]⁻ (hexafluorofosfato), y [NO₃]⁻ (nitrato). Nos centramos en estos por ser algunos de los aniones más comunes y porque junto con el catión han demostrado alta solubilidad del dióxido de carbono.^[22] Finalmente, compararemos el uso de ILs con el uso de un disolvente convencional como es el agua.

COMPUESTOS HÍBRIDOS IL/MOFs

La primera cuestión que se nos plantea es el efecto ejercido por el líquido iónico que hay dentro de los poros de un MOF, en la adsorción de dióxido de carbono, metano y nitrógeno. La Figura 3 muestra la isoterma de adsorción de estos gases en el MOF Cu-BTC vacío y con 8 moléculas de IL en el interior de sus poros (es decir, 8 cationes y 8 aniones). Esta cantidad de líquido iónico ocupa aproximadamente entre un 15 y un 20% del volumen accesible de

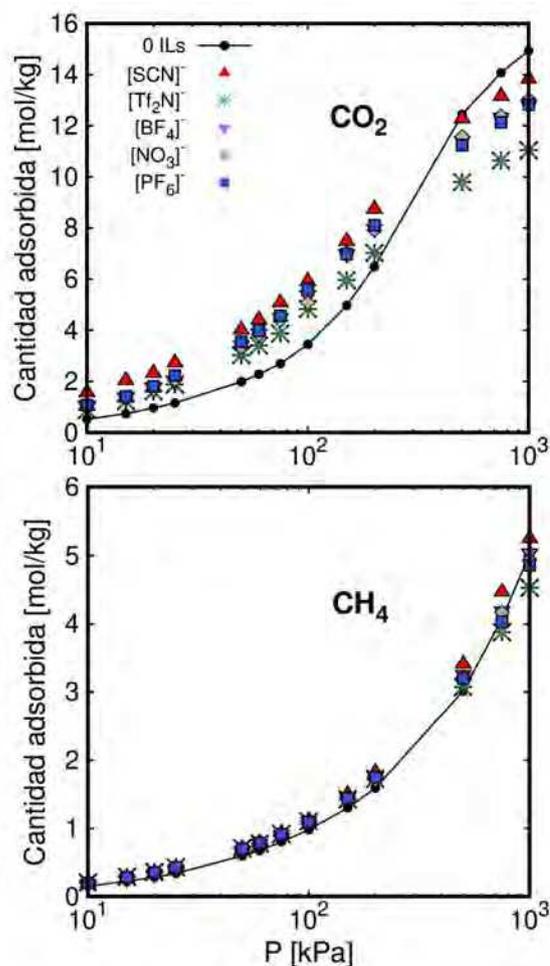


Figura 3. Isotherma de adsorción de dióxido de carbono (arriba) y de metano (abajo) en Cu-BTC cargado con 8 moléculas de IL formados por el catión [EMIM]⁺ y por los aniones [SCN]⁻, [Tf₂N]⁻, [BF₄]⁻, [NO₃]⁻ y [PF₆]⁻

la estructura. En la figura se observa, que, cuando el IL está presente en la estructura, la adsorción de dióxido de carbono aumenta por debajo de una presión de 200 kPa. Al aumentar la presión, el disolvente hace que disminuya la adsorción del gas por efecto de volumen excluido. Por otra parte, el comportamiento de la isoterma de adsorción de dióxido de carbono es diferente dependiendo del anión utilizado. Observamos que el mayor aumento de adsorción a bajas presiones se produce cuando se utiliza el IL que contiene el anión [SCN]⁻. El menor incremento de adsorción se produce cuando se utiliza el anión [Tf₂N]⁻. Esto está directamente relacionado con el tamaño de los aniones, ya que [SCN]⁻ y [Tf₂N]⁻ son los aniones de menor y mayor tamaño, respectivamente.

En el caso de la adsorción de metano, el comportamiento de la isoterma no varía con el tipo de anión utilizado y es el mismo que en la estructura vacía en el intervalo de presiones estudiadas (10-1000 kPa). Este hecho evidencia la existencia de una interacción entre el dióxido de carbono y el IL que no existe con el metano y tampoco con el nitrógeno. Dado que el comportamiento del metano y del

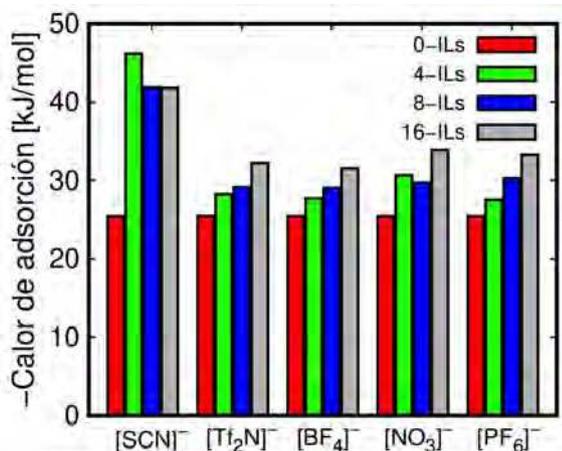


Figura 4. Calor de adsorción de dióxido de carbono en dilución infinita en el MOF Cu-BTC para varias concentraciones de ILs compuestos del catión [EMIM]⁺ y los aniones [SCN]⁻, [Tf₂N]⁻, [BF₄]⁻, [NO₃]⁻ y [PF₆]⁻.

nitrógeno en presencia del IL es muy similar, pero a diferente escala,^[25] nos limitaremos a establecer comparativas entre el dióxido de carbono y el metano, entendiendo que las conclusiones obtenidas para el metano son extrapolables al nitrógeno.

La presencia del IL afecta a la adsorción de dióxido de carbono debido a una fuerte interacción disolvente-gas, donde la interacción con el anión es más fuerte.^[22] La Figura 4 muestra el valor absoluto del calor de adsorción en dilución infinita del dióxido de carbono en el MOF Cu-BTC. En esta figura se compara el efecto del anión utilizado, así como la concentración de IL añadida al MOF. Podemos observar que la interacción IL/Cu-BTC con el dióxido de carbono aumenta con la concentración de IL de manera similar en todos los casos excepto para el IL que contiene el anión [SCN]⁻. La solubilidad de dióxido de carbono en los ILs que incluyen este anión es muy alta.^[31] Por esta razón, el calor de adsorción aumenta mucho más cuando se utiliza este anión, incluso cuando la estructura se impregna con bajas concentraciones de IL. Por ello, en las siguientes secciones se mostrarán los resultados correspondientes al uso del líquido iónico que contiene el anión [SCN]⁻.

Distribución del IL en los canales del MOF

Si la presencia de IL favorece la adsorción de dióxido de carbono y no afecta a la adsorción de metano o nitrógeno, es de esperar que mejore la separación de gases en una mezcla binaria que contenga el primer gas. Sin embargo, antes de ver qué efecto tiene la presencia de IL en mezclas de gases, es necesario analizar otro factor esencial. Este factor es la topología del MOF, dado que va a condicionar la forma en que el IL se organiza dentro de sus poros. Para ilustrarlo, vamos a recurrir a dos MOFs en concreto: el IRMOF-1 y el MIL-47. Estos dos MOFs tienen en común que están compuestos por el mismo ligando orgánico (1,4-benzenodicarboxilato) y que los centros metálicos no están expuestos, es decir no entran en contacto directo ni con el

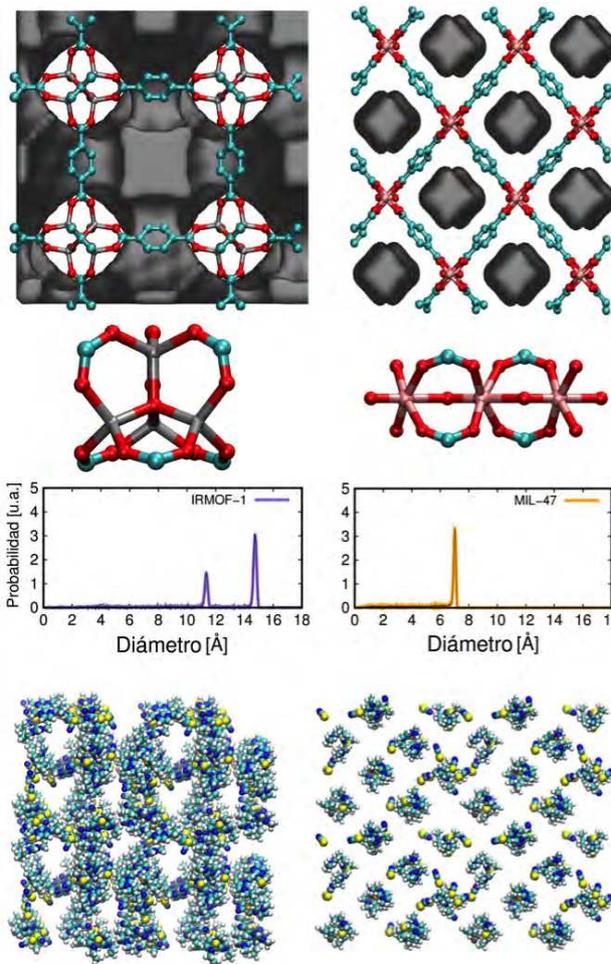


Figura 5. De arriba hacia abajo, representación esquemática de los MOFs, estructura del clúster metálico (átomos de carbono en azul, oxígeno en rojo, cinc en gris y vanadio en rosa), distribución de tamaños de poro y visualización de la distribución del líquido iónico [EMIM]⁺[SCN]⁻ en los poros de las estructuras IRMOF-1 (izquierda) y MIL-47 (derecha)

líquido iónico ni con el adsorbato. Por otra parte, difieren tanto en el metal (IRMOF-1 contiene Zn y MIL-47 contiene V) como en la topología. El IRMOF-1 tiene cavidades de unos 15 Å interconectadas por canales de unos 11 Å. Por el contrario, el MIL-47 presenta canales unidimensionales independientes, en forma de rombo y de unos 7 Å de diámetro (véase Figura 5). Estas diferencias estructurales determinan claramente la distribución del líquido iónico dentro de sus poros. Por una parte, las cavidades interconectadas y de gran tamaño del IRMOF-1 permiten al líquido iónico distribuirse uniformemente por los poros formando un único agregado, por lo que su comportamiento se asemeja al que tendría sin estar confinado. Por el contrario, el MIL-47 no permite esa distribución, si no que el IL se organiza en pequeños agregados independientes en cada uno de los canales del MOF.

Otro asunto relevante que se ha estudiado en estos materiales híbridos es la estabilidad del material impregnado de ILs. Recientemente Kinik *et al.*^[32] F. Pelin y Mohamedali *et al.*^[33] han investigado experimentalmente la estabilidad del híbrido IL/ZIF-8, concluyendo que la presencia del IL

no altera significativamente la estructura cristalina del material original.

En nuestro caso, hemos llevado a cabo un estudio similar para el sistema IL/MIL-47 mediante el uso de técnicas de simulación basadas en la mecánica cuántica.^[28] Realizando una optimización de la geometría de la estructura original y cargada de ILs, observamos que no existen cambios estructurales significativos y que no afectan a la isoterma de adsorción de dióxido de carbono.

Separación de gases con compuestos híbridos

Las isothermas resultantes de la mezcla de gases permiten cuantificar el proceso de separación de los mismos. En este estudio, hemos considerado las mezclas binarias que incluyen dióxido de carbono, metano y nitrógeno. La Figura 6 muestra el efecto de añadir varias cantidades de IL en la adsorción de mezclas binarias CO₂/CH₄ y CH₄/N₂ en IRMOF-1 y MIL-47. Como habíamos anticipado, el IL aumenta la adsorción de dióxido de carbono a presiones que están siempre por debajo de cierto valor. Este valor, depende de la presión a la que empiezan a adsorberse los gases en la estructura vacía, que a su vez está relacionada con el tamaño de poro del MOF. Como norma general, y en caso de estructuras que no muestren una interacción específica con el adsorbente, la presión a la que empieza a adsorber el gas en la estructura será menor cuanto menor sea el tamaño del poro. Hasta ese valor de presión, en las mezclas CO₂/CH₄ y CO₂/N₂ la adsorción de dióxido de carbono aumenta con la concentración de IL. Por consiguiente un incremento de la cantidad adsorbida del componente mayoritario produce una disminución de la adsorción del componente minoritario, favoreciendo así la separación de los dos gases.

En la Figura 6 se observa cómo la presencia de IL en estos dos MOFs provoca una exclusión de metano de la mezcla CO₂/CH₄. Esta exclusión se produce en todo el rango de presiones estudiado. La selectividad de adsorción se puede calcular a partir de la isoterma como el cociente las cantidades adsorbidas de cada componente dividido por el cociente entre las fracciones molares de la composición inicial de la mezcla. En este caso, al tratarse de mezclas binarias, la selectividad de adsorción se reduce al cociente entre la cantidad adsorbida de dióxido de carbono y la de metano. A pesar de que a altas presiones la adsorción de dióxido de carbono disminuye por efecto de volumen excluido del IL, la selectividad de adsorción aumenta en favor del dióxido de carbono en todo el intervalo de presiones estudiado.^[28] Esto se debe a la exclusión del componente minoritario de la mezcla.

Como ya se mencionó en la introducción, los ILs pueden tener aplicaciones interesantes cuando interaccionan fuertemente con gases. Este es el caso de gases como el dióxido de carbono, ácido sulfúrico, amoníaco, etc.^[22] Sin embargo, también pueden utilizarse para mejorar la separación de gases que no muestren mucha afinidad con el IL. Este es el ejemplo de la mezcla CH₄/N₂, (véase Figura 6). Un análisis similar al de la mezcla de dióxido de carbono con metano

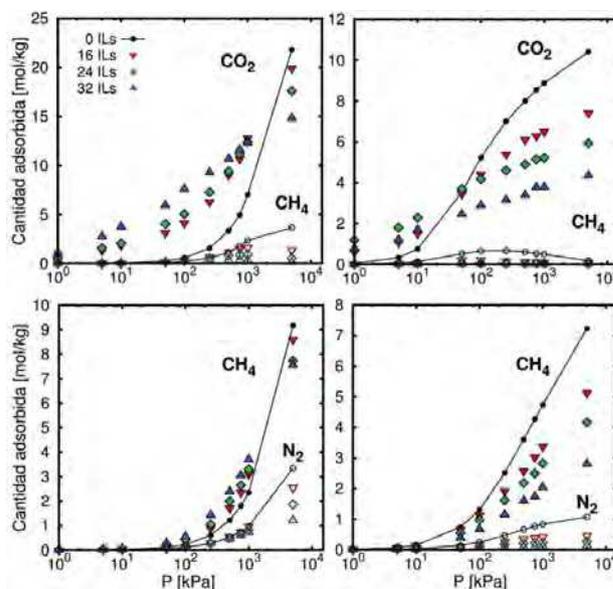


Figura 6. Isotherma de adsorción de mezcla CO₂/CH₄ (arriba) y CH₄/N₂ (abajo) en las estructuras IRMOF-1 (izquierda) y MIL-47 (derecha) cargadas de líquido iónico

comentado anteriormente puede aplicarse en el caso de metano y nitrógeno. No obstante, debido a la baja afinidad del IL por estos gases, la mejora de la separación será menor que en el caso de mezclas que incluyan dióxido de carbono. En un estudio que realizamos con los compuestos híbridos IL/IRMOF-1 y IL/MIL-47 y a presiones de 100 kPa,^[28] encontramos un aumento del valor la selectividad de la mezcla CO₂/CH₄ en un factor de 15, mientras que el de la mezcla CH₄/N₂ es de 2. Aunque esta selectividad parezca baja, es significativa ya que indica que, añadiendo IL a una estructura dada, podemos duplicar su capacidad de separación de metano. Visto desde ese ángulo, una selectividad de 2 supone una mejora considerable, y más aun teniendo en cuenta la dificultad para separar estos dos gases.

Aunque con los dos MOFs se mejora la selectividad de adsorción, el mecanismo es ligeramente distinto. Por ejemplo, si nos fijamos en la adsorción de las mezclas a 100 kPa, observamos dos comportamientos. En IRMOF-1 se mejora la separación porque el IL hace que aumente la cantidad de componente mayoritario adsorbido y disminuya la del minoritario. Sin embargo, en MIL-47 el IL provoca una disminución de la cantidad adsorbida de ambos adsorbatos, excluyendo casi totalmente el componente minoritario. Esto está relacionado con la distribución del IL en los poros de las estructuras, tal y como se ha discutido anteriormente. En el IRMOF-1, el IL se distribuye por los poros como si estuviese en estado líquido, permitiendo que el dióxido de carbono o el metano se disuelvan en él y favoreciendo así la separación. En el MIL-47 por el contrario, el IL forma pequeños agregados, que controlan el volumen accesible de cada una de las cavidades. Esto provoca una considerable disminución de la adsorción del componente minoritario de la mezcla y se traduce en una mejor separación de los gases.

Hemos visto cómo el material híbrido IL/MOF mejora la separación de gases comparado con el MOF original. El

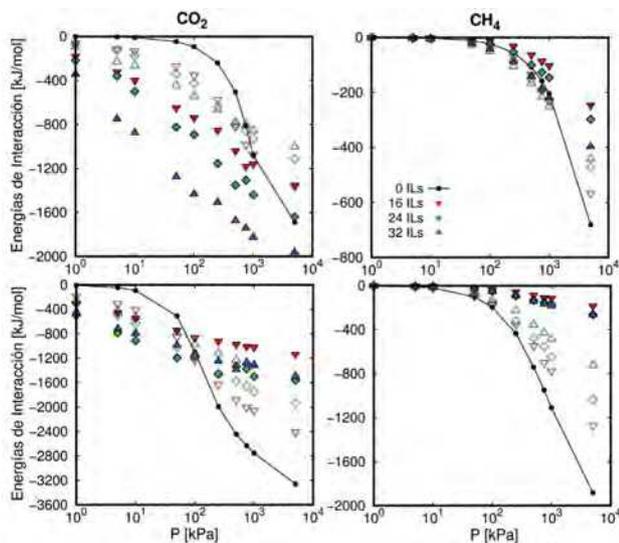


Figura 7. Energías de interacción entre adsorbente-adsorbato (símbolos abiertos) e IL-adsorbato (símbolos cerrados) en IRMOF-1 (arriba) y MIL-47 (abajo) impregnados con varias concentraciones de líquido iónico

siguiente paso es el de diferenciar la interacción del adsorbato con el adsorbente y con el disolvente con objeto de entender así el mecanismo molecular implicado en la separación. La Figura 7 muestra las energías de interacción correspondientes a las isothermas de dióxido de carbono y de metano en el IRMOF-1 y el MIL-47. En el caso del IRMOF-1, se observa que la interacción IL-CO₂ prevalece sobre la interacción MOF-CO₂ en todo el rango de presiones estudiado con una interacción menos energética que la observada para la estructura no impregnada de IL. Esto refuerza la idea de que el dióxido de carbono puede disolverse fácilmente en el seno del líquido iónico incluso dentro de un MOF de poros grandes y por ello se consigue una gran mejora en la captura y separación del gas. En el caso del MIL-47, la interacción IL-CO₂ comienza siendo más favorable a bajas presiones que la interacción MOF-CO₂, pero a partir de 100 kPa aproximadamente la tendencia se invierte. Este fenómeno se debe a que el IL no puede disolver el dióxido de carbono al carecer del espacio suficiente dentro de los estrechos canales que forman parte de la estructura. En este caso la mejora de la separación a partir de ese punto viene dada exclusivamente por un efecto de volumen excluido en el que la presencia del IL reduce la cantidad adsorbida de los dos componentes de la mezcla. Para la adsorción de metano se observa el caso contrario que para el dióxido de carbono, es decir, la interacción MOF-CH₄ prevalece sobre la IL-CH₄ en ambos MOFs. Esto se puede considerar previsible, dada la baja solubilidad del metano en el IL.^[34-35]

Distribución del adsorbato en el material híbrido

Otra forma de evidenciar la interacción del dióxido de carbono con el líquido iónico es analizar la distribución del gas adsorbido en los poros del material híbrido y del material original. La Figura 8 muestra los perfiles de ocu-

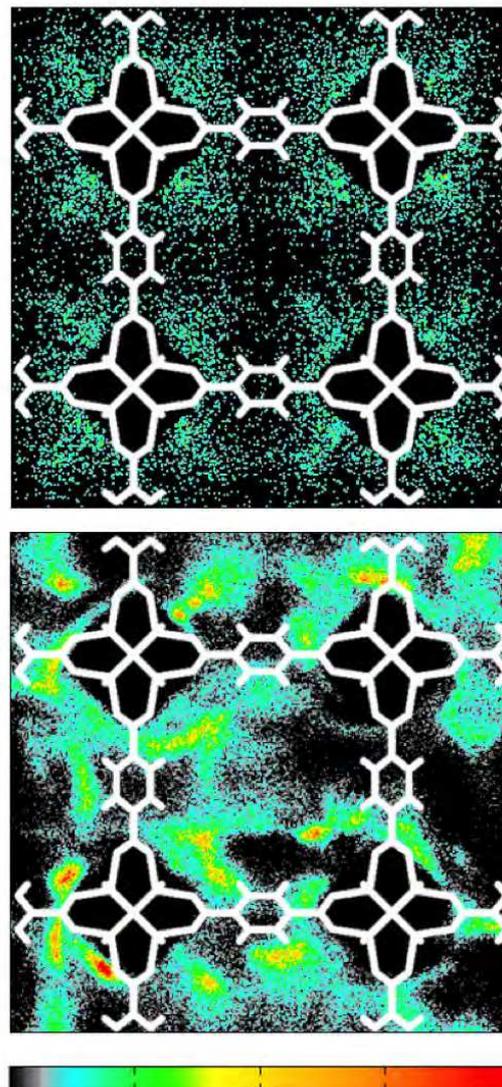


Figura 8. Perfiles de ocupación media de dióxido de carbono en IRMOF-1 vacío (arriba) e impregnado con líquido iónico (abajo)

pación media del dióxido de carbono en IRMOF-1 antes y después de impregnarlo con líquido iónico. Los perfiles de ocupación media o mapas de densidad son proyecciones en dos dimensiones de la distribución del adsorbato dentro de la estructura, promediados durante toda la simulación. Cuando la estructura está vacía, el dióxido de carbono se coloca de forma simétrica dentro de los poros, ocupando la superficie del MOF de forma homogénea. Al añadir el líquido iónico al MOF, la distribución del adsorbato cambia apareciendo zonas de mucha mayor densidad. Este efecto no se observa para el metano y tampoco para el nitrógeno.^[28] El líquido iónico genera nuevos centros de adsorción para el dióxido de carbono. Por ese motivo el gas se adsorbe a presiones más bajas cuanto va aumentando la concentración de IL que hay en el interior del MOF, siempre que esta concentración no sobrepase el 60 o el 70% del volumen accesible de la estructura.

Además de la distribución espacial del dióxido de carbono en los poros, también hemos estudiado la organización estructural del gas adsorbido con respecto a los constituyentes del IL. Para ello se han calculado las funciones de distribución radial, que proporcionan la probabilidad normalizada de encontrar dos átomos a cierta distancia entre ellos. Nuestros resultados demuestran que la primera esfera de coordinación del dióxido de carbono alrededor del anión $[\text{SCN}]^-$ se encuentra aproximadamente a unos 3 Å, mientras que alrededor del catión está a unos 4 Å.^[28] Además, la probabilidad de encontrar moléculas de dióxido de carbono alrededor del anión es unas tres veces mayor que rodeando al catión. También se ha observado que el catión y el anión se colocan a una distancia de unos 3 Å entre ellos, estando dentro de los poros. Esto garantiza que no exista una descompensación de carga en la estructura.

Difusión del gas adsorbido en el material híbrido

Otra cuestión que nos planteamos en el uso de materiales híbridos IL/MOF en procesos de separación de gases es si el líquido iónico podría bloquear las cavidades de las estructuras y por tanto impedir la difusión de los adsorbatos. Con objeto de arrojar algo de luz sobre ese asunto, realizamos simulaciones de dinámica molecular para calcular los coeficientes de autodifusión del dióxido de carbono y del metano en los materiales híbridos.^[28] La Figura 9 muestra los coeficientes de autodifusión calculados en función del volumen ocupado por el IL en los poros del IRMOF-1 y del MIL-47. Vemos que aumentando la concentración de IL disminuye el coeficiente de autodifusión de los adsorbatos, pero aun así éstos pueden difundir a través de los poros. Esto confirma que la presencia de IL no bloquea las cavidades de las estructuras y permite la movilidad del gas en su interior. Como cabría esperar, la disminución observada en la difusión de los adsorbatos al ir aumentando la concentración de IL es mayor cuanto más pequeño es el poro de la estructura.

Sustitución de IL por agua

En los apartados anteriores hemos visto cómo la presencia de pequeñas cantidades de IL en el interior del poro del MOF puede favorecer la captura y separación del dióxido de carbono. Lo que cabe preguntarse ahora es si este efecto se debe únicamente al hecho de introducir dentro del MOF un disolvente o si la naturaleza del disolvente va a ser relevante en la captura y separación del gas. De no importar la naturaleza del disolvente se podría tratar de sustituir el líquido iónico por otro disolvente más barato. En la industria se conocen otros disolventes como el procelexol, que se utiliza en lugar de los ILs ofreciendo un buen resultado.^[34] A pesar de ello, ese método disolvente contiene moléculas de tamaño demasiado grande como para introducirlo en las cavidades de los MOFs. Aunque el tamaño del IL hace viable que puedan usarse para impregnar las cavidades del MOF, nos parecía interesante finalizar

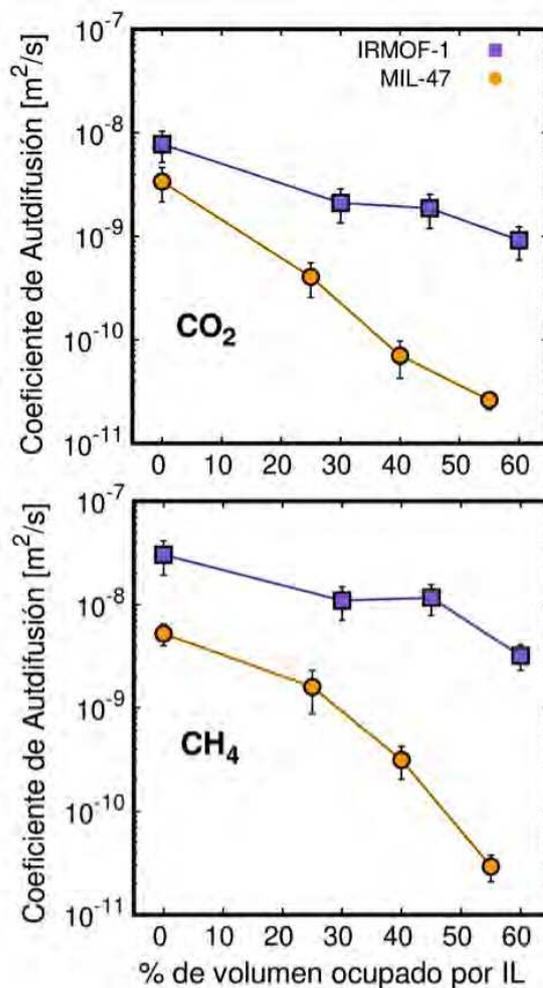


Figura 9. Coeficientes de autodifusión del dióxido de carbono (arriba) y metano (abajo) en IRMOF-1 y MIL-47 cargados con varias concentraciones de líquido iónico

nuestro estudio evaluando la eficiencia de otro disolvente de menor tamaño. Para ello, hemos comparado el uso del IL con el uso de agua para la separación CO_2/CH_4 ya que económicamente sería mucho más rentable.^[29] Debido que la inestabilidad de los MOFs en contacto con agua es bastante común, hemos realizado el estudio usando COFs. Los COFs, al igual que los MOFs son estructuras porosas, pero ensambladas por fuertes enlaces covalentes. Estas estructuras, suelen ser estables en agua.^[36] En este estudio se ha tomado como ejemplo el COF-5, una estructura bidimensional que forma un canal de 27 Å. Esta estructura esta formada por átomos de boro unidos por enlaces covalentes al ligando orgánico 2,3,6,7,10,11-hexahidroxitriifenileno. La figura 10 resume la principal conclusión de nuestro estudio al comparar el efecto de añadir una concentración de IL del 10% del volumen accesible del COF con el efecto de añadir un 50% del volumen accesible de agua. Se observa que a bajas presiones, una pequeña cantidad de IL favorece la selectividad de dióxido de carbono sobre metano. A medida que aumenta la presión, ese aumento de selectividad disminuye hasta asemejarse al que poseía la

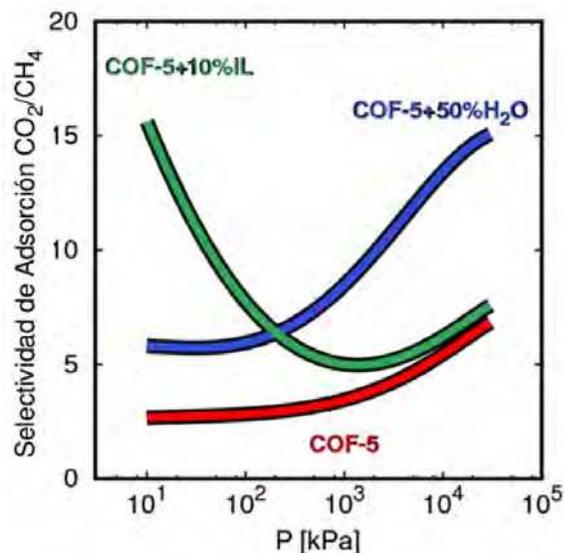


Figura 10. Selectividad resultante de la adsorción de una mezcla CO_2/CH_4 en COF-5 cargado con líquido iónico o con agua

estructura vacía debido a la baja concentración de IL utilizada. En el supuesto de sustituir el IL por agua, vemos que el comportamiento varía por completo. Por una parte se necesita gran cantidad de agua para mejorar la separación que será mayor en el rango de altas presiones. Por otra parte, el aumento de selectividad asociado a la presencia de agua se da siempre por efecto de volumen excluido, por lo que disminuye notablemente la capacidad adsorbente de la estructura.

CONCLUSIONES

La presencia de ILs dentro de estructuras porosas no afecta cualitativamente a la adsorción de metano y nitrógeno en el MOF, pero sí favorece la adsorción de dióxido de carbono hasta cierta presión, debido a la interacción de este componente con el IL. Esta presión dependerá del tamaño de poro de cada estructura. El IL no modifica el comportamiento de la isoterma de adsorción de metano o nitrógeno debido a que estos gases interactúan débilmente con el IL. Por consiguiente, el uso de ILs incrementa el factor de separación, entendido como selectividad de adsorción, en mezclas CO_2/CH_4 y CO_2/N_2 en favor del dióxido de carbono. La presencia de IL dentro del MOF hace que disminuya la movilidad de los gases dentro de los poros de las estructuras, aunque sigue permitiendo la difusión a través de estas.

El uso de agua como disolvente, en lugar de ILs, es una alternativa en estructuras estables con agua, para la separación de dióxido de carbono en el rango de altas presiones, es decir por encima de la presión atmosférica. Sin embargo, la mejora de la selectividad asociada al uso de agua conlleva una mayor pérdida de capacidad de adsorción de la estructura debido al efecto de volumen excluido ya que se necesita mucha cantidad de agua para aumentar la separación.

La separación de gases utilizando compuestos híbridos IL/MOFs se puede llevar a cabo recurriendo a dos estrategias en base a una selección de la estructura adecuada: La primera estrategia sería la de elegir estructuras de poro grande, donde el IL se comporte como lo haría en estado líquido y sea éste el que aumente la adsorción de gases que interactúen fuertemente con él. La segunda estrategia sería la de elegir estructuras de poro pequeño, en los que el IL controlará el tamaño de poro, excluyendo el componente minoritario de una mezcla de gases y aumentando así la pureza del componente mayoritario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del MINECO (Proyecto CTQ2016-80206-P), de la Junta de Andalucía (Proyecto FQM-1851) y a C3UPO por el soporte HPC. JMWL agradece al Consejo Europeo de Investigación por su financiación (proyecto ERC ZEOSEP Ref.: 779792).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Monnin, A. Indermühle, A. Dällenbach, J. Flückiger, B. Stauffer, T. F. Stocker, D. Raynaud, J.-M. Barnola, *Science* **2001**, *291*, 112-114.
- [2] T. M. L. Wigley, R. Richels, J. A. Edmonds, *Nature* **1996**, *379*, 240.
- [3] Y. Pu, N. Jiang, A. J. Ragauskas, *Journal of Wood Chemistry and Technology* **2007**, *27*, 23-33.
- [4] N. V. Plechkova, K. R. Seddon, *Chem. Soc. Rev.* **2008**, *37*, 123-150.
- [5] M. J. Earle, K. R. Seddon, *Pure Appl. Chem.* **2000**, *72*, 1391.
- [6] M. Gruttadauria, F. Giacalone, P. Agrigento, R. Noto, "Non-solvent" Applications of Ionic Liquids in Organocatalysis. In *Ionic Liquids in Biotransformations and Organocatalysis*; John Wiley & Sons, Ltd, **2012**.
- [7] J. P. Hallett, T. Welton, *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 3508-3576.
- [8] J. Wang, J. Luo, S. Feng, H. Li, Y. Wan, X. Zhang, *Green Energy & Environ.* **2016**, *1*, 43-61.
- [9] F. Zhou, Y. M. Liang, W. M. Liu, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 2590.
- [10] M. E. Van Valkenburg, R. L. Vaughn, M. Williams, J. S. Wilkes, *Thermochim. Acta* **2005**, *425*, 181.
- [11] M. Kunze, S. Jeong, E. Paillard, M. Schönhoff, M. Winter, S. Passerini, *Adv. Energy Mater.* **2011**, *1*, 274-281.
- [12] E. Azaceta, L. Lutz, A. Grimaud, J. M. Vicent-Luna, S. Hamad, L. Yate, G. Cabanero, H. J. Grande, J. A. Anta, J. M. Tarascon, et al., *ChemSusChem* **2017**, *10*, 1616-1623.
- [13] J. M. Vicent-Luna, E. Azaceta, S. Hamad, J. M. Ortiz-Roldán, R. Tena-Zaera, S. Calero, J. A. Anta, *ChemPhysChem* **2018**, *19*, 1665-1673.
- [14] J. M. Vicent-Luna, J. M. Ortiz-Roldán, S. Hamad, R. Tena-Zaera, S. Calero, J. A. Anta, *ChemPhysChem* **2016**, *17*, 2473-2481.
- [15] F. Hao, H. Lin, *RSC Adv.* **2013**, *3*, 23521-23532.
- [16] J. M. Vicent-Luna, J. Idígoras, S. Hamad, S. Calero, J. A. Anta, *J. Phys. Chem. C* **2014**, *118*, 28448-28455.
- [17] M. Trilla, R. Pleixats, T. Parella, C. Blanc, P. Dieudonne, Y. Guari, M. W. C. Man, *Langmuir* **2008**, *24*, 259-265.

- [18] P. Vidinha, N. M. T. Lourenco, C. Pinheiro, A. R. Bras, T. Carvalho, T. Santos-Silva, A. Mukhopadhyay, M. J. Romao, J. Parola, M. Dionisio, et al., *Chem. Commun.* **2008**, 5842-5844.
- [19] M. Althuluth, J. P. Overbeek, H. J. van Wees, L. F. Zubeir, W. G. Haije, A. Berrouk, C. J. Peters, M. C. Kroon, *J. Membr. Sci.* **2015**, *484*, 80-86.
- [20] A. Chapeaux, L. D. Simoni, T. S. Ronan, M. a. Stadtherr, J. F. Brennecke, *Green Chem.* **2008**, *10*, 1301-1301.
- [21] C. Cadena, J. L. Anthony, J. K. Shah, T. I. Morrow, J. F. Brennecke, E. J. Maginn, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 5300-5308.
- [22] Z. Lei, C. Dai, B. Chen, **2012**.
- [23] D. Dubbeldam, A. Torres-Knoop, K. S. Walton, *Mol. Simul.* **2013**, *39*, 1253-1292.
- [24] Y. Chen, Z. Hu, K. M. Gupta, J. Jiang, *J. Phys. Chem. C* **2011**, *115*, 21736-21742.
- [25] J. Manuel Vicent-Luna, J. Jose Gutierrez-Sevillano, J. Antonio Anta, S. Calero, *J. Phys. Chem. C* **2013**, *117*, 20762-20768.
- [26] Q. X. Luo, B. W. An, M. Ji, S. E. Park, C. Hao, Y. Q. Li, *J. Porous Mater.* **2015**, *22*, 247-259.
- [27] S. Zhang, J. Zhang, Y. Zhang, Y. Deng, *Chem. Rev.* **2017**, *117*, 6755-6833.
- [28] J. M. Vicent-Luna, J. J. Gutiérrez-Sevillano, S. Hamad, J. Anta, S. Calero, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, *10*, 29694-29704.
- [29] J. M. Vicent-Luna, A. Luna-Triguero, S. Calero, *J. Phys. Chem. C* **2016**, *120*, 23756-23762.
- [30] F. P. Kinik, A. Uzun, S. Keskin, *ChemSusChem* **2017**, *10*, 2842-2863.
- [31] A.-L. Revelli, F. Mutelet, J.-N. Jaubert, *J. Phys. Chem. B* **2010**, *114*, 12908-12913.
- [32] F. P. Kinik, C. Altintas, V. Balci, B. Koyuturk, A. Uzun, S. Keskin, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, *8*, 30992-31005.
- [33] M. Mohamedali, H. Ibrahim, A. Henni, *Chem. Eng. J.* **2018**, *334*, 817-828.
- [34] M. Ramdin, Q. Chen, S. P. Balaji, J. Manuel Vicent-Luna, A. Torres-Knoop, D. Dubbeldam, S. Calero, T. W. de Loos, T. J. H. Vlugt, *J. Comput. Sci* **2016**, *15*, 74-80.
- [35] M. Ramdin, S. P. Balaji, J. Manuel Vicent-Luna, J. J. Gutierrez-Sevillano, S. Calero, T. W. de Loos, T. J. H. Vlugt, *J. Phys. Chem. C* **2014**, *118*, 23599-23604.
- [36] B. J. Smith, N. Hwang, A. D. Chavez, J. L. Novotney, W. R. Dichtel, *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 7532-7535.



XVI Simposio Jóvenes Investigadores Químicos

XVI SIMPOSIO DE INVESTIGADORES Jóvenes de la Real Sociedad Española de
Química RSEQ-SIGMA ALDRICH (MERCK)

Profármacos, ejemplos seleccionados del mercado español I.

Profármacos unidos a transportador

Carolina Burgos, Ana M. Cuadro y Julio Alvarez-Builla

Resumen: La formación de derivados biorreversibles de fármacos –profármacos– puede reconocerse como una herramienta para mejorar el comportamiento de fármacos con dificultades diversas en su uso clínico. El trabajo recoge ejemplos relevantes de profármacos utilizados en terapéutica en España, explicando con frecuencia su comportamiento con modelos muy sencillos, en función del pKa de los grupos funcionales presentes en la molécula, o de sus valores de hidrofobicidad $-\log P-$. En todos los ejemplos, se han utilizado valores calculados para estos parámetros, obtenidos mediante herramientas computacionales sencillas.

Palabras clave: Profármacos, transportador de fármacos, metabolismo, biotransformación, hidrofobicidad.

Abstract: The formation of biorreversible derivatives of drugs –prodrugs– can be recognized as a tool to improve the behaviour of drugs with various difficulties in their clinical use. The present work revises relevant examples of prodrugs used in therapy in Spain, often explaining their behaviour with very simple models, depending on the pKa of the functional groups present in the molecule, or their hydrophobicity values $-\log P-$. In all the examples, calculated values have been used for these parameters, obtained using simple computational tools.

Keywords: Prodrugs, Drug Carrier, Metabolism, Biotransformation, Hydrophobicity.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de fármacos que puedan interaccionar selectivamente con determinados receptores choca a veces con la realidad de las características farmacocinéticas de estos productos cuando se utilizan *in vivo*. La existencia de, por ejemplo, grupos funcionales polares en la molécula, que puedan ionizarse con facilidad, puede hacer que un determinado fármaco se absorba con dificultad –biodisponibilidad baja– o que no llegue al tejido donde están los receptores con los que ha de actuar, o en otros casos, si tiene grupos lábiles en el entorno fisiológico, puede que sea metabolizado con excesiva rapidez, y en todos estos casos, la obtención de un derivado biorreversible, inactivo –profármaco–^[1] puede permitir mejorar sus características farmacocinéticas, y que los enzimas metabólicos del propio paciente liberen el fármaco de manera selectiva.

El concepto de profármaco es clásico dentro del área de la Química Médica, y sigue siendo objeto de numerosos libros y revisiones,^[2] alguno en esta revista.^[2h] En la actualidad, entre los 112 nuevos productos lanzados al mercado entre 2014 y 2016, algo más de un 6% son profármacos.^[3]

El concepto procede de A. Albert,^[4] (Figura 1) que definió un profármaco como: “un producto inactivo que puede convertirse en activo mediante una reacción metabólica”.

Como se puede ver en la Figura 1, un profármaco se diseñó inicialmente para atravesar membranas que el fármaco no era capaz de atravesar.^[5] Sobre esta base, muchos profármacos están diseñados de forma que el fármaco está unido a un fragmento transportador. Esto permite que el conjunto atraviese las membranas biológicas correspondientes, para que después por vía metabólica, se produzca la separación de la molécula activa, el fármaco,



C. Burgos

A. M. Cuadro

J. Alvarez-Builla

Departamento de Química Orgánica
Facultad de Farmacia
Universidad de Alcalá
Campus Universitario s.n. 28871
Alcalá de Henares, Madrid (España)
C-e: julio.alvarez@uah.es

Recibido: 19/11/2018. Aceptado: 23/02/2019.

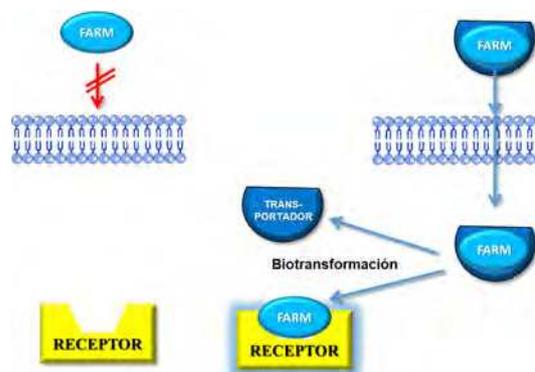


Figura 1. Esquema de funcionamiento de un profármaco según Albert^[4]



Figura 2. Razones por las que se diseña un profármaco.^[6] Abreviaturas. PH: fase farmacéutica. PK: fase farmacocinética. PD: fase farmacodinámica

y el fragmento transportador, que se elimina o metaboliza. Mientras tanto, el fármaco interactúa con el receptor, desencadenando el efecto correspondiente.

Tal como se indica en la Figura 2, la experiencia acumulada en este campo, permite hoy elaborar un diagrama de las razones fundamentales por las que se diseña un profármaco.

Estas razones obedecen a problemas de comportamiento del fármaco en el organismo del paciente, relacionados con tres fases principales (Figura 2): a) comportamiento en la fase farmacéutica (PH malva), relacionado sobre todo con propiedades como solubilidad, estabilidad y otros efectos relacionados; b) comportamiento en la fase farmacocinética, (PK, azul), relacionado con absorción, metabolismo, o semivida del producto; y c) comportamiento en la fase farmacodinámica, (PD, amarillo) relacionado con interacciones fármaco-receptor. Se va a utilizar este esquema radial como guía para ver ejemplos de profármacos, no tanto procedentes de la literatura, sino para describir ejemplos representativos, actualmente en uso clínico en el mercado español.^[6] De hecho, el catálogo de medicamentos del CGCOF representa un ejercicio de gran interés para detectar el uso real, y actualizado, de este tipo de tecnología.

En las clasificaciones que se han hecho de profármacos,^[2d] se describen siempre dos tipos fundamentales: el clásico de **profármacos unidos a transportador**, es decir aquellos en los que se ha colocado un fragmento biorreversible para alterar las propiedades físico-químicas de la molécula, y que generan el fármaco principalmente por procesos hidrolíticos, y los denominados **profármacos bioprecursores**, que no disponen de transportador reconocible, y en los que normalmente se ha identificado que el principio activo no es el producto administrado al paciente, sino uno de sus metabolitos principales, generado a través de procesos oxidativos o reductivos. Además de estos, hay un apartado de **profármacos mixtos**, en los que se ha utilizado una combinación de las dos aproximaciones anteriores. En la mayoría de los ejemplos que se indican a continuación, puede verse una gran influencia de las propiedades físico-químicas de la molécula

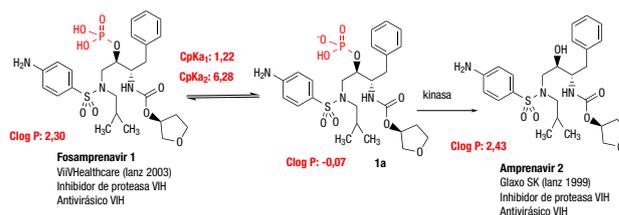
o moléculas implicadas, que suelen explicar con una cierta aproximación el comportamiento de cada producto en el organismo. Para ello, en la mayor parte de los esquemas se incluyen valores de C_pK_a y $Clog P$ –alternativamente podría utilizarse $Clog D$ que correlaciona hidrofobicidad de la molécula con el pH del entorno, en el caso de productos con grupos polares–.^[7,8]

2. PROFÁRMACOS UNIDOS A TRANSPORTADOR EJEMPLOS RELEVANTES

Se va a seguir como guía en este apartado, el diagrama representado en la Figura 2. En todos los ejemplos se ha resaltado en color rojo el fragmento que constituye el transportador. Todos los fármacos están identificados por a) Denominación común internacional; b) Empresa propietaria de la primera patente; c) año de lanzamiento –y cuando no está disponible, se indica el año de la primera patente–; y d) Uso terapéutico.

2.1. Modular la solubilidad del producto

Uno de los ejemplos recientes y más sencillos en este apartado es el de la sustitución de Amprenavir **2**, un anti-virásico contra el VIH (virus de la inmunodeficiencia humana, productor del SIDA), muy insoluble en agua, y que por ello requiere administrar al paciente ocho capsulas/día, por Fosamprenavir **1**, un derivado fosforilado mucho más soluble, que permite la preparación de comprimidos de 600 mg., de los que se administran al paciente solo 2 por día.^[9] El Esquema 1 muestra la molécula de Fosamprenavir **1**, con un grupo fosfato (CpK_{a1} : 1,22; CpK_{a2} : 6,28), que puede ionizarse al mono o al dianión, incluso a pH ácido.^[10] Por otra parte, aunque la solubilidad y la hidrofobicidad ($Clog P$) no son propiedades iguales, sí están correlacionadas, por lo que las especies con valores de $Clog P \leq 0$, como la **1a** serán más hidrosolubles que las que tengan valores más altos, como **2**.



Esquema 1. Conversión de Fosamprenavir **1** en Amprenavir **2**

Tabla 1. Ionización del grupo fosfato de Fosamprenavir, calculados sobre el modelo de Henderson-Hasselbach, utilizando Marvin Sketch^[10]

	pH	1%	1a%	1b%	1c%	1d%
Estómago	2,00	4,18	23,42	10,96	0,00	61,44
Sangre	7,20	0,00	10,74	0,00	89,26	0,00

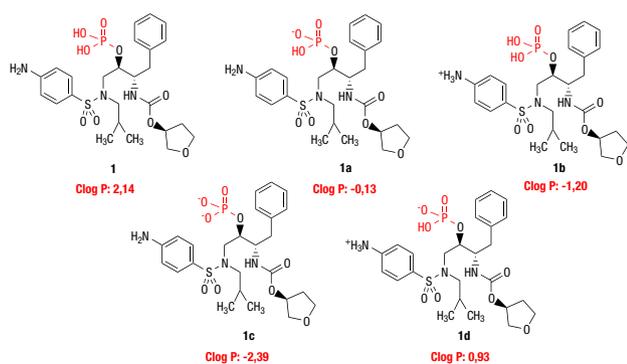
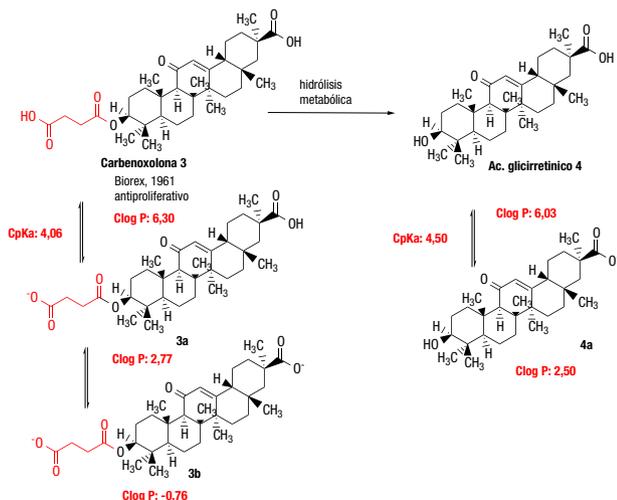


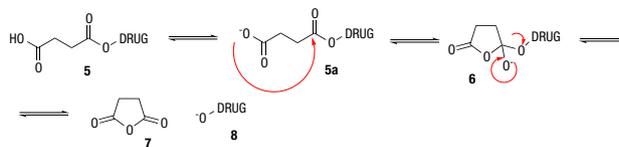
Figura 3. Formas no ionizada e ionizadas de Fosamprenavir 1

Sin embargo, en una molécula como **1**, que además del grupo fosfato tiene un grupo amino básico, la ionización a diferentes valores de pH es más compleja de lo que indica el Esquema 1. En la Figura 3 pueden verse las distintas formas ionizadas de **1**, con sus valores de Clog P correspondientes y en la tabla 1, cómo evolucionan los porcentajes de cada forma a dos valores de pH característicos. Como conclusión, hay dos ideas que se obtienen de este esquema, a) todas las especies ionizadas son más hidrófilas que **1**, y están presentes en el equilibrio, en proporciones apreciables aún a pH ácido; y b) la forma **1d**, una betaína, con dos cargas opuestas sobre la misma molécula, es algo menos hidrófila que las que no tienen las cargas compensadas.

Otro ejemplo interesante de este apartado es el de Carbenoxolona **3** (Esquema 2), un succinilmonoéster del ácido glicirretínico **4**, utilizado en el tratamiento de úlceras bucales o periorales. El ácido glicirretínico es un producto muy insoluble en agua (orienta hacia su baja solubilidad en agua su alto valor de Clog P: 6,03). Aunque el producto tiene un ácido carboxílico que puede ionizarse, favoreciendo la formación de especies **4a** con valores de Clog P más bajos (Clog P: 2,50) la introducción del resto de ácido succínico, favorece la ionización, y con ello la formación de especies más hidrófilas (hasta **3b**, Clog P: -0,76).



Esquema 2. Conversión de Carbenoxolona **3** a ácido glicirretínico **4**



Esquema 3. Mecanismo intramolecular de desacidación de un resto succinilo

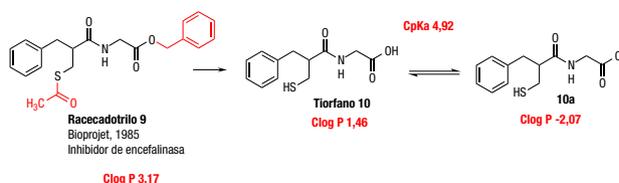
Como resultado, Carbenoxolona **3** se formula en cremas de base hidrófila, y se adhiere a las mucosas con más facilidad, liberando ácido glicirretínico **4** mediante las esterases abundantes en piel y mucosas, pero compitiendo con el mecanismo en cascada característico de los monoésteres del ácido succínico (Esquema 3). Los CpKas indicados, utilizados a través del modelo de Henderson-Hasselbach^[7,10] muestran como las especies ionizadas aparecen en porcentajes altos en el pH sanguíneo (aprox. 7,2). El producto se recomienda como antiinflamatorio y citoprotector, y se utiliza en pomadas para acelerar la cicatrización de llagas en la mucosa oral o perioral, así como en úlceras esofágicas.^[11]

La Carbenoxolona representa un buen ejemplo de profármacos en el que el resto succinilo tiene un mecanismo mayoritario de desacidación intramolecular, tal como se indica en el Esquema 3.^[12]

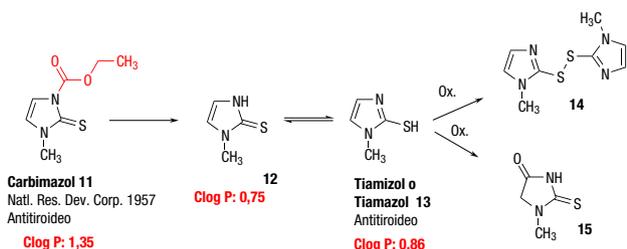
2.2. Mejorar la estabilidad química

En algunos casos, la razón que impulsa a la creación de un profármaco es la inestabilidad, química o metabólica, del fármaco correspondiente. En el Esquema 4 está indicado el proceso metabólico de Racecadotril **9**,^[13] un doble éster que libera Tiorfano **10**, que es el fármaco. Este producto es un antidiarreico antisecretor intestinal, a través de su efecto inhibidor de encefalinas. La razón de utilizar el producto como profármaco reside en la necesidad de proteger el grupo tiol, muy fácilmente biodegradable. Los valores de Log P del profármaco (Clog P: 3,17), y del fármaco (Clog P: entre 1,46 y -2,07 en la forma ionizada **10a**, con un CpKa de 4,92). permiten entender que el profármaco **9** es más lipófilo, y por tanto más fácilmente absorbible que el fármaco **10**, que es más hidrófilo y además, menos estable metabólicamente.

En el caso de Carbimazol **11**, (Esquema 5) el transportador, de tipo carbamato, produce un aumento de lipofilia de la molécula (Clog P: 1,35) frente a Tiamizol **12-13** (Clog P: 0,86) lo que mejora la absorción del producto, pero sobre todo la estabilidad, ya que al liberarse progresivamente en el organismo, las bajas concentraciones de fármaco en los tejidos favorecen cinéticas más lentas de las reacciones metabólicas de oxidación que producen principalmente **14** y **15** inactivos.



Esquema 4. Metabolismo de Racecadotril **9**



Esquema 5. Metabolismo de Carbimazol 11

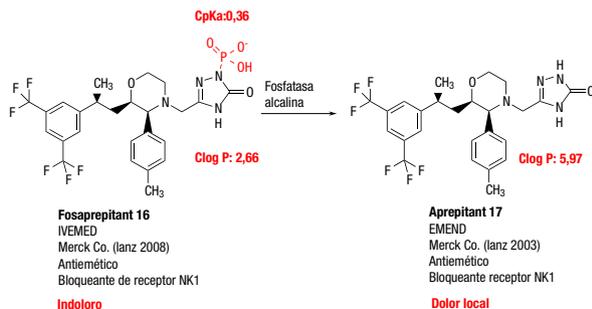
Tiamizol es un inhibidor de la peroxidasa tiroidea que cataliza la yodación de restos de tirosina. Por ello, tanto el fármaco como el profármaco se utilizan como antitiroideos.^[14]

2.3. Disminuir irritación y dolor

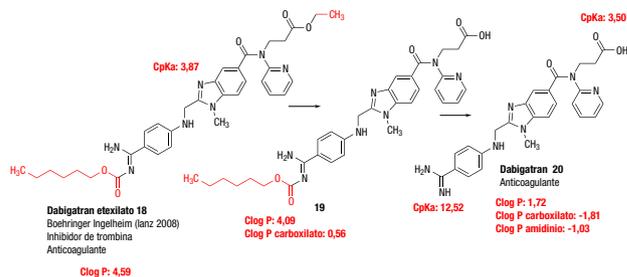
Con frecuencia, la inyección intramuscular de determinados fármacos produce una sensación dolorosa, debido a la baja solubilidad en agua del producto. Esto hace que el inyectable sea una suspensión, lo que impide la inyección intravenosa y produce dolor en el tejido muscular hasta que el producto se va diluyendo con el flujo sanguíneo local. El caso de Fosaprepitant **16**, (Esquema 6), muestra como el profármaco **16** tiene un grupo fosfamato con un pKa (CpKa: 0,36) muy ácido, lo que permite administrarlo como sal y mantenerlo ionizado en grandes proporciones en el entorno de pH 7, como corresponde a la zona de inyección. En consecuencia, el producto es más hidrófilo (Clog P: 2,66) que el fármaco Aprepitant **17** (Clog P: 5,97),^[15] por lo que puede administrarse como inyectable acuoso prácticamente indoloro. El producto se utiliza como antiemético, especialmente en pacientes tratados con quimioterapia antitumoral.

2.4. Mejorar absorción y biodisponibilidad

En el Esquema 7 está representado el ejemplo de Dabigatran etexilato **18**, un producto reciente en el mercado, que representa una forma de administración oral con respecto al fármaco Dabigatran **20**, que solo puede administrarse por vía parenteral. El profármaco **18** sufre una doble hidrólisis del grupo éster (más rápida) y del carbamato (más lenta), a través del intermedio **19**, para generar Dabigatran **20**.



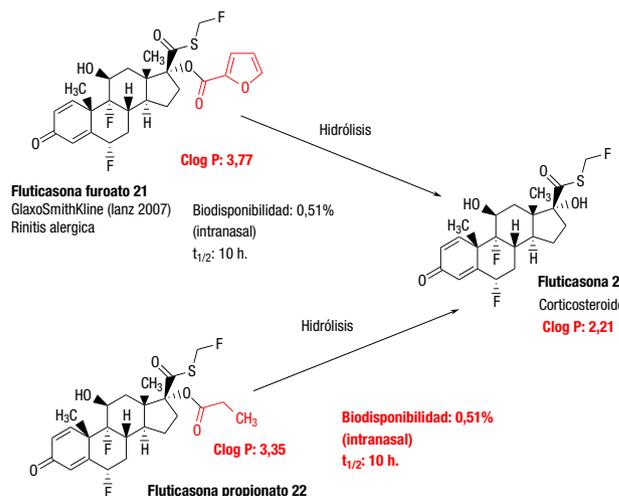
Esquema 6. Activación de Fosaprepitant 16



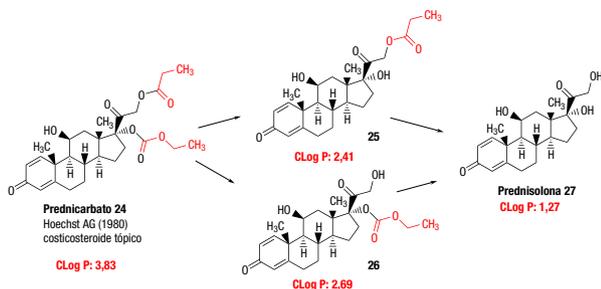
Esquema 7. Metabolismo de Dabigatran etexilato 18

Aunque sea un tratamiento simplificado, el profármaco **18** (Clog P: 4,59) es mucho más lipófilo que el fármaco **20** (Clog P: 1,72) sobre todo si se tiene en cuenta que este último reducirá su valor de log P si se ioniza, tanto por el grupo ácido, como por la amidina, que es un grupo básico fuerte (Clog P: -1,81, -1,03 en las formas ionizadas). Estas características físico-químicas muestran que Dabigatran tiene un Log P excesivamente hidrófilo, lo que lo hace muy inadecuado para la absorción oral y por ello no puede utilizarse más que por vía parenteral. Dabigatran etexilato **18**, por el contrario, puede administrarse por vía oral, liberando Dabigatran **20**, que actúa como inhibidor de trombina.^[16]

En el Esquema 8 se representan dos ejemplos de una estrategia relacionada, derivados de fluticasona **23**, un corticosteroide utilizado como antiinflamatorio. Sus dos profármacos, furoato **21** y propionato **22**, se utilizan como productos de aplicación local, con una muy baja difusión sistémica –es decir, por exceso de lipofilia, difunden mal en los tejidos–. Como se puede ver a partir de sus coeficientes de reparto, ambos profármacos tienen valores por encima de 3, lo que asegura una mala solubilidad en agua, y justifica una baja difusión por los tejidos. Sin embargo, las mucosas de las vías pulmonares son muy lipófilas y ricas, como todas las mucosas, en esterasas. Por ello, **21** se utiliza en spray contra la rinitis alérgica, para que actúe localmente sobre las vías respiratorias y sea hidrolizado en el área intranasal, liberando **23** lentamente.^[17] De forma similar, **22** se utiliza por



Esquema 8. Metabolismo de Fluticasona furoato 21 y propionato 22

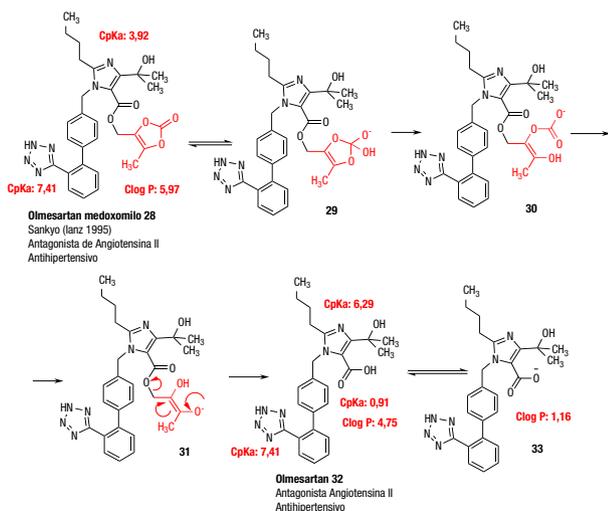


Esquema 9. Metabolismo de Prednicarbate 27

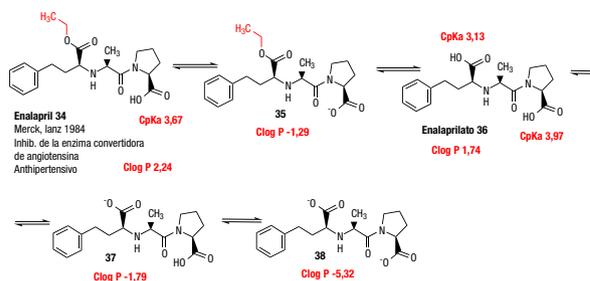
la misma vía para asma, rinitis alérgica o para tratamiento de pólipos nasales.^[18]

En el Esquema 9, aparece el mecanismo de liberación de Prednisolona 27, a partir de Prednicarbate 24. El profármaco se utiliza como antiinflamatorio local de uso tópico, aplicándose sobre la piel, otra zona muy rica en esterasas, que liberan 27 a través de dos intermedios, de los que 26 debe ser el predominante, dado que la hidrólisis del éster carboxílico debe ser más rápida que la del grupo carbonato. El profármaco (Clog P: 3,83) es suficientemente lipófilo para penetrar en la piel –que es una barrera muy lipófila, con esterasas–, y a medida que penetra se va liberando el fármaco, mucho menos lipófilo (Clog P: 1,27), que no penetraría en caso de utilizarse sin derivatizar. El producto se utiliza como corticosteroide tóxico antiinflamatorio, también en enfermedades autoinmunes y en algunos tipos de cáncer, normalmente como pomada o disolución para aplicar sobre la piel.^[19]

El ejemplo de Olmesartan medoxomilo 28, un antagonista de la Angiotensina II utilizado como antihipertensivo (Esquema 10), es un caso de profármaco unido a transportador –en forma de carbonato cíclico– que permite mejorar la absorción y biodisponibilidad del fármaco. Tal como puede verse en el Esquema 10, 28 tiene un grupo básico, imidazol (CpKa: 3,92) y un grupo débilmente ácido, tetrazol (CpKa: 7,41). En términos de hidrofobicidad, 28 es más hidrofóbico de lo que son los fármacos habituales (Clog P: 5,97) y este valor no se altera mucho cuando el producto se protona en el imidazol (Clog P: 4,28) en el estómago. A pesar de todo, el



Esquema 10. Metabolismo de Olmesartan medoxomilo 28



Esquema 11. Metabolismo de Enalapril 34

producto se absorberá mayoritariamente en el intestino, donde la especie no ionizada será mayoritaria, y el fragmento de carbonato se hidrolizará, tal y como indica la secuencia 28-32, donde la hidrólisis comienza por el grupo carbonato, menos reactivo, pero menos impedido estéricamente y continúa, a partir del primer paso, en un mecanismo en cascada. Al final, 32 tiene libre un grupo carboxilo con una acidez tal (CpKa: 0,91) que hace que incluso en medio neutro tenga un porcentaje alto de especie ionizada 33, con un carácter muy hidrófilo (Clog P: 1,16). Por todo ello, Olmesartan 32, no puede ser administrado por vía oral, a diferencia del profármaco correspondiente, que no solo puede administrarse por vía oral, sino que tiene una semivida relativamente larga ($t_{1/2}$: 13h).^[20]

En el Esquema 11 hay otro ejemplo, Enalapril 34, un inhibidor de la enzima convertidora de angiotensina (ECA), que se utiliza como antihipertensivo. El producto, tal como puede verse en el Esquema 11, es relativamente polar (Clog P: 2,24) pero tiene un grupo ácido que puede ionizarse con facilidad, aumentando la hidrosolubilidad de la especie –véase 35 en el Esquema 11–. El producto se hidroliza en el hígado, dando lugar a Enalaprilato 36, más hidrófilo (Clog P: 1,74) y que se hace todavía más cuando se deprotona una o dos veces (Clog P: –1,79 para 37, Clog P: –5,32 para 38). En relación con su hidrofilia, Enalaprilato 36, no puede utilizarse por vía oral a causa de su baja biodisponibilidad, a diferencia de Enalapril 34 (biodisponibilidad 3-12% para 36, 55-75% para 34).^[21]

En la Figura 4 se indican los profármacos análogos a Enalapril 37, que están actualmente en el mercado español.^[22] Con pequeñas diferencias, todos responden a la misma modificación que la comentada en el Esquema 11 anterior.

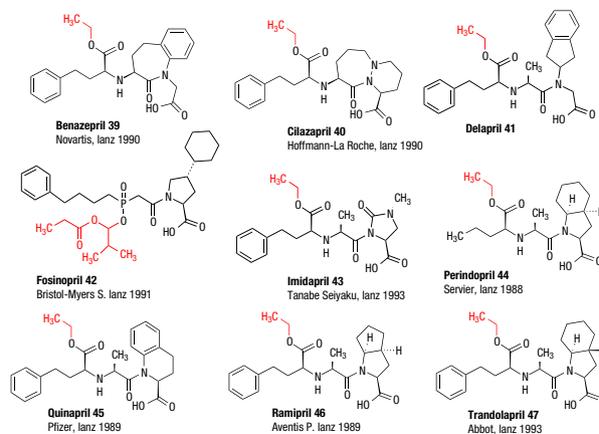
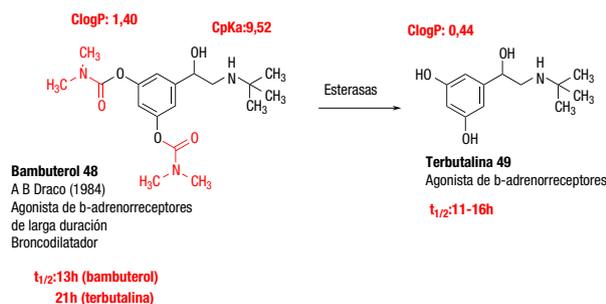


Figura 4. Profármacos análogos de Enalapril, como inhibidores ECA

2.5. Modular metabolismo

En muchos casos, la semivida del fármaco está ligada, no solo a la capacidad del tejido para absorber/excretar la molécula, sino a la resistencia metabólica que tengan los grupos funcionales presentes. En el apartado 2.2 pueden verse dos ejemplos de profármacos diseñados para proteger la estabilidad química de los fármacos de los que proceden, Raccadotrilo **9** y Carbimazol **11**. Además, en el Esquema 12 aparece representado Bambuterol **48**, un antiasmático de larga duración, utilizado en forma de nebulizador, que libera Terbutalina **49**.

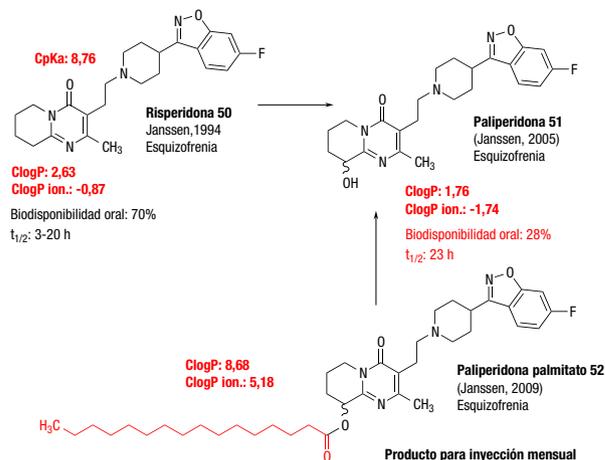
La semivida ($t_{1/2}$) del producto se debe, por una parte a la alta lipofilia del dicarbamato, que hace que el producto se fije en las mucosas bronquiales. De ahí se va liberando terbutalina **49** por medio de la acción de las esterasas, que hidrolizan los grupos carbamato lentamente. Pero además, el profármaco tiene los grupos fenólicos bloqueados, lo que impide que se produzcan conjugados en forma de glucuronidos, que se eliminan más rápidamente.^[23]



Esquema 12. Bambuterol **48**, un antiasmático de larga duración

2.6. Mejorar semivida

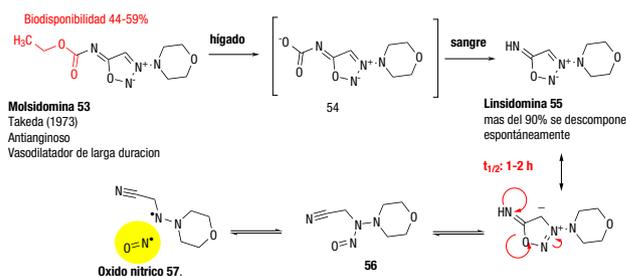
En el Esquema 13 aparece el desarrollo de Paliperidona palmitato **52**, un profármaco diseñado a partir del estudio metabólico de Risperidona **50**, desarrollado para tratar la esquizofrenia. Este producto, posee una biodisponibilidad oral alta (70%), y una lipofilia que se altera, incluso en medio neutro, al tener un grupo amino básico (CpKa: 8,76), y que oscila en una horquilla de valores de Clog P: 2,3 y -0,87, -donde este último valor corresponde al producto ionizado en el nitrógeno piperidínico-. El producto tiene una biodisponibilidad alta (70%) y una semivida relativamente corta (3-20h) que obliga a administrar a los pacientes una o varias dosis diarias del producto. Cuando se estudió el metabolismo del producto se identificó Paliperidona **51** como metabolito principal, un producto que la misma compañía patentó en 2005, y que tiene con respecto a **50** una lipofilia más reducida, una biodisponibilidad más baja, pero una semivida notablemente larga ($t_{1/2}$: 23h). La funcionalización de **51** en forma de palmitato produce **52**, un producto de alta lipofilia que sirve para inyecciones administrables una vez al mes, y que como forma depot, permite el mantenimiento de los niveles terapéuticos de Paliperidona **51** en el paciente, durante ese período de tiempo.^[24]



Esquema 13. Risperidona **50**, Paliperidona **51** y Paliperidona palmitato **52**

2.7. Liberación selectiva en tejido

En otros casos, lo que se pretende al diseñar el profármaco es la liberación selectiva en el tejido donde están los receptores del fármaco liberado. En el Esquema 14 puede verse el ejemplo de la Molsidomina **53**, un producto estable, pero que sufre en el hígado la hidrólisis y descarboxilación del grupo carbamato, dando lugar a Linsidomina **55**, que se libera al torrente circulatorio donde descompone espontáneamente liberando, a través de la secuencia **55-56** el óxido nítrico **57** que es el auténtico fármaco en todo el proceso, actuando como vasodilatador.^[25] En este caso, hay que hablar de un profármaco en cascada, donde solo el primer paso es inducido por una enzima, una esterasa, y el resto del proceso es espontáneo.

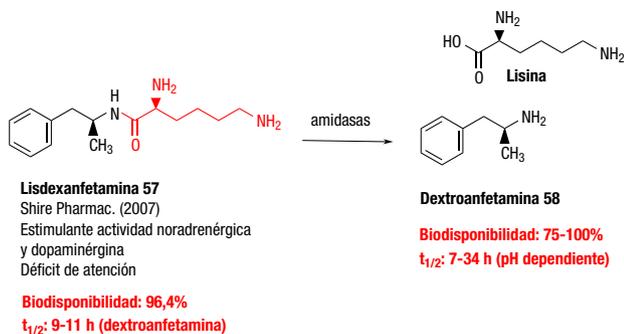


Esquema 14. Liberación de óxido nítrico a partir de Molsidomina **53**

2.8. Disminuir toxicidad

Tal como se indica en el Esquema 15, Lisdexanfetamina **57**, es un profármaco que es hidrolizado por enzimas situados en los glóbulos rojos, facilitando la liberación del fármaco de forma más lenta que si se administrase Dextroanfetamina **58**, directamente -véanse los datos de semivida de ambos productos, donde la de **58** es muy variable dependiendo de los pacientes, y de su pH urinario-.^[26]

El producto se utiliza para el tratamiento del déficit de atención por hiperactividad, sin los problemas de toxicidad

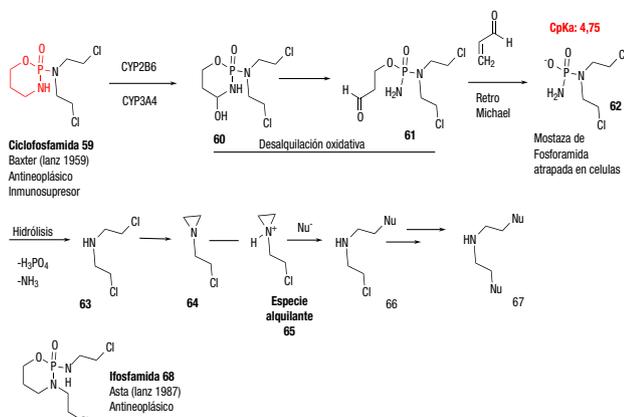


Esquema 15. Liberación de Dextroanfetamina 58 a partir de Lisidexanfetamina 57

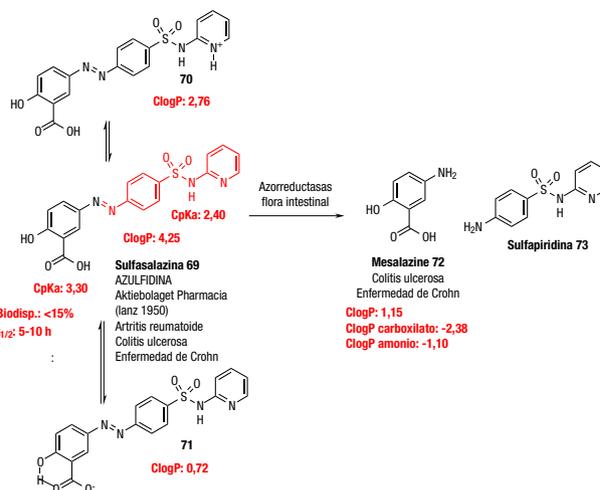
y efectos secundarios asociados al uso de dextroanfetamina 58 directamente.

2.9. Activación selectiva

De los profármacos integrados en este apartado, un caso muy clásico es el de la Ciclofosfamida **59** (Esquema 16). Un profármaco de mostaza nitrogenada que se utiliza como antineoplásico, o como inmunodepresor en trasplante de tejidos o en enfermedades inflamatorias, y que circula por los tejidos como especie inactiva **59**,^[27] hasta la secuencia que comienza con la desalquilación oxidativa **60-61** y una retro Michael posterior, que genera la especie **62** la cual, atrapada en las células cancerosas, va siendo activada por hidrólisis con las fosforamidatas abundantes en dichos tejidos, como mostaza nitrogenada **63**, que va reaccionando como agente alquilante, frente a moléculas de ADN principalmente, produciendo la despurinización que se observa en **66** y **67**. Esta última especie es la más abundantemente detectada. El producto es inhabitual dentro de los profármacos unidos a transportador, dado que el proceso de liberación de la especie activa se produce por una oxidación –mientras la mayoría de estos profármacos se liberan por medio de procesos hidrolíticos–. En este caso, el fragmento marcado en rojo en **59**, actúa como transportador, impidiendo la liberación indiscriminada de la mostaza **67**. Su desarrollo ha dado



Esquema 16. Activación metabólica de Ciclofosfamida 59



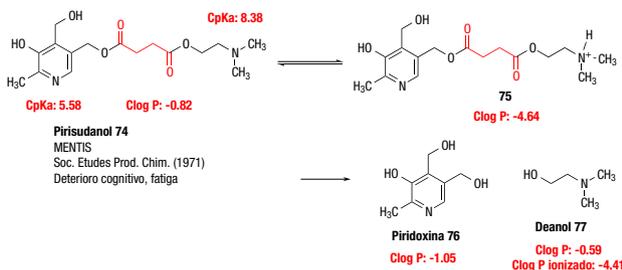
Esquema 17. Liberación de Mesalazina 70, a partir de Sulfasalazina 69

lugar a análogos posteriores como Ifosfamida **68**, que se utiliza frente a diversos tipos de cáncer.

Otro ejemplo clásico de este apartado, que sigue en el mercado español, es el de la Sulfasalazina **69** (Esquema 17), utilizado en la artritis reumatoide, colitis ulcerosa y enfermedad de Crohn.^[28] El producto se absorbe con dificultad, dado que se ioniza, reduciendo drásticamente su hidrofobicidad, tanto a pH ácido –estómago– como a pH básico –intestino–, y como consecuencia, su biodisponibilidad no supera el 15% de la dosis. Por ello, el producto se mantiene mayoritariamente en el tracto gastrointestinal, hasta llegar al intestino grueso, donde la flora intestinal tiene azoreductasas que liberan Mesalazina **72** y Sulfapiridina **73**. Mesalazina es un antiinflamatorio, y es el verdadero fármaco, pero es mucho más hidrófilo que el profármaco, tanto en su forma no cargada, como en las dos posibles formas cargadas, por lo que su forma más habitual de administrarlo, sobre todo para tratamientos intestinales, ha de ser como enema o como supositorio, mientras el profármaco puede utilizarse por vía oral. Por lo que hoy día se conoce, la Sulfapiridina **73** no parece actuar más que como un transportador de Mesalazina.

2.10. Cofármacos y fármacos siameses

La unión de dos fármacos, iguales o diferentes, en una misma molécula de forma que metabólicamente, se liberen los dos productos, está representado en el mercado español con un ejemplo muy clásico, Pirusudanol **74**, un doble ester que libera por hidrólisis, tanto Piridoxina **76** como Deanol **77**, un precursor de colina –y por tanto de acetilcolina– en el organismo. Aunque la información sobre el producto es antigua y limitada, parece que el producto se recomienda en el déficit cognitivo asociado con la vejez.^[29] Tal como se puede ver en el Esquema 18, por el valor de Clog P, el producto es muy hidrófilo, y tiene dos grupos básicos, especialmente la amina alifática terciaria, con lo cual, el producto no podrá absorberse excepto en zonas del intestino con pH claramente básico. La hidrólisis genera dos productos, de los cuales, por los datos existentes, pa-



Esquema 18. Pirisudanol **74** y sus componentes

rece que **77** es el verdadero principio activo. Este producto, Deanol **77**, es tan hidrófilo y tan básico, que estará ionizado y será de difícil absorción utilizado directamente. Por ello, es posible que el resto de Piridoxina **76**, aun siendo también un fármaco, actúe solo como parte del transportador.

CONCLUSIONES

La tecnología de profármacos unidos a transportador, se utiliza abundantemente, para sacar partido a fármacos que por sí solos muestran problemas de versos tipos en su uso clínico, tal como se indica en la Figura 2. No todos los productos recientes han llegado al mercado español, pero se producen nuevas incorporaciones cada año. De los otros tipos de profármacos citados se hablará en una segunda parte.

AGRADECIMIENTOS

Authors gratefully acknowledge Comunidad de Madrid (CAM, project B2017/BMD-3688 MULTI-TARGET&VIEW-CM) and Instituto de Salud Carlos III (FEDER funds, ISCIII RETIC REDINREN RD16/0009/0015 FEDER FUNDS) for financial support.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Union of Pure and Applied Chemistry. www.chem.qmul.ac.uk/iupac/medchem
- [2] (a) R.B. Silverman, Prodrugs and drug delivery systems, in: J. Hayhurst (Ed.), *The Organic Chemistry of Drug Design and Drug Action*, Elsevier Academic Press, San Diego, **2004**, pp. 497-544. (b) J. Rautio, *Prodrug Strategies and Drug Design, in Prodrugs and Targeted Delivery*, Wiley-VCH, Weinheim, **2011**, pp. 1-30. (c) G. L. Patrick, *An introduction to Medicinal Chemistry*, 6.^a ed., Oxford University Press, Oxford, **2017**, cap. 14. (d) Y. M. Choi-Sledeski, C. G. Wermuth "Designing Prodrugs and Bioprecursors" in *The Practice of Medicinal Chemistry*, C. G. Wermuth, D. Aldous, P. Raboisson, D. Rognan, eds., Academic Press, 4.^a ed., **2015**, pp. 657-692. (e) V. L. Campo, I. Carvalho, Prodrugs: principles, design and therapeutic application, *Curr. Methods Med. Chem. Biol. Phys.* **2008**, 2, 187-214. (f) J. Rautio, H. Kumpulainen, T. Heimbach, R. Oliyai, D. Oh, T. Järvinen, J. Savolainen, Prodrugs: design and clinical applications, *Nature Rev. Drug Disc.*

- 2008**, 7, 255-270. (g) V. Abet, F. Filace, J. Recio, J. Alvarez-Builla, C. Burgos, Prodrug approach: An overview of recent cases, *Eur. J. Med. Chem.* **2017**, 127, 810-827. (h) S. Cabrera, A. Diez-Torrubia, *Anales*, **2010**, 106, 207-214.
- [3] (a) J. Bronson, A. Black, M. Dhar, B. A. Ellsworth, J. R. Merritt, K. Peese, A. Pashine, "To market, to market -2014" *Med. Chem. Rev.* **2015**, 50, 461. (b) J. Bronson, K. Peese, M. Dhar, A. Pashine, F. J. Duclos, B. A. Ellsworth, R. Garcia, J. R. Merritt, "To market, to market-2015". *Med. Chem Rev.* **2016**, 51, 439. [c] C. A. Bolger, T. G. Murali Dhar, A. Pashine, P. S. Dragovich, W. Mallet, J. R. Merritt, K. M. Peese "To market, to market-2016". *Med. Chem. Rev.* **2017**, 52, 531.
- [4] (a) A. Albert, Chemical aspects of selective toxicity, *Nature* **1958**, 182, 421-423; [b] A. Albert, *Selective Toxicity with Special Reference to Chemotherapy*, John Wiley & Sons, New York, 1951.
- [5] B. Testa, Prodrugs: bridging pharmacodynamics / pharmacokinetic gaps, *Curr. Opin. Cell. Biol.* **2009**, 13, 338-344.
- [6] Consejo General de Colegios Oficiales de Farmacéuticos. Catálogo de Medicamentos 2016. Madrid 2017.
- [7] CpKa es el valor calculado de pKa para cualquier grupo funcional. Clog P es el valor calculado de log P, parámetro que expresa la hidrofobicidad de la molécula considerada. Clog D valor calculado de log D, parámetro que expresa la hidrofobicidad de la molécula en relación con el pH del medio. Una discusión sencilla para estos parámetros está en ref. 8. Para calcular la proporción de fármaco ionizado, en función de su pKa y del pH del medio, utilícese la ecuación de Hendersson-Hasselbach, ref. 2d, pag. 541. Dado que los valores experimentales no siempre están disponibles, se han utilizado valores calculados a partir de MarvinSketch 5.11.3.
- [8] E. H. Kerns, L. Di, *Drug-like Properties. Concepts, Structure, Design and Methods*. Elsevier. Amsterdam. 2008. Caps. 5 (hidrofobicidad) y 6 (acidez y basicidad).
- [9] V. Guarino, "The molecular design of Prodrugs by functional group" in ref 2b, **2011**, 31-57.
- [10] K. Boussey, F. M. Delpaire, J. Van de Voorde "Physiological Aspects Determining the Pharmacokinetic Properties of Drugs" in ref 2d, **2015**, 539-559.
- [11] (a) P. Minuz, G. Cavallini, G. P. Angelini, A. Lechi, G. Brocco, A. Riela, L. A. Scuro, G. Velo, *Pharmacol. Res. Commun.* **1984**, 16, 875-84. b) S. Pindado, O. I. Corriganh, C. M. O'Driscoll, *Anal. Profiles Drug Subs. Excip.* **1996**, 24, 1-43.
- [12] Ref. 2d, págs. 683-684.
- [13] A. J. Matheson, S. Noble, *Drugs* **2000**, 59, 829-835.
- [14] D. Das, G. Roy, G. Mughesh, *J. Med. Chem.* **2008**, 51, 7313-7317.
- [15] J. J. Hale, S. G. Mills, M. MacCoss, C. P. Dorn, P. E. Finke, R. J. Budhu, R. A. Reamer, S. W. Huskey, D. Luffer-Atlas, B. J. Dean, E. M. McGowan, W. P. Feeney, S. Lee Chiu, M. A. Cascieri, G. G. Chicchi, M. M. Kurtz, S. Sadowski, E. Ber, F. D. Tattersall, N. M. J. Rupniak, A. R. Williams, W. Rycroft, R. Hargreaves, J. M. Metzger, D. E. MacIntyre, *J. Med. Chem.* **2000**, 43, 1234-1241.
- [16] S. Hedge, M. Schmidt, "To Market, To Market-2008" in *Ann. Rep. Med. Chem.* **2009**, 44, 598-600.
- [17] S. Hedge, M. Schmidt "To Market, To Market-2007" in *Ann. Rep. Med. Chem.* **2008**, 43, 469-470.
- [18] (a) J. D. Strupczewski, D. B. Ellis, R. C. Allen "To Market, To Market-1990" in *Ann. Rep. Med. Chem.* **1991**, 26, 303. (b) G. H. Phillips *Resp. Med.* **1990**, 84, 19-23.

- [19] (a) U. Stache, W. Fritsch, H. Rupp, V. Hitzel, H. W. Fehlhaber, *Arzneimitt-Forsch.* **1985**, *35*, 1753-1757. (b) C. M. Spencer, A. J. Wagstaff, *Biodrugs*, **1998**, *9*, 61-86. A. K. Gupta, M. Chow. *Skin Ther. Lett.* **2004**, *9*, 5-6.
- [20] C. Boyer-Joubert, E. Lorthiois, F. Moreau "To Market, To Market-2002" in *Ann. Rep. Med. Chem.* **2003**, *38*, 363.
- [21] (a) M. Boreck, S. Charlap, W. Frishman, *Pharmacotherapy*, **1987**, *7*, 133-148 (b) D. P. Ip, G. S. Brenner, *Anal. Prof. Drug Subs.* **1987**, *16*, 207-243.
- [22] Ref. 6, pages 979-987.
- [23] L. A. Svensson, *Acta Pharm. Suec.* **1987**, *24*, 333-41.
- [24] (a) J. Yin, A. C. Collier, A. M. Barr, W. G. Honer, R. M. Procys-hyn, *J. Clin. Psychopharmacol.* **2015**, *35*, 447-449. (b) Y. N. Lamb, G. M. Keating, *Drugs*, **2015**, *76*, 1559-66.
- [25] K. Schönafinger, *Farmaco*, **1999**, *54*, 316-320.
- [26] (a) S. H. Kollins, *Curr. Med. Res. Opin.* **2008**, *24*, 1345-1357. (b) D. R. Coghill, B. Caballero, S. Sorooshian, R. Civil, *CNS Drugs*. **2014**, *28*, 497-511.
- [27] (a) Ref. 2d, pag. 688. (b) M. E. Gershwin, E. J. Goetzl, A. D. Steinberg, *Ann. Int. Med.* **1974**, *80*, 531-540. (c) G. Zon, "Cyclophosphamide analogs" in "Progress in Medicinal Chemistry" G. P. Ellis, G. P. West Eds. Elsevier, **1982**, pág. 205-246. d) R. B. Silverman "The Organic Chemistry of Drug Design and Drug Action" 2nd Ed. Elsevier, págs. 530-532.
- [28] (a) Ref. 2b, pág. 243. (b) M. A. Peppercorn, P. Goldman, *J. Pharm. Exp. Ther.* **1972**, *181*, 555-562.
- [29] J. E. Murphy, *J. Int. Med. Res.* **1981**, *9*, 330-337.



Reaxys RSEQ Early Career Researcher Awards

Apply for the Reaxys RSEQ Early Career Researcher Awards 2019

Who can apply?

This is the third year that the Spanish Royal Society of Chemistry (RSEQ) and Elsevier are jointly organizing the Reaxys RSEQ Early Career Researcher Award in Spain. The joint aim of the project is to increase the visibility of the work of early career researchers in chemistry as well as to support their career development.

If you are:

- A chemistry or medicinal chemistry researcher currently enrolled in a PhD programme OR who completed a PhD in 2018 or 2019
- A member of the RSEQ

We invite you to submit your essay around the topic:

What (innovative) research are you doing in any chemistry field and how can a scientific database like Reaxys or Reaxys Medicinal Chemistry help you achieve your goals?

The successful applications will receive:

- € 1000 - 1st Place
- € 800 - 2nd Place
- € 500 - 3rd Place

Learn More and apply:



<https://bit.ly/2UQ8Nt5>

Nitratos: ¿buenos o malos?

Francesc Lloret Pastor

Resumen: El artículo realiza una revisión sobre el papel biológico del nitrato y de sus dos derivados, el ion nitrito y el óxido nítrico. Se discute el carácter nocivo o beneficioso de los mismos.

Palabras clave: Nitratos, nitritos, óxido nítrico, óxido-nítrico-sintasa, dietética.

Abstract: This paper reviews the biological role of nitrate and its two derivatives, the nitrite anion and nitric oxide. The harmful or beneficial character of them is discussed.

Keywords: Nitrates, nitrites, nitric oxide, nitric oxide synthase, dietary.

*“Solo los necios discuten los hechos”
Vladimir Ilich Uliánov, alias Lenin*

INTRODUCCIÓN

Tóxico, contaminante, nocivo, cancerígeno..., son conceptos comúnmente asociados al ion nitrato (NO_3^-). La severa normativa que la Organización Mundial de la Salud (OMS) mantiene sobre los nitratos del agua, junto con la constante repetición sobre la nocividad de los mismos por los medios de comunicación, la toxicidad de los nitratos se ha convertido en una verdad fundamental, incuestionable y que el ciudadano percibe como un hecho científicamente probado. Son muchos los núcleos urbanos que están invirtiendo enormes sumas de dinero en disminuir la concentración de nitratos de sus aguas municipales por debajo del límite que marca la OMS. Los ciudadanos, en general, han cerrado los grifos de sus casas y han empezado a consumir agua embotellada; de hecho, ésta se ha convertido en un fructífero negocio (el “oro azul”). Desgraciadamente, este hábito reciente está contribuyendo a incrementar, de forma alarmante, la contaminación medioambiental por plásticos cuya degradación es muy lenta (unos 500 años de media). Solo en el año 2016, consumimos unos 500.000 millones de envases (unas 20.000 botellas por segundo). Si solo consumiésemos agua del

grifo, esta contaminación se reduciría enormemente. Sin embargo, esto no será factible mientras los nitratos sigan manteniendo esta mala reputación.

No siempre los nitratos fueron considerados nocivos, sino todo lo contrario. Los nitratos gozaban de muy buena reputación como remedios versátiles para la salud. Sus efectos terapéuticos y beneficiosos se remontan a la época medieval y, a lo largo de los siglos, conservaron su buena reputación hasta tal punto que, en el siglo XVIII, adquirieron pleno estatus como medicina.^[1] A mediados del siglo XX cayeron en desgracia debido a unos informes sobre casos de *metahemoglobinemia* (cianosis o síndrome de los bebés azules) observados en lactantes después de la ingestión de agua rica en nitratos.^[2] Su mala prensa continuó durante los siguientes años con la sospecha del carácter cancerígeno de las *nitrosaminas*, puesto que éstas podían formarse por reacción del nitrito (NO_2^-) con aminas.^[3] A raíz de estos hechos, la OMS reguló la concentración de nitratos en el agua (50 mg/L).^[4] En el transcurso de los últimos años se han publicado una serie de estudios científicos mostrando que, no solo ninguna de las acusaciones formuladas contra los nitratos tenían fundamento sino que, por el contrario, son beneficiosos para la salud.^[5] A finales de los años ochenta se descubrió que la molécula de óxido nítrico, NO, (uno de los metabolitos del nitrato) se formaba en el endotelio (la superficie interna de arterias y venas) y se encargaba de iniciar y activar toda la defensa del sistema cardiovascular.^[6] A partir de ese momento se inició la reivindicación del carácter beneficioso del nitrato olvidado desde hacía décadas.

Sin embargo, la prensa negativa de estos últimos años ha seguido amortiguando el entusiasmo por estos importantes descubrimientos. Cada vez hay más científicos que aconsejan a la OMS una revisión de la actual normativa



F. Lloret Pastor

Instituto de Ciencia Molecular
Universidad de Valencia
C/ Catedrático José Beltrán, 2
46980-Paterna (Valencia)
C-e: francisco.lloret@uv.es

Recibido: 29/11/2019. Aceptado: 31/05/2019.

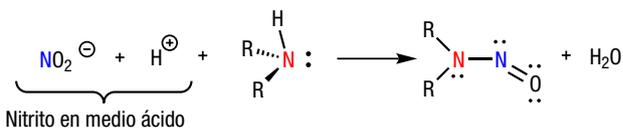
sobre el contenido de nitratos en el agua, la cual es demasiado severa, genera inquietud y conlleva enormes gastos y gran contaminación por plásticos sin ningún beneficio para la salud.^[1a] Ciertamente, existe una incongruencia entre los resultados científicos y las decisiones políticas.

En el presente artículo se revisa el papel biológico del nitrato a través de sus metabolitos, nitrito y óxido nítrico.^[7] Estas tres especies, nitrato-nitrito-óxido nítrico, se están transformando constantemente entre ellas, comportándose como una *Trinidad Bioquímica*. El nitrato es la especie estable y, por tanto, la que habitualmente encontramos en la tierra (generalmente como nitrato potásico o sódico) y que ingerimos con los alimentos, especialmente con los vegetales. Biológicamente, es inactivo e inocuo, sin embargo, una vez en nuestro cuerpo, nuestra flora bacteriana lo transforma parcialmente en nitrito y óxido nítrico, que son las especies biológicamente activas y esenciales para la vida.

HISTORIA DEL USO TERAPÉUTICO DEL NITRATO

Los efectos terapéuticos de los nitratos en el sistema cardiovascular se conocen desde la época medieval a través de la medicina china antigua.^[8] Hoy sabemos que las bacterias salivales reducen el nitrato a nitrito y éste se transforma en óxido nítrico, por lo que el beneficio cardiovascular se debe a este último. La medicina Salernitana, de gran reputación en el siglo XII, citaba al nitrato entre los fármacos más relevantes de la época. A lo largo de los siglos siguientes, el nitrato conservó su buena reputación hasta tal punto que, a partir del siglo XVII, adquirió pleno estatus como una medicina útil. Así apareció en *Pharmacopée Royale Galénique et Chymique*, de Moysse Charras (1676) y en el *Dictionnaire Universel des Drogues Simples*, de Nicolas Lémery (1733, 1.ª edición, 1687).^[1a] En el siglo XVIII, se convirtió en una panacea, un remedio para casi todo. Se prescribió como diurético y antiséptico urinario, así como en la retención de orina, enfermedades venéreas, antiinflamatorio, tisis, viruela, peste bubónica, fiebre aguda, etc. El diccionario *Abridged Dictionary of Medical Science* (1824) afirma que “pocas sales se usan más en la medicina que el nitrato de potasio”. Las dosis administradas en aquellos días podían ser enormes; tan altas como 60 g/día, aunque las concentraciones no debían de superar los 10 g/L, pues a altas concentraciones, el nitrato es corrosivo para el tracto digestivo. A pesar de las dosis utilizadas, se observaron muy pocos efectos secundarios, como náuseas o diarrea, los cuales desaparecían fácilmente sin mayor problema. Este hecho es especialmente relevante, puesto que contradice la creencia social actual sobre el carácter nocivo del nitrato.

Tras su cénit en el siglo XIX, tuvo una estrepitosa caída en el siglo XX, como consecuencia de unos informes del doctor Comly^[12] (1945) sobre casos de metahemoglobinemia observados en lactantes, después de la ingestión de biberones preparados con agua con altos contenidos en nitratos, y posteriormente con la sospecha del efecto carcinógeno de las nitrosaminas^[3] que se podían formar por reacción de los nitritos con aminas (Esquema 1). A raíz de estos hechos, la OMS reguló la concentración de nitratos



Esquema 1. Formación de nitrosoaminas

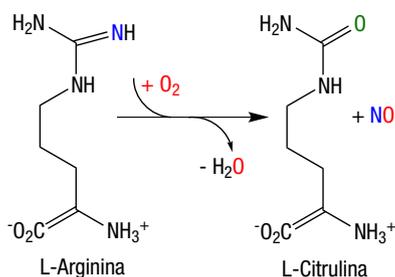
en el agua, así como la ingesta máxima permitida de los mismos.^[4]

El renacimiento y reivindicación del carácter beneficioso del nitrato reaparece con el descubrimiento del papel biológico del NO (uno de los metabolitos del nitrato) como una molécula de señalización en el sistema cardiovascular y que llevó, en 1998, a otorgar el premio Nobel de Medicina a sus descubridores.^[6]

Uso en la conservación de alimentos: El uso de los nitratos para conservar la carne se conoce desde hace más de 5.000 años. Sumerios, fenicios, griegos, romanos, indios y los antiguos chinos lo utilizaron.^[8,9] El mecanismo de la salazón comenzó a entenderse en 1891, cuando se observó la presencia de nitrito en la carne curada y se describió la conversión bacteriana del nitrato en nitrito, el cual actúa como bactericida impidiendo la proliferación bacteriana y el deterioro de los alimentos.^[10] La principal razón para utilizar tales aditivos es la necesidad de proteger a los consumidores contra la bacteria *Clostridium Botulinum*. Esta bacteria produce una toxina virulenta cuyos efectos pueden ser letales. Se ha demostrado el efecto antibacteriano del nitrito, no solo contra la *C. Botulinum*, sino contra otras muchas bacterias, incluyendo patógenos entéricos como *Salmonella* y *Escherichia Coli*.^[11] El mecanismo de la coloración roja de la carne por el nitrato se pudo entender más tarde, en 1914, cuando se observó la formación de nitrosilmioglobina (complejo de color rojo brillante) por coordinación del NO al grupo *hemo* de la mioglobina.^[10]

ÓXIDO NÍTRICO. EL FACTOR RELAJANTE DEL ENDOTELIO

En 1916, los estudios realizados por el bioquímico H. H. Mitchell pusieron de manifiesto que nuestro cuerpo producía nitrato, puesto que eliminábamos más del que ingeríamos. Incluso apuntó a la posibilidad de que los seres vivos producían óxido nítrico de forma natural.^[12] Sin embargo, la fuente endógena del nitrato fue un enigma durante mucho tiempo. En 1978, Furchgott (Universidad Estatal de Nueva York) observó que el endotelio, la capa unicelular que reviste el interior de las arterias (Figura 1a), producía una sustancia que permitía la relajación y dilatación de las arterias. Dicha sustancia se denominó factor relajante derivado del endotelio, EDRF (del inglés *endothelium-derived relaxing factor*). Estos resultados se publicaron en 1980, pasando el endotelio a jugar un papel fundamental en la regulación del cierre y apertura de los vasos sanguíneos.^[13] A partir de este descubrimiento, varios laboratorios se sumaron a la investigación de la especie química relacionada con el EDRF. La caracterización de dicha especie la realizaron, de forma independiente en 1987, los laboratorios de Louis Ignarro (Universidad de California, Los Ángeles)^[14]



Esquema 2. Obtención de NO a partir de L-Arginina

y de Salvador Moncada (Laboratorios Wellcome, Londres).^[15] La especie química en cuestión era el óxido nítrico (NO), ya sugerida 70 años atrás por H. H. Mitchell.^[12] Al año siguiente, Moncada y su grupo demostraron que el NO se producía en el endotelio a partir de la oxidación del aminoácido L-Arginina, catalizada por la enzima NO-sintasa (NOS, siglas del inglés Nitric Oxide Synthase), que se convierte en L-Citrulina y libera una molécula de NO (Esquema 2).^[15]

La comprensión de este mecanismo de acción se debe en gran parte a las aportaciones de Ferid Murad.^[16] En 1992 la prestigiosa revista Science consideró al NO la molécula del año y finalmente, en 1998 se concedió el Premio Nobel de Medicina y Fisiología a Robert Furchgott, Louis Ignarro y Ferid Murad, tres de los cuatro investigadores que descubrieron el papel cardiovascular del óxido nítrico. Quedó fuera Salvador Moncada, ya que el premio está limitado a un máximo de tres investigadores.^[17]

Síntesis Endógena de NO: El Mecanismo L-Arginina-NO-Sintasa. La vía de la L-arginina-NO-sintasa está bien definida.^[18] Las paredes de los vasos están formadas, esencialmente, por dos capas de células: el endotelio y otra capa más externa que forman el músculo liso (Figura 1a). Estas últimas tienen una gran capacidad para contraerse y relajarse, permitiendo un incremento del flujo sanguíneo sin aumentar excesivamente la presión arterial. El endotelio es muy sensible a estímulos bioquímicos, así como a estímulos mecánicos tales como un aumento de la presión arterial. Estos estímulos causan la liberación transitoria de Ca^{2+} de los almacenes intracelulares. El Ca^{2+} se une a la Calmodulina para formar el complejo Ca^{2+} -Calmodulina que activa a la NOS (ver Figura 1b). La NOS cataliza la síntesis de NO, mediante la oxidación del átomo de nitrógeno del grupo guanidina terminal de L-Arginina, que se transforma en L-Citrulina (Esquema 2).

El NO es una pequeña molécula lipofílica que atraviesa fácilmente la capa del endotelio y llega rápidamente al músculo liso, donde se acopla al grupo hemo de la proteína Guanilato ciclasa (GCs, Figura 1b). Ésta transforma la Guanosin-tri-fosfato (GTP) en Guanosin-mono-fosfato-cíclico (GMPc). Es este nucleótido cíclico el que posee propiedades vasodilatadoras al reducir el calcio citoplasmático.

Isoformas de la Enzima NO-sintasa (NOS). Hasta la fecha se han descrito tres isoformas de NOS, es decir, tres enzimas similares que sintetizan NO, pero en diferentes

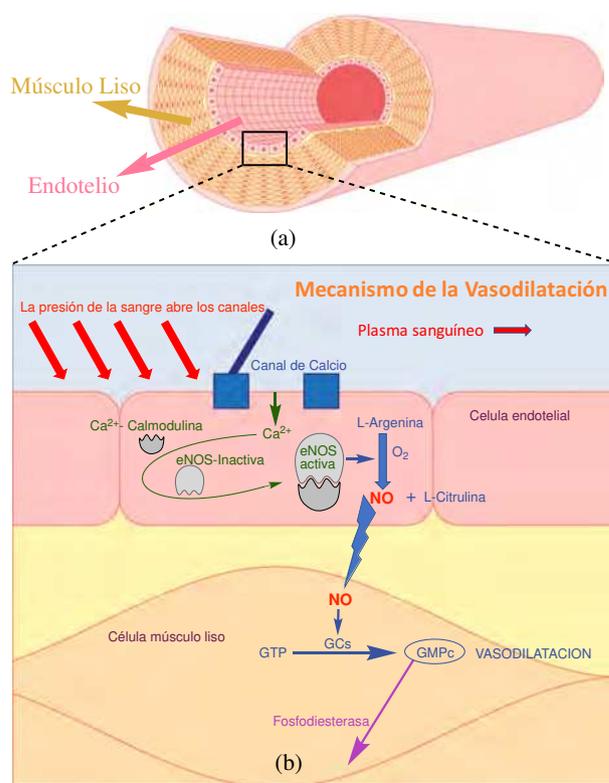


Figura 1. (a) Esquema de una arteria mostrando el músculo liso y la capa unicelular del endotelio. (b) Detalle de la parte interna de la arteria mostrando el mecanismo de la relajación arterial (ver texto)

tejidos y distintos objetivos.^[19] Comparten entre un 50-60% de homología secuencial. La NOS descrita anteriormente, que produce NO en el endotelio y permite la relajación arterial, se denomina endotelial (eNOS). Otra isoforma se localiza en las neuronas y se la conoce como neuronal (nNOS). El NO se desplaza rápidamente entre las células neuronales transmitiendo información. Recientemente, se han encontrado neuronas capaces de producir NO en el hipocampo, que es una región relacionada con el aprendizaje y la memoria. Se ha detectado la producción de NO en las áreas visual y olfativa, lo que destaca su importancia en la percepción sensorial. En el sistema nervioso, el NO actúa como neuromodulador, interviene tanto en la memoria y el aprendizaje, como en prevenir enfermedades como el Alzheimer y el Parkinson.^[20]

Hay una tercera isoforma que sintetiza NO cuando las células reciben un estímulo y se denomina inducible (iNOS). Produce NO en el sistema inmunitario y los macrófagos usan el NO producido contra los agentes extraños. La iNOS, a diferencia de eNOS y nNOS, no depende del calcio y es capaz de sintetizar mayores cantidades de NO, por períodos de tiempo prolongados, durante los procesos patológicos. Algunos investigadores han descrito una cuarta isoforma de la enzima NOS, cuya actividad se encuentra en las mitocondrias (mtNOS).^[21] Se tiene la sensación de que posiblemente casi todas las células tengan la capacidad de sintetizar NO.

SÍNTESIS EXÓGENA DE NO: EL MECANISMO SALIVAL

Tal como se indica en el Esquema 2, la vía *L*-Arginina-NOS requiere oxígeno para la producción de NO, por lo que su producción queda bloqueada en las regiones hipóxicas. Además, a medida que envejecemos, perdemos nuestra capacidad de sintetizar el NO por esta vía. A los 70-80 años ya hemos perdido un 75% de su producción, en comparación con jóvenes sanos de 20 años. Para suplir esta deficiencia, nuestro cuerpo ha generado una vía exógena basada en la ingesta de nitratos y su transformación en nitritos por la flora bacteriana bucal. El nitrato dietético está sujeto a una circulación gastro-intestinal-salival que exhibe el siguiente ciclo: alimentos → boca → esófago → estómago → intestino delgado → sangre → saliva → boca, etc. (Figura 2).

El nitrato salival se convierte parcialmente en nitrito en la boca gracias a las bacterias anaeróbicas bucales que habitan en las cavidades de la parte interior de la lengua. Éstas usan el nitrato como aceptor de electrones para generar adenosina trifosfato (ATP) en ausencia de oxígeno, transformándolo en nitrito.^[22] Esta reducción bacteriana es un bello ejemplo de simbiosis. Nosotros les damos el nitrato, un compuesto necesario para su respiración y, a cambio, ellas nos proporcionan nitrito, un sustrato necesario para la generación del NO gastro- y cardioprotector. El 25% del nitrato ingerido, después de su absorción desde el intestino delgado superior y su transporte por el plasma, pasa a las glándulas salivales y el 20% de dicho nitrato se reduce a nitrito en la boca. Por lo tanto, aproximadamente el 5% de la ingesta dietética de nitrato se transforma en nitrito salival.

Cuando la saliva rica en nitritos se encuentra con el ácido gástrico (pH 1-3), se forma NO, el cual es tóxico para una serie de enteropatógenos (efecto antibacteriano), incluyendo *Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia Coli* y *Helicobacter Pylori*.^[11] La mezcla nitrato-nitrito-óxido nítrico es absorbida por los intestinos de donde pasa al plasma sanguíneo. Aparte del medio ácido estomacal, existen otras vías en el organismo para la reducción del nitrito a NO, como son a través de la acción de la hemoglobina, mioglobina y antioxidantes como el ácido ascórbico o vitamina C (Esquema 3).^[23] Esta vía le confiere un carácter esencial al nitrato dietético como un sistema de reserva para la producción de NO, cuando el oxígeno se agota y la vía *L*-arginina-NO sintasa no es operativa. En condiciones hipóxicas o isquémicas, el nitrito es la principal fuente de NO.

Parte del nitrato-nitrito es almacenado por diferentes células y debajo de la piel. Alrededor de la mitad del nitrato ingerido se excreta con la orina. El resto del nitrato es dirigido a las glándulas salivales y con la saliva a la boca, donde son parcialmente reducidos a nitritos por las bacterias, completándose así el ciclo. La falta de producción de NO puede originar hipertensión, arterosclerosis, enfermedad arterial periférica, insuficiencia cardíaca y trombosis que puede provocar un ataque cardíaco y accidente cerebrovascular, la principal causa de muerte en el mundo occidental.^[24]

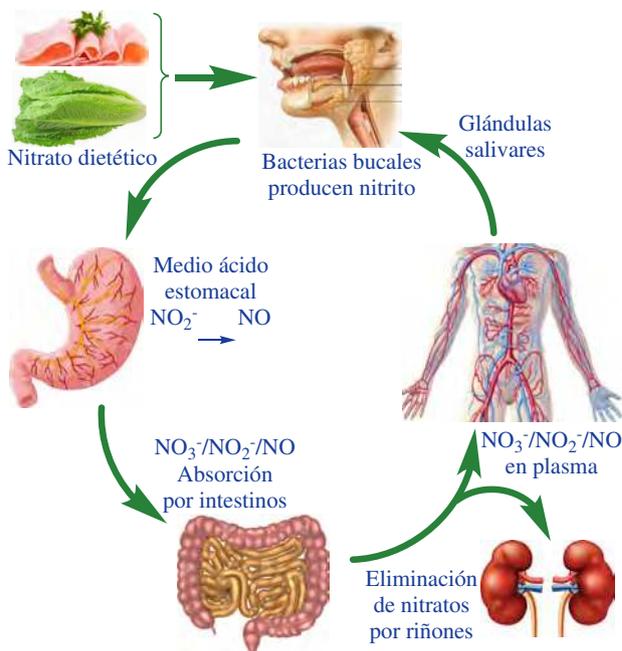


Figura 2. El mecanismo salival: Nitrato – Nitrito – óxido nítrico

Los niños menores de 6 meses carecen de una microflora oral reductora de nitratos, por lo que la concentración de nitrito en la saliva es muy baja. Curiosamente, la leche materna es rica en nitritos y nitratos y la proporción de estos aniones cambia en el tiempo. Al principio, en el calostro, la concentración de nitritos es muy alta (más de 10 veces la ingesta máxima de nitrito recomendada por la OMS) dado que el bebé aún no puede transformar el nitrato en nitrito. A partir del sexto mes (cuando el bebé ya tiene su flora bacteriana) la concentración de nitritos en la leche disminuye y aumenta la de nitratos.^[25]

El uso excesivo de enjuagues bucales antisépticos puede afectar a esta vía al eliminar las bacterias bucales. Además, el uso continuado de inhibidores de la bomba de protones (como Omeoprazol) puede disminuir la secreción ácida en el estómago, disminuyendo la eficacia en la transformación del nitrito a NO. Todo ello facilita las infecciones gastrointestinales.

Transporte de NO por la Hemoglobina. Recientemente, se ha observado que la hemoglobina (Hb), aparte de transportar dióxido de carbono y dióxígeno, también transporta óxido nítrico.^[26] La reacción del nitrito (almacenado en células) y el grupo *hemo* de la hemoglobina genera óxido nítrico, formándose la nitrosil-hemoglobina. Ésta, cuando se oxigena en los pulmones, desplaza al NO del grupo *hemo* hacia la cisteína β 93 (en la cadena β de Hb), donde se une covalentemente al azufre para formar S-nitrosohemoglobina (SNO-Hb), adquiriendo así un potencial carácter dilatador. Cuando los niveles de oxígeno en los tejidos son bajos y los microvasos presentan dificultad para la circulación, la hemoglobina libera el NO dilatando los microvasos y capilares en esa área para que pueda entrar más sangre y permitir la oxigenación. En este sentido, la sangre autorregula la oxigenación.

PROPIEDADES DEL ÓXIDO NÍTRICO

Reactividad y Movilidad (difusión y señalización). La molécula NO es pequeña, neutra y lipofílica, lo que le permite difundirse libremente a través de las membranas biológicas activando todas las células de su alrededor (molécula mensajera) y transmitiendo información de una célula a otra en pocos segundos. Cuando su trabajo ha terminado, es eliminado rápidamente, pasando a nitrito y nitrato. El NO como radical, reacciona fácilmente con otras moléculas radicales, tales como el dióxígeno (O_2), superóxido (O_2^-) o metaloenzimas. El NO tiene una vida media de solo unos pocos milisegundos cuando está en estrecho contacto con otros bio-reactantes como hemoglobina. Sin embargo, en la zona libre de glóbulos rojos, cercana a la superficie endotelial, la vida bioquímica del NO puede llegar a 100-500 segundos. La mayoría del NO que no se difunde a través de las membranas biológicas para activar la GMPc, es eliminado mediante reacción con el oxígeno, la hemoglobina u la oxihemoglobina. El NO es oxidado por la oxihemoglobina para formar nitrato y metahemoglobina (Fe^{III}), mientras que la reacción con hemoglobina da como resultado la formación de nitrosil-hemoglobina. El NO también reacciona rápidamente con el superóxido (O_2^-) para formar peroxinitrito ($ONOO^-$), una especie altamente reactiva y que usa el sistema inmune para eliminar patógenos.^[27]

Efecto Vasodilatador y Ejercicio Físico. Cada vez son más los deportistas que toman aminoácido *L*-Arginina (precursor natural de NO) o concentrados ricos en nitratos, tales como zumo de remolacha (un vaso de zumo puede contener unos 400 mg de nitratos), para mejorar la circulación sanguínea y la oxigenación, así como evitar disfunciones cardiovasculares por agotamiento. La ingesta de nitratos no solo reduce la presión arterial, sino también el consumo de O_2 durante el ejercicio físico, disminuyendo así el agotamiento.^[28] Ello ocurre sin aumento concomitante del lactato plasmático, lo que sugiere que la producción de energía es mucho más eficiente. Estudios recientes demuestran claramente que, la ingestión de alimentos ricos en nitratos, mejoran el rendimiento del ejercicio físico, por lo que una dieta con altos contenidos de nitratos es una estrategia factible para mejorar el rendimiento físico de alta o moderada intensidad.^[29]

Carácter Inmunitario. En el sistema inmunitario, los macrófagos producen NO en abundancia, mediante la iNOS, y lo usan como gas bélico contra los microorganismos invasores. En algunas ocasiones lo mezclan con el anión superóxido para producir peróxinitrito que es mucho más reactivo y letal.^[27] Como en cualquier combate, existen efectos colaterales. Por ejemplo, en caso de una infección generalizada, la producción de NO puede ser tan elevada que llega a dilatar los vasos sanguíneos de tal forma que la tensión arterial baja bruscamente y el paciente queda inconsciente. Ésta puede ser la primera indicación de un choque séptico que puede ser mortal. Uno de los síntomas más irritantes de la tosferina es la propia tos, que está originada por una producción excesiva de NO en la tráquea. Es bastante común que los lactantes con diarrea aguda (gastroenteritis) presenten también episodios de

metahemoglobinemia debido a que la gran formación de NO generado por el sistema inmune se transforma en nitrito, el cual oxida a la hemoglobina.

Carácter Dermoprotector. En 1996, se observó que una parte de los nitratos (endógenos o exógenos) queda almacenada debajo de la piel, donde van produciendo continuamente pequeñas cantidades de NO, que sale por los poros, e iones nitrito, que salen con el sudor.^[30] Nuestro cuerpo usa este mecanismo para eliminar bacterias patógenas, evitando infecciones de la piel y estimulando la cicatrización de heridas. Los rayos UVA de la luz solar facilitan la producción de NO mediante la fotodescomposición de los nitratos almacenados. Por eso, tomar el sol es relajante y baja la tensión arterial, siendo beneficioso contra la hipertensión y los problemas cardiovasculares en general. Ésta es una de las más importantes razones por la que los países con mucho sol tienen menos enfermedades cardiovasculares. Los nitratos almacenados también se usan para asegurar un continuo aporte de NO y/o nitritos a la circulación sistémica para ejercer como vasodilatador coronario y cardioprotector.

Las dos Caras del Óxido Nítrico: Dr. Jekyll y Mr. Hyde. El descubrimiento del papel esencial del óxido nítrico en el sistema cardiovascular y su carácter beneficioso para la salud fue una enorme sorpresa, puesto que el NO era, y sigue siendo, uno de los gases responsables de la contaminación medioambiental. Su producción en los motores de combustión y posterior oxidación a NO_2 , lo convierte en uno de los contaminantes más peligrosos del aire, generador de la lluvia ácida, colaborador, junto el CO_2 y CH_4 , del efecto invernadero y destructor de la capa de ozono. Éstas son las dos sorprendentes facetas de esta pequeña molécula: enormemente beneficiosa en interior de nuestro cuerpo y altamente nociva fuera de él.

NITRATOS ORGÁNICOS: NITROGLICERINA

El uso médico de fármacos precursores de NO se remonta a más de un siglo, cuando en 1867 Thomas Lauder Brunton observó que al inhalar nitrito de amilo (3-metilbutilnitrito) durante una crisis dolorosa de angina de pecho causaba una rápida disminución de los síntomas, sugiriendo una posible dilatación de los vasos sanguíneos. El nitrito de amilo es un líquido volátil que hierve a 98 °C. Quienes tenían el riesgo de padecer una angina de pecho solían llevar una pequeña ampolla de cristal con nitrito de amilo, de modo que podían romperla en un pañuelo y respirar el vapor para notar alivio.

La nitroglicerina es una sustancia altamente explosiva, sintetizada por Ascanio Sobrero en 1846, quien observó que, el contacto con este compuesto producía un violento dolor de cabeza, de forma análoga al nitrito de amilo. Alfred Nobel padecía dolores de cabeza cuando iba a trabajar a su fábrica en Suecia, donde se usaba la nitroglicerina para la preparación de dinamita. Algunos de sus empleados, que sufrían problemas cardíacos, observaron que los dolores cardíacos desaparecían cuando estaban trabajando. Cuando midieron su tensión arterial encontraron que

era muy baja y la razón era que absorbían suficiente nitroglicerina a través de los pulmones y de la piel para que la sustancia produjera esos efectos vasodilatadores. Otros explosivos, como trinitrotolueno (TNT) o nitrocelulosa, causaban efectos similares. Durante la Primera Guerra Mundial, los médicos notaron estos efectos en las mujeres que preparaban proyectiles con estos explosivos. Sufrían mareos y tenían una tensión arterial muy baja. En algunos casos llegó a causarles la muerte.

En 1879, William Murrell, introdujo la nitroglicerina sublingual para suprimir la angina de pecho. Incluso Nobel fue tratado con ella cuando enfermó. En 2002 Louis J. Ignarro desveló el mecanismo vasodilatador de la nitroglicerina, en el cual la enzima aldehído-deshidrogenasa mitocondrial es la responsable de la liberación de NO de la nitroglicerina.^[31] Si bien la nitroglicerina fue el primer nitrato orgánico sintetizado, actualmente existen varios nitratos orgánicos, siendo el Mononitrato de Isosorbida uno de última generación.

DISFUNCIÓN ERÉCTIL: VIAGRA

Cuando el hombre se hace mayor, la producción de NO puede ser deficitaria y su deseo de llevar a cabo el acto sexual puede verse frustrado por un miembro viril poco entusiasta. Sufren lo que técnicamente se denomina disfunción eréctil, y es entonces cuando buscan la ayuda de Viagra.^[32] Viagra es el nombre comercial del citrato de Sildenafil, descubierto a finales de los años ochenta.^[32] Posteriormente, han aparecido otros fármacos competidores, como el Tadalafilo y el Vardenafilo. Todos ellos actúan de forma similar. Bajo una estimulación erótica, el cerebro envía una señal a los nervios de los cuerpos cavernosos (una estructura esponjosa del pene formada por tejido eréctil) para que liberen óxido nítrico, el cual activa la producción de GMPc, que dilata el tejido eréctil, aumenta el flujo de sangre y produce la erección. Mientras tanto, otra enzima llamada fosfodiesterasa-5 elimina GMPc, aunque a una velocidad que no le permite competir con la cantidad de NO y de GMPc presente. Sin embargo, a medida que el hombre envejece, la producción de NO es insuficiente para contrarrestar el efecto neutralizante de la fosfodiesterasa-5, y el resultado es la impotencia. El papel de Viagra es bloquear la fosfodiesterasa-5, permitiendo aumentar la concentración de GMPc y la consiguiente dilatación. Curiosamente, Viagra tiene el tamaño y forma molecular justa para encajar en el centro activo de la fosfodiesterasa-5, pero no encaja con otras fosfodiesterasas, como la del músculo cardíaco (fosfodiesterasa-3). Sin embargo, sí puede bloquear a otras fosfodiesterasas-5 de otras regiones del cuerpo (efectos secundarios), como la del cerebro (dilata los vasos y produce los típicos mareos) o la de la retina, donde produce una alteración de la visión de color azulado. No todos los efectos secundarios de Viagra son negativos; de hecho, han sido muy positivos en lo que se refiere a los rinocerontes y las focas macho de Groenlandia. El rinoceronte africano estaba amenazado de extinción, porque la medicina china creía que el cuerno era muy eficaz en la cura de la impoten-

cia. Por la misma razón, los machos foca de Groenlandia también eran masacrados para conseguir una parte de su cuerpo: el pene. Ahora, la mayoría de estos consumidores toman Viagra.

REGULACIÓN DE LOS NITRATOS DEL AGUA

En la segunda mitad del siglo xx se desató una polémica sobre el posible carácter tóxico de los nitratos a raíz de unos informes del Dr. Hunter H. Comly^[2a] (1945) sobre casos de metahemoglobinemia (cianosis o síndrome de los bebés azules) observados en lactantes después de la ingestión de biberones preparados con agua rica en nitratos (unos 250 mg/L). Este documento tuvo un gran impacto y en los años siguientes se publicaron casos similares en Estados Unidos y Europa.^[2] Unos años más tarde, en 1956, se informó sobre el carácter cancerígeno de algunas nitrosoaminas y la posibilidad de que éstas se pudiesen formar a partir del nitrito.^[3] A raíz de estos informes, en 1961, la FAO (Organización Mundial de Agricultura y Alimentos) y la OMS establecieron un valor máximo para el contenido de nitrato en el agua (50 mg/L),^[4] así como los valores para la ingesta máxima diaria permitida de nitratos y nitritos (3,65 mg/Kg de masa corporal para el nitrato y de 0,065 mg/Kg para el nitrito).^[4b] Estos valores, excesivamente bajos y totalmente arbitrarios, fueron muy criticados por científicos de la época, puesto que no existía ninguna base científica o epidemiológica que corroborase tal normativa. Incluso actualmente, resulta sumamente difícil, si no imposible, hallar en la literatura científica los datos epidemiológicos sobre los cuales basar esta normativa o encontrar estudios que hayan determinado, de forma no ambigua, un umbral de toxicidad para el ser humano.

Metahemoglobinemia por Nitratos. El ion nitrito oxida a la hemoglobina (Fe^{2+}) a metahemoglobina (Fe^{3+}) impidiendo su uso para el transporte de oxígeno, por lo que excesos de nitrito pueden provocar metahemoglobinemia. La oxidación de la hemoglobina a metahemoglobina tiene lugar continuamente en los glóbulos rojos. Sin embargo, los potentes sistemas enzimáticos, conocidos como metahemoglobina-reductasa, reducen la metahemoglobina a hemoglobina.^[1a] En lactantes (menores de 6 meses), la metahemoglobina-reductasa no ha alcanzado todavía su actividad completa (un 50% más baja), por lo que son mucho más susceptibles a la metahemoglobinemia.^[3-4]

En todos los casos de metahemoglobinemia en lactantes descritos, tanto por Comly, como por otros investigadores, el agua provenía de pozos muy poco higiénicos, que se encontraban en corrales de granjas, cerca de letrinas y de excrementos de animales. La concentración de nitratos superaba los 250 mg/L.^[1a,9] Sin embargo, no fueron los nitratos los responsables directos de la metahemoglobinemia, sino la reducción del nitrato a nitrito en los biberones debido a la contaminación bacteriana asociada a las malas condiciones de los pozos y a la leche que proporcionaba la sustancia ideal para su proliferación. De hecho, la metahemoglobinemia infantil, atribuida al nitrato del agua, ha desaparecido totalmente con la cloración del agua. Esto

lleva a la conclusión de que el agua potable municipal, donde se controla la contaminación microbiana, es segura para la salud y no existen casos de metahemoglobinemia por uso del agua potable municipal, independientemente de su contenido en nitratos.

La dosis fatal de nitrito debido a metahemoglobinemia está en el intervalo de 22-23 mg/Kg de masa corporal. Por lo tanto, solo concentraciones extremadamente altas de nitrito pueden causar metahemoglobinemia grave. No obstante, los casos de metahemoglobinemia inducida por ingesta de purés de zanahoria o espinacas son bien conocidos. Un puré de 500 g de zanahorias proporciona un promedio 300 mg NO₃⁻, en el caso de las espinacas es 12 veces mayor. La metahemoglobinemia aparece por la formación de nitritos en el puré por la presencia de bacterias, las cuales aparecen por el mal estado de conservación de los vegetales, así como por guardar los purés a temperatura ambiente de un día para otro y a que los azúcares del puré proporcionan un caldo de cultivo ideal. Cuando el oxígeno se agota, las bacterias usan sus enzimas nitrato-reductasa para transformar el nitrato en nitrito. Este mecanismo puede producir cantidades significativas de nitrito.

Nitratos, Nitritos, Nitrosoaminas y Cáncer. En 1956, los científicos británicos J. Barnes y P. Magee informaron que la dimetilnitrosamina producía tumores de hígado en ratas.^[36a] Se emprendió la investigación y alrededor del 90% de nitrosaminas fueron consideradas cancerígenas.^[36b] El hecho de que las nitrosoaminas se forman mediante reacción del nitrito con aminas, inició el debate sobre la posible relación nitrato-nitrito-nitrosaminas-cáncer.^[36c] El nitrito es reactivo en condiciones ácidas y en principio, en el medio ácido estomacal, podría reaccionar con aminas para formar nitrosocompuestos (Esquema 1). La OMS pensó que esta nueva causa de cáncer podría ser controlada si se controlaban los nitritos y nitratos. Desde entonces, se han realizado numerosos y diversos estudios epidemiológicos, los cuales fueron evaluados en Europa por el Comité Científico para la Alimentación (EU, 1995) y en Estados Unidos por el Subcomité de Nitrato y Nitrito en Agua Potable (NRC, 1995). Ambos comités llegaron a la conclusión de que, en general, no se podía demostrar una asociación directa entre la exposición exógena al nitrato y la carcinogénesis humana. En su documento *Opinion on Nitrate and Nitrite*, indica: «Los estudios epidemiológicos realizados hasta la fecha no han conseguido aportar pruebas de una

asociación causal entre la exposición a los nitratos y el riesgo de cáncer en seres humanos».^[35]

Si se les tiene miedo a los nitratos será mejor abstenerse de comer lechugas, espinacas, acelgas, remolacha roja, rábanos..., que pueden llegar a contener hasta 5.000 mg/Kg de nitratos. En la Tabla 1 se indica el contenido máximo de nitratos permitido por la OMS para diferentes vegetales de consumo habitual.^[36,37]

A la vista de estos contenidos, y aplicando la ingesta máxima permitida por la OMS, se deberían retirar del mercado casi todas las verduras. Una dieta vegetariana debería considerarse suicida. Al comer nuestro plato de ensalada estamos ingiriendo tantos nitratos como los que se hallan en más de 10 litros de agua pretendidamente contaminada.

A la vista de la Tabla 1, es obvio que nuestra ingesta de nitratos se debe principalmente al consumo de vegetales (80%) y bastante menos al agua (menos del 10%). En este sentido, si fuese cierta la relación entre nitrato y cáncer, tendríamos que admitir que las verduras y hortalizas son la principal fuente de riesgo de cáncer para la mayoría de la población. Sin embargo, los estudios demuestran todo lo contrario y que las dietas ricas en vegetales han demostrado consistentemente reducir el riesgo de cáncer. Esta aparente contradicción crea una gran confusión. Por una parte, se mantiene una exagerada precaución sobre los nitratos del agua y por otra, se recomienda encarecidamente el consumo de vegetales. Esta aparente contradicción se puede entender teniendo en cuenta la existencia de antioxidantes (vitaminas C y E, polifenoles, flavonoides, ...) en los vegetales, los cuales son inhibidores muy potentes de las reacciones de nitrosación (Esquema 1), puesto que eliminan el nitrito transformándolo en NO (Esquema 3).^[38]

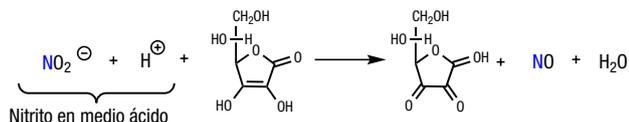
La limitación de nitratos en el agua por la OMS también contrasta con la regulación del uso de nitratos y nitritos en la conservación de alimentos. En la Tabla 2 se indica la cantidad máxima de nitratos y nitritos que deben añadirse al producto alimenticio, así como la dosis residual máxima que debe contener dicho producto, una vez preparado y dispuesto para el consumo.^[39]

Curiosamente, unos 100 g de jamón superan la ingesta diaria máxima de nitrito permitida por la OMS para una persona de 70 Kg (0,065 mg/Kg de masa corporal) mientras que 100 g de beicon curado la cuadruplica. Recientemente, para evitar la formación de nitrososaminas en las

Tabla 1. Legislación de la Unión Europea sobre contenido máximo de nitratos en algunos vegetales (expresado como NO₃⁻ en mg/Kg de producto fresco)^[37a]

Producto	Contenido
Rúcula (<i>Eruca Sativa</i> , <i>Diplotaxis sp.</i> , <i>Brassica Tenuifolia</i> , <i>Sysimbrium Tenuifolium</i>)	7.000
Lechuga fresca (<i>Lactua Sativa L.</i>) cultivada en invernadero	5.000
Lechuga fresca (<i>Lactua Sativa L.</i>) cultivada al aire libre*	4.000
Lechuga del tipo Iceberg cultivada en invernadero	2.500
Lechuga del tipo Iceberg cultivada al aire libre*	2.000
Espinacas frescas (<i>Spinacia Oleracea</i>)	3.500
Espinacas en conserva, ultracongeladas o congeladas	2.000

* La exposición al sol disminuye el contenido de nitratos debido a su fotodescomposición a NO.



Esquema 3. Reacción del nitrito con el ácido ascórbico (Vitamina C)

conservas, embutidos, carnes curadas..., se adiciona ácido ascórbico (E-300) junto con los nitritos y nitratos (Esquema 3). No obstante, hay que tener presente que la formación de nitrosoaminas se ve favorecida a altas temperaturas, por lo que pueden formarse en asados, barbacoas...

Tabla 2. Cantidades límites (expresadas como NaNO₃ o NaNO₂ en mg/Kg) para los nitratos y nitritos establecidos en la legislación europea (EFSA, *Journal* 2003, 14, 11-31; www.efsa.eu.int)

Aditivo	Denominación	Tipos de productos	Cantidad añadida	Cantidad residual*
E249	Nitrito potásico	Productos cárnicos desecados	150	50
E250	Nitrito sódico	Productos cárnicos curados o enlatados	150	100
E250	Nitrito sódico	Beicon curado		175
E251	Nitrato sódico	Productos cárnicos curados o enlatados	300	250
E252	Nitrato potásico	Quesos y sucedáneos lácticos		50
E252	Nitrato potásico	Pescados escabechados		200

* Cantidad residual al punto de venta del consumidor final.

CONCLUSIONES

Las diversas recomendaciones, normas, reglamentos y leyes vigentes que regulan el uso y la exposición humana al nitrato están respaldadas por informes de peso publicados por órganos y autoridades de reconocido prestigio. Sin embargo, cuando examinamos el fundamento científico de esta legislación, nos encontramos con importantes contradicciones entre estas normas y los recientes estudios científicos. La realidad es que son innegables los beneficios del nitrato para la salud, mientras que hay una importante incertidumbre y duda respecto a sus posibles efectos tóxicos, dentro de los límites de una ingesta o nutrición razonable. Puede ser el momento de reconsiderar las vigentes directrices reglamentarias para las fuentes dietéticas de nitritos y nitratos, especialmente para el agua de consumo, las cuales están obligando a invertir enormes cantidades de dinero para rebajar su contenido en nitratos, así como incitar al consumo de agua embotellada con el consiguiente incremento de contaminación ambiental por plásticos y todo ello sin aportar beneficio alguno para la salud pública.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] a) J. L'Hirondel y J.-L. L'Hirondel en "Nitrate and Man. Toxic, Harmless or Beneficial?". Edited by J. L'Hirondel and J.-L. L'Hirondel, CABI Publishing, **2002**. b) E. F. Binkerd, O. E. Kolari, *Food and Cosmetics Toxicology*, **1975**, 13, 655-661.
- [2] a) H. H. Comly, *JAMA*, 1945, 129, 112-116. b) W.E. Donohoe, *Paediatrics*, **1949**, 3, 308-311. c) H. I. Lecks, *Am. J. Dis. Child*, **1950**, 79, 117-123.
- [3] a) P. N. Magee, J. M. Barnes, *British Journal of Cancer*, **1956**, 10, 114. b) J. M. Barnes, *Essays Toxicol.* **1974**, 5, 1-15.
- [4] World Health Organization WHO. Guidelines for drinking-water quality (4th ed.) Geneva, **2011**.
- [5] a) R. T. Rana, S. Chopra, G. Rakhra, S. N. Singh. *IJPSR* **2018**, 9, 5. b) N. S. Bryan, *Functional Foods in Health and Disease* **2016**, 6, 691-701. c) C. P. Bondonno, L. C. Blekkenhorst, A. H. Liu, N. P. Bondonno, N. C. Ward, K. D. Croft, J. M. Hodgson. *Mol. Aspects Med.* **2018**, 61, 83-91. c) J. L. L'Hirondel, *Med. Sci. (Paris)*, **1998**, 14, 636-9.
- [6] D. E. Koshland Jr., *Science* **1992**, 258, 1861.
- [7] a) "Nitric Oxide: Biology and Pathobiology". Edited by Louis J. Ignarro and Bruce A. Freeman, Academic Press. Elsevier. **2017**. b) J. S. Stamler, D. J. Singel, J. Loscalzo, *Science*, **1992**, 258, 1898-1902. c) J. O. Lundberg, E. Weitzberg, M. T. Gladwin, *Nat. Rev. Drug Discov.*, **2008**, 7, 156-167.
- [8] J. O. Lundberg, E. Weitzberg, M. T. Gladwin, *Nature Reviews*, **2008**, 7, 156-167.
- [9] N. S. Bryan, Ph.D. J. Loscalzo, Editores, *Nitrite and Nitrate in Human Health and Disease*. Springer, New York, **2011**.
- [10] J. S. Haldane, *J. Hygiene*, **1901**, 1, 115-122. b) B. R. Pegg, F. Shahidi, *Food Chem.* **2000**, 56, 105-110.
- [11] C. D. Kocha, M. T. Gladwin, B. A. Freeman, J. O. Lundberg, E. Weitzberg, A. Morrisa, *Free Radical Biology and Medicine* **2017**, 105, 48-67.
- [12] H. H. Mitchell, H. A. Shonle, H. S. Grindlay, *J. Biol. Chem.* **1916**, 24, 461-490.
- [13] a) R. F. Furchgott, S. Bhadrakom, *J. Pharmacol. Exp. Ther.* **1953**, 108, 129-143. b) R. F. Furchgott, J. V. Zawadzki, *Nature*, **1980**, 288, 373-376. c) R. F. Furchgott, *Bioscience Reports*, **1999**, 19, 235-251.
- [14] a) L. J. Ignarro *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **1987**, 84, 9265-9269. b) L. J. Ignarro, C. A. Gruetter, *Biochim. Biophys. Acta* **1980**, 631, 221-231. c) L. J. Ignarro, H. Lippton, J. C. Edwards, W. H. Baricos, A. L. Hyman, P. J. Kadowitz, C. A. Gruetter, *J. Pharmacol. Exp. Ther.* **1981**, 218, 739-749. d) R. F. Furchgott, *Bioscience Reports*, **1999**, 19, 235-251.
- [15] S. Moncada, R. M. J. Palmer, A. Higgs, *Pharmacol. Rev.*, **1991**, 43, 109-142.
- [16] C. K. Mittal, W. P. Arnold, F. Murad, *J. Biol. Chem.* **1978**, 253, 1266-1271.
- [17] En 1990 se le concedió a Salvador Moncada el premio Príncipe de Asturias. b) J. R. Berrazueta, *Revista Española de Cardiología*, **1999**, 52, 221-226.
- [18] A. de Mel, F. Murad, A. M. Seifalian, *Chem. Rev.* **2011**, 111, 5742-5767.
- [19] a) X. Shu, T. C. S. Keller, D. Begandt, J. T. Butcher, L. Biber, A. S. Keller, L. Columbus, B. E. Isakson, *Cell. Mol. Life Sci.* **2015**,

- 72, 4561-4575. b) U. Forstermann, W. C. Sessa, *Eur. Heart J.*, **2012**, *33*, 829-837.
- [20] a) J. Garthwaite, *Trends. Neurosci.* **1995**, *18*, 51-52. b) J. L. Dinerman, T. M. Dawson, M. J. Schell, A. Snowman, S. H. Snyder, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **1994**, *91*, 4214-4218.
- [21] Z. Lacza, E. Pankotai, D. W. Busija, *Front. Biosci.*, **2009**, *14*, 4436-4443.
- [22] a) M. C. Burleigha, L. Liddlea, C. Monaghana, D. J. Muggedridgeb, N. Sculthorpea, J. P. Butcherce, F. L. Henriquezc, J. D. Allend, C. Eastona, *Free Radical Biology and Medicine* **2018**, *120*, 80-88. b) C. D. Kocha, M. T. Gladwina, B. A. Freeman, J. O. Lundbergd, E. Weitzbergd, A. Morrisa. *Free Radical Biology and Medicine* **2017**, *105*, 48-67.
- [23] a) G. M. McKnight, L. M. Smith, R. S. Drummond, C. W. Duncan, M. Golden, *Gut.* **1997**, *40*, 211-214. b) N. Benjamin, F. O'Driscoll, H. Dougall, C. Duncan, L. Smith, M. Golden, *Nature*, **1994**, *368*, 502.
- [24] C. P. Bondonno, K. D. Croft, J. M. Hodgson, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **2016**, *56*, 2036-2052.
- [25] N. G. Hord, J. S. Ghannam, H. K. Garg, P. D. Berens, N. S. Bryan, *Breastfeeding Medicine* **2011**, *6*, 393-399.
- [26] a) A. C. Straub, A.W. Lohman, M. Billaud, S. R. Johnstone, S. T. Dwyer, *Nature* **2012**, *491*, 473-477. b) C. Helms, D. B. Kim-Shapiro, *Free Radic. Biol. Med.* **2013**, *61*, 464-472.
- [27] a) L. Virag, E. Szabo, P. Gergely, C. Szabo; *Toxicol. Lett.* **2003**; *140*, 113-24. b) P. Pacher, J. S. Beckman, L. Liaudet, *Physiological Reviews* **2007**, *87*, 315-424.
- [28] a) A. M. Jones, *Sports Med.* **2014**, *44*, S35-S45. b) W. T. Clements, S. R. Lee, R. J. Bloomer; *Nutrients*, **2014**, *6*, 5224-5264.
- [29] a) S. Porcelli *et al.*, *Nutrients* **2016**, *8*, 534. b) M. N. Woessner, L. C. McIlvenna, J. Ortiz de Zevallos, C. J. Neil, X. J. D. Allen, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* **2018**, *314*, H195-H212.
- [30] N. C. V. Suschek, C. Opländer, E. E. van Faassen, *Nitric Oxide* **2010**, *22*, 120-135.
- [31] L. J. Ignarro, *Proc. Natl. Acad. Sc.* **2002**, *99*, 7816-7817.
- [32] John Emsley en "Vanidad, Vitalidad, Virilidad. La química mejora nuestra calidad de vida". Espasa Calpe, S. A. 2005.
- [33] a) M. Boolell, M. J. Allen, S. A. Ballard, S. Gepi-Attee, G. J. Muirhead, A. M. Naylor, I. H. Osterloh, C. Gingell, *Int. J. Impot. Res.* **1996**, *8*, 47-52. b) M. Boolell, S. Gepi-Attee, C. Gingell, M. J. Allen, *Br. J. Urol.* **1996**, *78*, 257-261.
- [34] A. Nilsson, *et al.*, *Br J Anaesth*, 1990, *64*, 72-6.
- [35] *Nitrate and Nitrite in Drinking Water*. National Research Council (US) Subcommittee. Washington (DC): National Academies Press (US); **1995**.
- [36] a) H. Gorenjak, A. Cencič, *Acta Alimentaria*, **2013**, *42*, 158-172. b) C. P. Bondonno, L. C. Blekenhorst, A. H. Liu, *Molecular Aspects of Medicine*, **2018**, *61*, 83-91.
- [37] a) Reglamento (UE) n° 1258/2011 de la Comisión de 2 de diciembre de 2011 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios (Anexo, Sección I: Nitratos); *Diario Oficial de la Unión Europea* L320/15 (3.12.2011). b) *WHO Food Additives Series* 50, **2003**. c) R. T. Rana, S. Chopra, G. Rakhra, S. N. Singh, *IJPSR*, **2018**, *9*, 1737-1744. d) *Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases*. WHO Technical Report Series, Geneva, 2003. e) WHO guidelines for drinking-water quality (4th ed.), Geneva, 2011.
- [38] a) S. S. Mirvish, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **1975**, *258*, 175-180. b) S. S. Mirvish, *Eur. J. Cancer Prev.*, **1996**, *5*, 131-6. c) J. A. Lovegrove, A. Stainer, D. A. Hobbs. *Proceedings of the Nutrition Society*, **2017**, *76*, 83-95.
- [39] *BOE*, núm. 221, de 14 de septiembre de 2007, págs. 37533 a 37544.



Hacia la igualdad de género en la historia del sistema periódico

Ana Isabel Morales López

Resumen: Este estudio revisa los hitos más significativos en la historia del sistema periódico, poniendo especial énfasis en las aportaciones que realizaron las mujeres en la búsqueda y el estudio de nuevos elementos químicos. Además, propone utilizar la historia del único elemento con nombre de mujer real, el meitnerio, como una herramienta didáctica para integrar la perspectiva de género en los contenidos curriculares de Física y Química de ESO y Bachillerato.

Palabras clave: sistema periódico, ciencia y género, Lise Meitner, meitnerio, metodologías didácticas.

Abstract: This work reviews the most significant historical milestones of the periodic system, with an especial emphasis on female contributions to the quest and study of new chemical elements. Moreover, the story of meitnerium, the only element named after a real woman, is proposed as a novel educational tool to include the gender dimension in the subject of Physics and Chemistry in Secondary Education.

Keywords: periodic system, science and gender, Lise Meitner, meitnerium, teaching methodologies.

INTRODUCCIÓN

Este año se cumplen 150 años desde que Dimitri Mendeléiev (1834-1907) publicó la tabla periódica que lleva su nombre.^[1] Sin embargo, el mayor logro pedagógico y divulgativo de la Química, lejos de ser la obra puntual de una única persona, es fruto de la superposición de muchos trabajos científicos. Muchas personas predijeron y clasificaron elementos químicos antes y después de Mendeléiev, y otras tantas los buscaron o estudiaron, aportando nuevas técnicas, metodologías y propuestas clasificatorias. La mayoría han pasado inadvertidas en el relato del sistema periódico. Y, como suele pasar con la ciencia y su historia, esta mayoría incluye a mujeres investigadoras con aportaciones muy significativas en la búsqueda y el estudio de las propiedades de algunos elementos químicos. No es el caso de la dos veces ganadora del premio Nobel Marie Curie, famosa por descubrir el polonio y el radio y por estudiar el fenómeno de la radiactividad. Pero, lamentablemente, la historia de la ciencia ha ignorado de manera sistemática la labor crucial de otras grandes pioneras como Julia Lermontova, Harriet Brooks, Stefanie Horovitz, Ida Noddack, Marguerite Perey o Lise Meitner.^[2] Todas ellas (véase Figura 1) se vieron obligadas a vencer barreras de tipo nor-

mativo, cultural, económico o social para poder alcanzar el sueño de ser científicas; la primera, la prohibición de acceso a universidades y otros organismos de investigación.

El acceso de las mujeres a todos los niveles educativos comenzó a garantizarse legislativamente hacia finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Fue entonces cuando surgieron las primeras figuras femeninas vinculadas al estudio del átomo y del sistema periódico. Estas mujeres solían necesitar la recomendación de algún profesor o investigador de reconocido prestigio para conseguir la admisión en las instituciones científicas. Sin embargo, su presencia fuera del ámbito doméstico causaba estupor entre las grandes personalidades académicas. Un ejemplo fue el físico Max Planck, considerado el padre de la mecánica cuántica, quien llegó a afirmar:

La naturaleza en sí misma prescribe que la mujer tiene una función de madre y ama de casa, y las leyes de la naturaleza no pueden ser ignoradas en ninguna circunstancia sin producir un grave daño [...].^[3]

A veces, para superar las limitaciones de género, estas mujeres se veían obligadas a cambiar de país y buscar mentores dispuestos a admitirlas en sus clases o laboratorios. Otras veces, se veían conminadas a estudiar o trabajar en estancias aisladas donde pasaban desapercibidas para sus compañeros. Una vez consolidadas como investigadoras, su credibilidad solía ser puesta en entredicho por la comunidad científica. Además, acostumbraban a tener serias dificultades para conseguir financiación, formar equipos de trabajo o desarrollar sus propias líneas de investigación, sin olvidar que les resultaba muy complicado acceder a un puesto permanente. En muchas ocasiones, ni tan siquiera percibían un estipendio por su trabajo. Esta situación las



A. I. Morales López

Máster Universitario en Profesor de Educación Secundaria
Universitat de València
Av. Alcalde Reig n. 8, 46006, Valencia
Instituto de Física Corpuscular (CSIC-UV)
C/Catedrático José Beltrán n. 2, 46980, Paterna
C-e: aimolo@alumni.uv.es

Recibido: 25/02/2019. Aceptado: 15/04/2019.



Figura 1. Mujeres pioneras de la tabla periódica. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: Julia Lermontova, Harriet Brooks, Stefanie Horowitz, Ida Noddack, Marguerite Perey y Lise Meitner

condicionaba a colaborar en los proyectos de sus colegas masculinos, por lo que a menudo eran consideradas meras ayudantes o asistentes suyas. Como resultado, su labor científica fue injustamente invisibilizada e incluso atribuida a sus compañeros varones de manera inmerecida. La normalización de este fenómeno llevó a la historiadora **Margaret W. Rossiter (1944)** a acuñarlo como el efecto Matilda^[4] en alusión al efecto Mateo, un prejuicio que atribuye los logros de una persona a otra con mayor prestigio social. Si se aplica al caso de las pioneras de la tabla periódica, el efecto Matilda hace referencia a la desvalorización de sus contribuciones en una profesión eminentemente masculina. Casi todas ellas lo sufrieron, pero gracias a su extraordinario talento, obstinación y tenacidad pudieron abrir una brecha en la brecha de género de la investigación atómica y nuclear. Es la intención de este trabajo recuperar y revalorizar sus aportaciones para darles el justo crédito que la historia les ha negado durante años.

Este estudio comienza revisando los hitos históricos más destacados en el descubrimiento de nuevos elementos químicos, así como su papel en el desarrollo del sistema periódico. Después, continúa con una breve reflexión sobre la labor femenina en el desarrollo del sistema periódico. Se presta especial atención a la figura de Lise Meitner, única mujer real que da nombre a un elemento químico, el meitnerio (cabe notar que el curio hace referencia a Marie y Pierre Curie). Se analiza la trayectoria académica de Meitner, poniendo especial énfasis en sus logros y en las barreras que invisibilizaron su labor. Posteriormente, se detalla el experimento que llevó al descubrimiento del meitnerio, de especial interés para integrar la perspectiva de género en las clases de ciencias. También se investigan otros potenciales usos didácticos de su historia, entre los que cabe destacar la integración de las relaciones entre ciencia, tecnología, sociedad y medio ambiente (CTSA), la motivación del alumnado, la aclaración de conceptos y la formación del profesorado. Se propone, además, usar la carta de núclidos –el equivalente nuclear de la tabla periódica– como

una nueva herramienta didáctica para introducir aspectos científicos, éticos y de género en el aula. Finalmente, se aportan las conclusiones de este estudio.

EL DESARROLLO DEL SISTEMA PERIÓDICO

Algunos elementos químicos, como el plomo, el oro o el cobre, se conocen desde la Antigüedad. Otros, como el fósforo o el arsénico, fueron aislados por alquimistas en la Edad Media y el Renacimiento. La alquimia era una protociencia que perseguía conseguir la transmutación de metales comunes en oro o plata. Su práctica impulsó el desarrollo de herramientas y técnicas ampliamente usadas en química moderna, como la sublimación y la destilación.^[5]

A comienzos del siglo XIX, mediante la aplicación de la electricidad al estudio de las reacciones químicas, tuvo lugar la primera gran oleada de hallazgos de elementos químicos. Entre 1807 y 1812, Humphry Davy (1778-1829) logró identificar ocho especies químicas nuevas aplicando técnicas de separación basadas en la recién descubierta electrólisis. Se trataba del magnesio, el bario, el estroncio, el calcio, el sodio, el potasio, el boro y el cloro.^[6] Otra gran oleada de descubrimientos se produjo alrededor de 1860, con la llegada del análisis espectroscópico que permitió descubrir elementos como el talio, el cesio o el helio. Otros avances en las técnicas de análisis de minerales permitieron nuevos descubrimientos y, como resultado, a finales del siglo XIX se habían conseguido aislar más de una cuarentena de elementos más.

El gran auge de elementos y sustancias descubiertos durante este siglo alentó a los químicos de la época a idear nuevas formas de clasificarlos. Dichas clasificaciones no sólo procuraban una ordenación periódica con capacidades predictivas –de gran utilidad para buscar nuevos elementos–, sino que respondían a la necesidad de disponer de una herramienta didáctica para la enseñanza de la Química. De especial interés era también la difusión a otros públicos, como los médicos, los farmacéuticos y otros grupos de usuarios que requerían de una descripción clara y sencilla de los nuevos productos químicos.^[7]

Como afirma Bertomeu Sánchez:

Las clasificaciones químicas fueron el resultado de la creatividad colectiva del profesorado de química del siglo XIX.^[7]

Aun así, las aportaciones cruciales de algunos autores destacados han prevalecido en el imaginario colectivo. Éste es el caso de Dimitri Mendeléiev (1834-1907), conocido como el célebre descubridor del patrón subyacente sobre el que se cimenta la tabla periódica actual.^[1] Cabe resaltar, sin embargo, que su trabajo se basó en obras anteriores, como el manual *Leçons de Chimie Générale Élémentaire* de Auguste Cahours,^[8] los trabajos de Johann Döbereiner (1780-1849) sobre las tríadas de elementos químicos^[9] o la hipótesis de William Prout (1785-1850) sobre el carácter fundamental del hidrógeno como componente básico de la materia.^[10] Es también importante notar que la ordenación de Mende-

léiev, que se muestra en la Figura 2, coexistió con otras propuestas clasificatorias menos populares, aunque no menos significativas para el desarrollo del sistema periódico.^[11] Entre ellas, destacan las contribuciones de Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois (1820-1886) y John Newlands (1837-1898). En 1862, Chancourtois ordenó por primera vez los elementos químicos en función de su masa atómica; Newlands formuló la ley de las octavas dos años después, en 1864. De igual relevancia fueron las ordenaciones de William Olding (1829-1921), Gustavus Hinrichs (1836-1923) y Julius Lothar Meyer (1830-1895). Este último propuso una clasificación muy parecida y casi simultánea a la de Mendeléiev,^[12] aunque actualmente la tabla periódica sigue siendo presentada como la obra genuina del químico ruso.

Con el descubrimiento de la radiactividad^[13] y el planteamiento del modelo atómico de Bohr,^[14] los químicos del siglo xx consiguieron entender el orden del sistema periódico propuesto por Mendeléiev. El advenimiento de la física nuclear, además, trajo consigo nuevos avances en el desarrollo de la tabla periódica. Los primeros elementos radiactivos fueron sintetizados. Se crearon un total de 30 especies químicas nuevas, entre las que cabe destacar el tecnecio, predicho en 1871 por Mendeléiev y aislado por primera vez en 1937, casi 70 años después, en la Universidad de Palermo. Los descubridores fueron Carlo Perrier (1886-1948) y Emilio Segrè (1905-1989).^[15]

Un hallazgo crucial fue el de los *isótopos*, término griego que significa “en el mismo sitio”. Este nombre fue propuesto por la doctora Margaret Todd (1859-1918) después de conocer las investigaciones de Frederic Soddy (1877-1956) sobre

las masas atómicas de algunos elementos radiactivos. Los isótopos son átomos con el mismo número *Z* de protones y electrones, pero distinto número *N* de neutrones. Como consecuencia, ocupan el mismo lugar en la tabla periódica y presentan las mismas propiedades químicas, pero distintas propiedades físicas. La química judía de origen polaco Stefanie Horovitz (1877-1942) aportó la primera prueba experimental concluyente de su existencia tras aislar un isótopo ligero del plomo en muestras de pechblenda enriquecidas con uranio.^[16] Su descubrimiento contribuyó, junto a otros estudios realizados a comienzos del siglo xx,^[14,17] a la reformulación del concepto de *elemento químico*, que pasó de definirse por la masa atómica relativa *A_r* a hacerlo por el número atómico *Z*. Además, el trabajo de Horovitz destapó todo un abanico de combinaciones de la materia cuyos límites aún se desconocen. Como ya sucediera en el siglo xix con el sistema periódico, la necesidad de una ordenación científica y pedagógica de los isótopos llevó a la gestación de una nueva tabla: la carta de núclidos. De manera similar, varias propuestas^[18] condujeron a la configuración actual de la carta, que se puede apreciar en la Figura 3.

Hacia mediados del siglo xx, el creciente desarrollo tecnológico nuclear dio lugar a la búsqueda de los elementos transuránicos o *superpesados*, caracterizados por tener un número atómico superior a *Z=92*, el número de protones del uranio. Las técnicas empleadas para sintetizar e identificar estos elementos se basaban, fundamentalmente, en el uso de reacciones de fusión nuclear en aceleradores de partículas.^[20] Entre 1940 y 1970, la búsqueda de estos elementos fue liderada por un equipo de investigadores de la Universidad de California (Berkeley, Estados Unidos). El grupo fue responsable de la síntesis de catorce especies nucleares nuevas, desde el plutonio (*Z=94*) hasta el seaborgio (*Z=106*). Este último fue nombrado en honor al miembro más representativo del equipo, Glenn T. Seaborg, quien recibió el premio Nobel de Química en 1951 por sus descubrimientos en la química de los elementos transuránicos. Entre 1980 y 1990, el liderazgo pasó al Instituto de Investigación de Iones Pesados (Darmstadt, Alemania). El equipo investigador, dirigido por Peter Armbruster, Gottfried Münzenberg y Sigurd Hofmann, consiguió sintetizar por fusión fría seis elementos nuevos, desde el bohrio (*Z=107*) hasta el copernicio (*Z=112*).

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

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

Д. Менделѣевъ

Figura 2. Primera tabla periódica de Mendeléiev

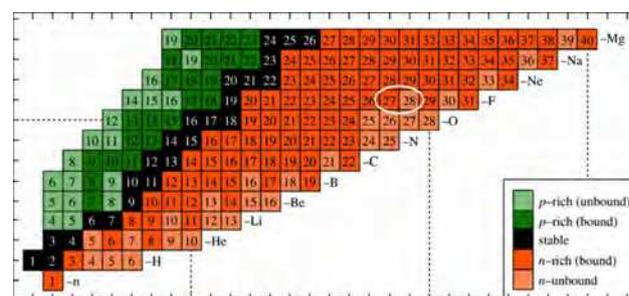


Figura 3. Carta de núclidos hasta *Z=12*.^[19] En ella los núcleos se disponen en función de su número de neutrones *N* (eje *X*) y de protones *Z* (eje *Y*). El código de colores indica el modo de desintegración más probable

En 2016, la IUPAC confirmó el descubrimiento de cuatro especies químicas más: el nihonio ($Z=113$), el moscovio ($Z=115$), el teneso ($Z=117$) y el oganesón ($Z=118$). Con ellas, el séptimo período de la tabla periódica, en su representación habitual, quedaría completado. Sin embargo, los modelos nucleares más recientes predicen los límites de síntesis atómica para elementos con mayor número de protones. De acuerdo con estas teorías, la tabla periódica de Mendeléiev permanece inacabada, por lo que el descubrimiento de nuevas especies químicas es uno de los grandes retos de la ciencia del siglo XXI.^[21] En los próximos años, los científicos esperan descubrir la octava fila de la tabla de Mendeléiev por primera vez en la historia. Para ello, intentarán producir el *ununennium* (nombre temporal del elemento 119) y el *unbilinium* (nombre temporal del elemento 120) en reacciones de fusión caliente, haciendo colisionar especies nucleares actínidas con núcleos mucho más ligeros, de número másico en torno a $A=50$. Su descubrimiento marcará el preludio de la exploración del bloque *g*. Con él, también se abrirá una nueva fila en una de las clasificaciones alternativas más conocidas, la tabla periódica de Charles Janet (1849-1932).^[22] En este momento, los experimentos de interés se están preparando o llevando a cabo en instalaciones nucleares como RIKEN (Wako, Japón), JINR (Dubná, Rusia) y GANIL (Caen, Francia).

LAS MUJERES Y EL SISTEMA PERIÓDICO

De los 118 elementos que en la actualidad conforman la tabla periódica, solamente unos cuantos se suelen atribuir a la labor de mujeres o equipos de investigación en los que participaban mujeres.^[23] La más conocida es Marie Skłodowska Curie (1867-1934), codescubridora de los elementos polonio y radio junto a su marido Pierre Curie (1859-1906). En el año 1903, el matrimonio compartió el premio Nobel de Física con Henry Becquerel (1852-1908) por sus extraordinarias contribuciones al descubrimiento y estudio de la radiactividad. Marie Curie se convirtió así en la primera mujer en recibir un premio Nobel. Siete años después, en 1911, recibiría en exclusiva un segundo galardón –esta vez el premio Nobel de Química– por el aislamiento y estudio del radio. Sin embargo, Marie Curie no fue la primera mujer especializada en el aislamiento de elementos químicos. Veinte años antes, probablemente aconsejada por Mendeléiev, la química rusa Julia Lermontova (1846-1919) estudió nuevas técnicas de separación de los metales del grupo del platino.^[23] Esta investigación fue esencial en la ordenación de los elementos rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio y platino, tal y como sugieren los archivos de Mendeléiev y la correspondencia que mantuvieron ambos.

La identificación de nuevos elementos requería de mucha destreza, empeño y talento. Éste era el caso de Harriet Brooks (1876-1933), primera física nuclear de origen canadiense. Como estudiante de posgrado de Rutherford, Brooks investigó junto a él la naturaleza de las emisiones radiactivas del torio. Llegaron a demostrar que estas “emanaciones” se esparcían como un gas –al que más tarde se llamó radón–, proporcionando la primera prueba experi-

mental de la transmutación de elementos radiactivos.^[24] Su estudio fue crucial para el desarrollo de la teoría de la desintegración radiactiva, por la que años más tarde Rutherford recibió el premio Nobel de Química. Raras veces se reconoce su contribución. Algo similar le sucedió a la química y física Ida Noddack (1896-1978), codescubridora del renio junto a su marido Walter Noddack (1893-1960) y Otto Berg (1873-1939).^[25] Ida fue la primera científica en sugerir que el núcleo de uranio podía romperse en fragmentos más pequeños al bombardearlo con neutrones.^[26] Pero la falta de una base teórica que explicara esta hipótesis y su escasa credibilidad tras fracasar en el hallazgo del elemento $Z=43$ hicieron que la comunidad científica ignorara su propuesta. Años después, Lise Meitner (1878-1968), Otto Hahn (1879-1968) y Fritz Strassmann (1902-1980) confirmaron la hipótesis de Ida tras hallar bario entre los productos de la reacción.^[27] Más tarde, Lise y su sobrino Otto Frisch (1904-1979) proporcionaron la primera explicación científica para el fenómeno, al que nombraron *fisión nuclear*.^[28] Lise Meitner, además, es considerada la codescubridora del protactinio junto a Otto Hahn. Para aislarlo, descompusieron pechblenda con ácido caliente.^[29] Pese a recibir 29 nominaciones al premio Nobel de Física y otras 19 al premio Nobel de Química a lo largo de su carrera, Meitner fue una de las grandes olvidadas por el comité de los Nobel.^[30] Éste es probablemente el motivo por el que su labor investigadora aparece raramente citada en los libros de ciencias, los mismos que atribuyen únicamente a Hahn los logros que consiguieron ambos durante los años que trabajaron juntos.

Una excepción a la larga lista de colaboradoras y asistentes de compañeros varones es Marguerite Perey (1909-1975), considerada la descubridora en solitario del francio. En el año 1939, Perey aisló el nuevo elemento en una muestra de lantano con trazas de actinio.^[31] Por aquella época trabajaba como ayudante de laboratorio de Irène Joliot-Curie y André Debierne. La suerte quiso que ninguno de los dos conviniera en quién dirigía su investigación en aquel momento y, como resultado, Perey fue la única autora del artículo que anunciaba el hallazgo. En el año 1962, se convirtió en la primera mujer miembro de la Academia de Ciencias de Francia, rompiendo así el veto extraoficial que se había impuesto a las mujeres durante casi tres siglos.

El francio fue el último elemento aislado químicamente. Desde entonces, los nuevos elementos –los superpesados– se sintetizan y aíslan en aceleradores de partículas. Para poder realizar estos experimentos es necesario disponer de grandes presupuestos y equipos de investigación punteros. Mujeres pioneras como Darleane Hoffman (1926) y Dawn Shaughnessy han sido las primeras en liderar investigaciones de este tipo en los laboratorios nacionales Los Álamos y Lawrence Livermore, en Estados Unidos. Con ellas, se ha roto definitivamente el “techo de cristal” de las mujeres de la tabla periódica.

Si bien Shaughnessy tuvo el privilegio de nombrar un elemento químico –el livermorio–, Lise Meitner es la única mujer real que da nombre a uno –el meitnerio–. En los últimos años, muchos científicos e historiadores han reclamado un lugar justo para Meitner en la historia de la

ciencia. Algunos autores, como Ruth Lewin Sime, lo han hecho a través de su biografía,^[32] revelando a una mujer muy avanzada para su época. Pero, sobre todo, se descubre un referente excepcional en la investigación atómica y nuclear. Lise Meitner fue, ante todo, una mujer apasionada por la ciencia. Tanto que, como veremos a continuación, arriesgó su vida por ella.

LISE MEITNER, UNA VIDA CONSAGRADA A LA CIENCIA

Lise Meitner nació en Viena en 1878 en el seno de una familia de origen judío que profesaba el protestantismo. Desde muy niña demostró un talento innato para la ciencia. Fue la segunda mujer en doctorarse en ciencias físicas en la Universidad de Viena. Tras un intento fallido de trabajar junto a Marie Curie en la Sorbona, en 1907 marchó a Berlín atraída por el genio de Max Planck (1858-1947). Como ya se había mencionado, Planck se oponía a la educación universitaria para las mujeres. Pero la determinación de Lise por profundizar en su formación le impresionó tanto que acabó admitiéndola en sus clases. Ese mismo año, Lise conoció al químico alemán Otto Hahn, quien sería su íntimo amigo y más estrecho colaborador durante las próximas tres décadas (véase Figura 4).

Los comienzos fueron duros. El director del Instituto de Química donde trabajaba Hahn, Emil Fisher, no admitía a mujeres en el laboratorio. Por suerte para ella, había una pequeña estancia en el sótano del edificio que contaba con una entrada independiente. Pese a no estar acondicionada para realizar experimentos, Fisher le dio permiso para usarla como laboratorio. Lise se instaló allí y, a pesar de las dificultades, entre 1907 y 1909 consiguió publicar varios artículos relevantes en colaboración con Hahn. No recibió ninguna compensación económica por su trabajo hasta 1912, cuando Max Planck le consiguió un contrato como asistente. Se convirtió así en la primera mujer que percibía un estipendio en una universidad alemana. Cinco años después, en 1917, fue nombrada directora del recién estrenado Departamento de Física del Instituto Kaiser Guillermo de Química. En 1922, ascendió a profesora titular de la Universidad de Berlín –la primera de Prusia y la segunda de toda Alemania–. Su clase inaugural versó sobre “*el significado de la radiactividad en los procesos cósmi-*

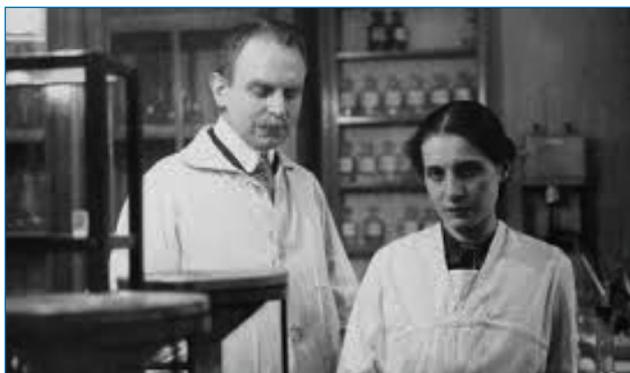


Figura 4. Lise Meitner y Otto Hahn trabajando juntos en el año 1912

cos”, que un medio académico publicó como “*el significado de la radiactividad en los procesos cosméticos*”.^[32] Finalmente, en 1926, se convirtió en la primera catedrática de física de Alemania. Había conseguido alcanzar la cima de la carrera académica.

En 1933, con la llegada de Adolf Hitler al poder, comenzó la persecución a los judíos. A Lise se le retiró el título de catedrática y con él el privilegio de enseñar en la universidad. Pero gracias a su pasaporte austríaco pudo evitar el repudio y mantuvo su cargo de directora en el Departamento de Física del Instituto Kaiser Guillermo. Algunos amigos, como Niels Bohr, le ofrecieron refugio fuera de Alemania, pero Lise había trabajado demasiado duro en su laboratorio como para abandonarlo, y decidió permanecer allí hasta que la situación se hizo insostenible.

En 1938, con la anexión de Austria por parte de la Alemania nazi, Lise se vio obligada a abandonar ilegalmente el país. Fueron muchos los colegas que la ayudaron en su huida, entre otros Otto Hahn, Niels Bohr, Dirk Coster y Paul Debye. De la noche a la mañana, se vio despojada de todas sus pertenencias. Consiguió huir a Holanda con 10 marcos y un anillo de diamantes que Hahn le había dado para sobornar a los guardias en la frontera. De allí viajó a Dinamarca y luego a Suecia. En Estocolmo, retomó su trabajo en el Instituto de Manne Siegbahn (1886-1978), no sin serios problemas por los prejuicios de este contra las mujeres y, en general, contra todo aquél que pudiera suponer una amenaza a su liderazgo. Con 60 años y una carrera intachable a sus espaldas, tuvo que resignarse a percibir un humilde sueldo de asistente. Tampoco le permitieron impartir clases ni tener estudiantes a su cargo.

En noviembre de 1938, Lise se reunió de manera clandestina con Hahn en Copenhague. Juntos planificaron los experimentos que condujeron al descubrimiento de la fisión nuclear.^[27] Fueron ella y su sobrino Otto Frisch quienes, en las navidades de 1938, dedujeron que el núcleo de uranio se volvía inestable ante el bombardeo de neutrones, desatando una energía millones de veces mayor que la liberada en la combustión de un átomo de carbono. Acuñaron el fenómeno con el nombre de *fisión nuclear*.^[28]

En el invierno de 1944, Hahn fue galardonado con el premio Nobel de Química por el descubrimiento de la fisión nuclear. Nunca reconoció el papel crucial de Meitner en la empresa. Lise, discreta, jamás reclamó el mérito que le correspondía. Tuvieron que pasar cincuenta años para que entrara en un club aún mucho más selecto, el de los pocos privilegiados distinguidos con el nombre de un elemento químico, el meitnerio.^[33] Todavía hoy, 150 años después de la publicación de la tabla periódica de Mendeléiev, Lise Meitner es la única mujer real que ostenta ese honor.

Le propusieron participar en el proyecto Manhattan, pero siempre se opuso al uso bélico de su descubrimiento.^[30] Estaba especialmente preocupada por la situación de la mujer en la ciencia y por la dimensión axiológica del desarrollo científico. Pasó los años de postguerra impartiendo conferencias sobre estos temas. En 1947, fue nombrada profesora de investigación en el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, lo que mejoró notablemente sus

condiciones laborales y económicas. En 1960, se trasladó a Reino Unido para estar más cerca de su hermano Walter y su sobrino Otto. Murió en Cambridge el 27 de octubre de 1968. Otto mandó escribir en su epitafio: “Lise Meitner, una física que nunca perdió su humanidad”.

EL MEITNERIO

El meitnerio es un elemento superpesado con número atómico $Z=109$. Es un metal de transición sólido perteneciente al bloque *d*. Se encuentra en el grupo 9, período 7 de la tabla periódica. No tiene usos conocidos más allá de la investigación experimental. Fue sintetizado por primera vez en 1982 por el grupo de investigación que, en aquel momento, lideraban Peter Armbruster y Gottfried Münzenberg en el Instituto de Investigación de Iones Pesados (GSI).^[34] El dispositivo experimental que utilizaron se muestra en la Figura 5.

Los expertos produjeron el meitnerio haciendo incidir un haz de ^{58}Fe sobre un blanco delgado de ^{209}Bi . Utilizaron un filtro de velocidad para separar los residuos formados por fusión fría del resto de contaminantes,^[35] así como un sistema de detección de tiempo de vuelo para medir con precisión la velocidad de los productos seleccionados. Posteriormente, implantaron los núcleos en una matriz de siete detectores de silicio para medir su posición, tiempo y energía. Usaron esa misma matriz para detectar la posición, el tiempo y la energía de la radiación emitida por los núcleos implantados. El sistema electrónico que utilizaron era analógico y tenía una resolución temporal de 1 μs . Las señales se guardaron una a una en cinta magnética. El análisis de datos se realizó con el sistema IBM 3081 y con el paquete de análisis SATAN de GSI.^[36]

La observación inequívoca de un residuo de evaporación con masa superior a 250 u, seguido de dos emisiones alfa y una fisión espontánea –el único evento de fisión observado en todo el experimento–, proporcionó al equipo una prueba irrefutable de la producción de un elemento superpesado. Tras un concienzudo análisis probabilístico, demostraron que la cadena radiactiva detectada provenía de un evento real. De entre los doce posibles núcleos superpesados que se podían haber formado en la reacción, concluyeron que el observado era $^{266}109$. El nombre “meitnerio” fue acuñado por la IUPAC doce años después, tras

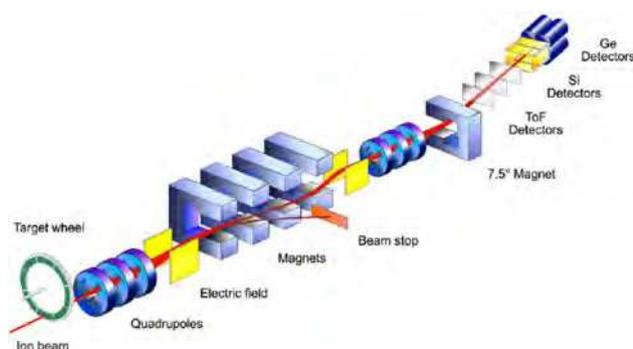


Figura 5. Dispositivo experimental utilizado en el descubrimiento del meitnerio

aceptar la propuesta del equipo descubridor (véase Figura 6). Alegaron hacerlo en reconocimiento a *la labor decisiva de Lise Meitner en el descubrimiento de la fisión nuclear*.^[33] Sin embargo, este reconocimiento iba mucho más allá. Con el nombramiento del meitnerio se conseguía, por primera vez en la historia, visibilizar la contribución de las mujeres en el desarrollo de la tabla periódica. Se contrarrestaba así el arraigado desdén hacia la ciencia femenina, legando para la posteridad la excelente labor de una mujer que, por ser de origen judío, se vio en el dilema de arriesgar la vida por su pasión, la ciencia.

LA HISTORIA DEL MEITNERIO EN LAS AULAS

Existen numerosos estudios sobre la importancia de la Historia de la Ciencia (HC) en la enseñanza de la Física y la Química (FQ).^[37] Una de las mayores fortalezas de la HC es su capacidad de reforzar el vínculo entre los contenidos científicos a impartir y las relaciones CTSA que exige el currículum de Educación Secundaria Obligatoria (ESO) y Bachillerato y que, hoy en día, es prácticamente inexistente en muchas aulas de ciencias. Es de especial interés que el alumnado adquiera nociones fundamentales sobre la transformación del pensamiento científico a lo largo del tiempo y sobre cómo el contexto social, político, cultural y moral en el que se desarrollaron las teorías científicas influyó en su evolución. Este tipo de planteamiento de la enseñanza de las ciencias incluye la reflexión como pilar fundamental en las clases, lo que contribuye notablemente al desarrollo del espíritu crítico requerido para alcanzar el objetivo educativo de alfabetizar científicamente al alumnado. Además, la HC ayuda a empatizar con los conflictos morales a los que se enfrentaron los científicos en el curso de la historia. Este aspecto “humaniza” la ciencia y hace que los procesos de enseñanza y aprendizaje sean más estimulantes para los profesores, que enriquecen su conocimiento ontológico y epistemológico de la materia, y para los alumnos, que aprenden a tomar decisiones fundamentadas sobre cuestiones científicas de interés común.

Dentro de este contexto, la historia del meitnerio nos brinda una oportunidad única para incluir una perspectiva ética y de género en el desarrollo de la tabla periódica. La dimensión de género es una cuestión fundamental en el camino hacia la igualdad social y, como tal, ha de visibilizarse en las aulas de ciencias. Este propósito es más viable cuanto mejor sea la integración de la HC en el currículum oficial de las asignaturas de ciencias. Las razones son muy diversas. En primer lugar, la HC pone de manifiesto las barreras legales, culturales y sociales con las que se han encontrado las mujeres científicas a lo largo de la historia. En segundo lugar, demuestra que sus aportaciones han sido invisibilizadas de manera sistemática y consciente por parte de la comunidad científica. En tercer lugar, recupera sus biografías para mantener su legado científico, revalorizar sus logros y, así, dar el justo crédito a su labor. En cuarto lugar, ayuda a corregir los prejuicios del alumnado redefiniendo los referentes de la ciencia con nuevas figuras femeninas. Y, finalmente, invita a reflexionar sobre las



Figura 6. Equipo descubridor del meitnerio. Gottfried Münzenberg y Peter Armbruster son el segundo y tercer hombre comenzando por la izquierda, respectivamente

dificultades a las que deben enfrentarse en la actualidad las mujeres que quieren hacer ciencia.

Esta historia, además, permite integrar la investigación atómica en un contexto político, cultural, social y tecnológico tan complejo como el que dio lugar a los dos peores conflictos bélicos de la historia de la Humanidad y al desarrollo de las primeras armas de destrucción masiva. Por otro lado, deja entrever el lado más humano de la ciencia a través de la biografía de una mujer de origen judío, víctima del racismo nazi, que luchó por su gran pasión, la ciencia. Una científica pionera que no se rindió ante la adversidad y que tras muchos años logró su merecido reconocimiento. Desde un punto de vista docente, este relato puede ser utilizado para despertar la curiosidad del alumnado y estimular su interés personal por la ciencia, ya que infunde esperanza y deseos de cambio social profundo. Además, permite estudiar algunas de las cuestiones CTSA más importantes del siglo xx, como el holocausto nazi, el desarrollo de la bomba atómica que concluyó con los desastres de Hiroshima y Nagasaki, la carrera nuclear que propició la guerra fría, la explotación de la energía nuclear o la invisibilidad de la mujer en ciencia. Así, el alumnado no sólo aprende a contextualizar los experimentos que condujeron al descubrimiento de la fisión nuclear, sino que también debe reflexionar sobre las consecuencias de su posterior explotación bélica y civil. Sirve, por tanto, para fomentar el espíritu crítico ante un mal uso de las aplicaciones científicas y tecnológicas. Teniendo en cuenta el desmesurado ritmo de los avances científicos en la actualidad,^[38] ésta es una competencia clave en el desarrollo personal del alumnado.

La biografía de Lise Meitner también permite aclarar algunos conceptos fundamentales de FQ contemplados en los currículos de ESO y Bachillerato. Sus trabajos científicos ayudan a comprender mejor cómo evolucionó la investigación de los procesos radiactivos a principios del siglo xx, aspecto que facilita el aprendizaje de los contenidos curriculares relativos a la estructura atómica y la energía nuclear, así como la comprensión del lenguaje utilizado en física subatómica. Un aprendizaje significativo de estos contenidos es fundamental para corregir los errores conceptuales más comunes sobre el modelo cuántico del átomo.^[39] No menos

importante es la presentación de discontinuidades y debates en la práctica científica: el relato de los experimentos que llevaron al descubrimiento de la fisión nuclear muestra el carácter imperfecto e irregular de la ciencia, con ideas erróneas, incertidumbres, limitaciones y discusiones en torno a los experimentos realizados y su interpretación. Este aspecto es especialmente relevante para corregir una de las visiones deformadas más extendidas de la ciencia, la visión rígida del desarrollo científico. Así, la HC logra desmontar la imagen de perfección que suele imponerse en las aulas de ciencias y ayuda a que el alumnado se forme una imagen más real de la actividad científica.

Por último, la historia del meitnerio es de gran interés para mejorar la formación de los profesores de ciencias, pues ayuda a corregir los errores de enseñanza más comunes en torno al átomo y enriquece el conocimiento ontológico y epistemológico de la materia.^[39] Además, el profesorado puede implementar nuevas propuestas didácticas a partir de esta historia. Un ejemplo es la introducción de la carta de núclidos en las clases de ciencias.^[40] En la carta, los núcleos se disponen en función del número de protones (eje Y) y de neutrones (eje X), o lo que es lo mismo, los elementos químicos se ordenan en el eje vertical y los isótopos de un mismo elemento en el eje horizontal, tal y como muestra la Figura 3. Al aumentar el número de protones o neutrones (i.e., al desplazarnos hacia arriba o hacia la derecha en la carta de núclidos), las distintas capas nucleares se van llenando hasta alcanzar combinaciones particularmente estables; son los llamados números mágicos: 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126. Debido a la estructura de capas, la carta de núclidos ofrece una ordenación periódica de las propiedades nucleares, tal y como sucede con los elementos en la tabla periódica. Por tanto, resulta de gran utilidad para enseñar algunos contenidos básicos sobre el átomo, como, por ejemplo, los tipos de desintegración radiactiva o las reacciones de fisión y fusión nuclear. Pero la mayor ventaja de su introducción en el aula es la ampliación a otros contenidos no contemplados dentro del currículo oficial de ESO y Bachillerato,^[40] como los procesos de nucleosíntesis estelar que dan lugar a la formación de elementos en las estrellas, la investigación de los elementos superpesados o la dimensión de género de la investigación atómica.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la tabla periódica –de la que este año celebramos su 150º aniversario– y su extensión en la carta de núclidos es la historia de una pregunta sin respuesta, de cómo se organiza la materia que nos rodea. Mientras la comunidad científica busca nueva información en los límites de síntesis atómica, la tabla periódica proporciona un lenguaje universal que representa uno de los mayores logros divulgativos de la ciencia de todos los tiempos. Lamentablemente, nuestra sociedad, con la comunidad científica a la cabeza, ha invisibilizado de manera sistemática la contribución femenina al desarrollo de la tabla periódica. Así, las investigaciones llevadas a cabo por mujeres han sido tradicionalmente infravaloradas o atribuidas injustamente a sus compañeros varones.

Como consecuencia de este prejuicio –conocido como efecto Matilda–, la mayoría de las mujeres de la tabla periódica han pasado inadvertidas para la historia de la ciencia.

Este trabajo pretende subsanar la postergación sufrida por las pioneras de la tabla periódica recuperando su labor en la búsqueda de nuevos elementos químicos y en el estudio de sus propiedades. En particular, se ha propuesto integrar la historia de Lise Meitner y del elemento químico que lleva su nombre, el meitnerio, dentro del currículum de FQ de ESO y Bachillerato. La finalidad principal es revalorizar sus logros académicos y científicos, aportar un nuevo referente femenino a las clases de ciencias y visibilizar los impedimentos de las mujeres científicas. Además, se han discutido los potenciales usos didácticos de esta historia. Entre ellos, cabe destacar la reflexión axiológica sobre los descubrimientos científicos y sus aplicaciones, la aclaración de conceptos, la motivación del alumnado hacia la ciencia, el enriquecimiento ontológico y epistemológico del profesorado y la introducción de nuevas propuestas educativas, como la carta de núclidos. Sin embargo, el aspecto pedagógico más interesante es la incorporación de la perspectiva de género a los contenidos curriculares de FQ. Esta historia reconsidera los estereotipos de la actividad científica, requisito ineludible para formar a una ciudadanía responsable, informada, participativa y crítica con la igualdad de género y las demás cuestiones CTSA. En definitiva, contribuye a lograr uno de los principales objetivos de la enseñanza, la alfabetización científica del alumnado.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer al profesor José Ramón Bertomeu por las enriquecedoras discusiones sobre el manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. I. Mendeleev, *Osnovy khimii (Principles of Chemistry)*, St Petersburg, 1869-1871.
- [2] Brigitte van Tiggelen, Annette Lykknes. *Nature* **2019**, *565*, 559-561.
- [3] J. Castelo Torras, *Lise Meitner... y la energía del uranio*, Sociedad Nuclear Española, 2015.
- [4] M. W. Rossiter. *Soc. Stud. Sci.* **1993**, *23* (2), 325-341.
- [5] William R. Newman, *Promethean ambitions: alchemy and the quest to perfect nature*. University of Chicago Press, Chicago, 2005.
- [6] a) H. Davy. *Philos. Trans. R. Soc.* **1808**, *98*, 333-370. b) H. Davy. *Philos. Trans. R. Soc.* **1811**, *101*, 1-35.
- [7] J. R. Bertomeu Sánchez, Química, Historia, Filosofía y Educación, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, 2011, 25-41.
- [8] A. Cahours, *Leçons de chimie générale élémentaire: professées à l'école centrale des arts et manufactures*. Mallet-Bachelier, París, 1856.
- [9] J. W. Döbereiner. *Ann. Phys. Chem.* **1829**, *15*, 301-307.
- [10] W. Prout. *Ann. Philos.* **1815**, *6*, 321-330.
- [11] a) E. R. Scerri, *The periodic table: its story and its significance*. Oxford University Press, Oxford, 2007. b) E. R. Scerri, *Mendeleev's legacy: the periodic system*. Imperial College Press, Londres, 2009, 112-117.
- [12] L. Meyer, *Die modernen Theorien der Chemie und ihre Bedeutung für die chemische Statik*. Maruschke & Berendt, Breslau, 1872.
- [13] P. Radvanyi, J. Villain. *C. R. Phys.* **2017**, *18* (9), 544-550.
- [14] N. Bohr. *Philos. Mag.* **1913**, *26* (151), 1-25.
- [15] C. Perrier, E. J. Segrè. *Chem. Phys.* **1937**, *5* (9), 712-716.
- [16] M. Rayner-Canham, G. Rayner-Canham. *Bull. Hist. Chem.* **2000**, *25* (2), 103-108.
- [17] a) A. Van den Broek. *Nature*. **1911**, *87*, 78. b) H. G. J. Moseley. *M. A. Philos. Mag.* **1913**, *26* (156), 1024-1034. c) J. Chadwick. *Proceedings of the Royal Society A.* **1932**, *136* (830), 692-708.
- [18] a) K. Guggenheimer. *J. Phys. Radium.* **1934**, *5* (6), 253-256. b) G. Fea. *Il Nuovo Cimento.* **1935**, *2*, 368-406.
- [19] G. Christiani. PhD thesis. Michigan State University, East Lansing, 2011.
- [20] D. Ackermann, C. Theisen. *Phys. Scr.* **2017**, *92* (8), 083002.
- [21] E. R. Scerri, G. Restrepo (Eds.), *Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table*. Oxford University Press, Oxford, 2018.
- [22] C. Janet, *Considérations sur la structure du noyau de l'atome*. Imprimerie Départementale de l'Oise, Beauvais, 1929.
- [23] M. Creese. *Bull. Hist. Chem.* **1998**, *21*, 19-24.
- [24] M. Rayner-Canham, G. Rayner-Canham, *Harriet Brooks: Pioneer Nuclear Scientist*. McGill-Queen's University Press, Montreal, 1992.
- [25] W. Noddack, I. Tacke, O. Berg. *Naturwiss.* **1925**, *13* (26), 567-574.
- [26] I. Noddack. *Angew. Chem.* **1934**, *47* (37), 653-655.
- [27] O. Hahn, F. Strassmann. *Naturwiss.* **1939**, *27*, 11-15.
- [28] L. Meitner, O. R. Frisch. *Nature.* **1939**, *143*, 239-240.
- [29] L. Meitner, O. Hahn. *Phys. Z.* **1918**, *19*, 208-218.
- [30] L. Morrón. *Revista Española de Física.* **2018**, *32* (3), 55-64.
- [31] M. Perey. *C. R. Acad. Sci.* **1939**, *208*, 97.
- [32] R. L. Sime, *Lise Meitner: a life in physics*, Berkeley: University of California Press, Berkeley, 1996.
- [33] IUPAC Recommendations. *Pure & Appl. Chem.* **1994**, *66* (12), 2419-2421.
- [34] a) G. Münzenberg, P. Armbruster, F. Hessberger, S. Hofmann, K. Poppensieker, W. Reisdorf, J. Schneider, W. Schneider, K.-H. Schmidt, C. Sahm, D. Vermeulen. *Z. Phys. A: At. Nucl.* **1982**, *309*, 89-90. b) G. Münzenberg, W. Reisdorf, S. Hofmann, Y. K. Agarwal, F. Hessberger, K. Poppensieker, J. Schneider, W. Schneider, K.-H. Schmidt, H. J. Schött, P. Armbruster, C. Sahm, D. Vermeulen. *Z. Phys. A: At. Nucl.* **1984**, *315*, 145-158.
- [35] G. Münzenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbruster, K. Güttnner, H. Ewald. *Nucl. Instrum. Methods* **1979**, *161* (1), 65-82.
- [36] R. Chestnut, B. Grasmick, R. Hadshell. W. Lebershausen, J. Lowski, W. Plappert, M. Richter, H. Rother, O. Siart, M. Steitz, K. Winkelmann, *EDAS (GOLDA+STAN) User's Guide*, GSI Darmstadt, 1981.
- [37] M. R. Matthews. *Ensen. Cien.* **1994**, *12* (2), 255-277.
- [38] J. Solbes. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **2013**, *10*, 171-181.
- [39] J. Solbes. *Alambique.* **2018**, *93*, 26-33.
- [40] a) H. Koura. *Phys. Educ.* **2014**, *49* (2), 215-220. b) C. A. Diget, A. Pastore, K. Leech, T. Haylett, S. Lock, T. Sanders, M. Shelley, H. V. Willet, J. Keegans, L. Sinclair, E. C. Simpson. *Phys. Educ.* **2017**, *52* (2), 024001.

Historia de una Tabla Periódica

Luis Sánchez y Agustín Galindo

Resumen: En el Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Sevilla se encuentra una Tabla Periódica que contiene muestras reales de los elementos químicos (<http://personal.us.es/galindo/tabla.htm>). Con motivo de la celebración del *International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019)* recogemos en el presente artículo la historia que hay detrás de la construcción de dicha Tabla Periódica.

Palabras clave: Tabla periódica; Elementos químicos; Departamento de Química Inorgánica; Sevilla.

Abstract: At the Inorganic Chemistry Department of the University of Seville there is a Periodic Table that contains real samples of chemical elements (<http://personal.us.es/galindo/tabla.htm>). On the occasion of the celebration of the *International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019)* we here present the history behind the construction of this Live Periodic Table.

Keywords: Periodic table; Chemistry elements; Inorganic Chemistry Department; Seville.

Como conocen los lectores de nuestra revista, la Asamblea General de las Naciones Unidas, a propuesta de la UNESCO, ha proclamado el año 2019 como *International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT2019)*.^[1] Ello se debe a que en este año se cumple el 150 aniversario de la propuesta que realizó Dimitri Mendeleiev sobre la ordenación periódica de los elementos químicos que hoy conocemos como Tabla Periódica (TP), el alfabeto del universo. La TP es un pilar de la Ciencia en general y de la Química en particular y, con motivo de esta celebración, hemos considerado de interés referir en este artículo no la historia de la TP^[2,3,4] sino la historia de una TP con muestras reales de los elementos químicos, que se encuentra en el Departamento de Química Inorgánica (QI) de la Universidad de Sevilla (Figura 1).^[5,6]

La idea original de construir una TP de estas características surge cuando uno de nosotros, Luis Sánchez, queda fascinado por las denominadas *Live Periodic Tables*



Figura 1. Tabla periódica con muestras reales de los elementos químicos ubicada en el Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Sevilla



L. Sánchez¹

A. Galindo²

¹ Instituto de Investigaciones Químicas, CSIC-Universidad de Sevilla, Avda. Américo Vespucio 49, 41092 Sevilla. C-e: ljavier@cica.es

² Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Sevilla, Apto. 1203, 41071 Sevilla. C-e: galindo@us.es

Recibido: 26/04/2019. Aceptado: 03/06/2019.

que encontró al visitar varias universidades inglesas (por ejemplo, el Imperial College de Londres) y estadounidenses. Lo que en principio fue solo un sueño personal, poco a poco fue tomando visos de realidad conforme iba avanzando en su formación académica como químico sintético en el seno del grupo de investigación del profesor Ernesto Carmona, durante el desarrollo de su Tesis Doctoral, y en su estancia postdoctoral en la Universidad de British Columbia. Esta idea inicial comienza a tomar forma de proyecto real a principios de la segunda mitad de los años ochenta, poco tiempo después de haberse trasladado la Facultad de Química desde su ubicación en la antigua Fábrica de Tabacos a su actual emplazamiento en el campus de Reina Mercedes. En una reunión informal de profesores y doctorandos se acoge con entusiasmo la idea y los participantes se comprometen a colaborar en el proyecto para llevarlo a buen término, destacando desde el primer

momento el valor didáctico de la idea y la posibilidad de que con dicha tabla se pudiera aumentar la motivación de los alumnos por el aprendizaje de la Química y su interés por el estudio de esta disciplina. Entre los asistentes a dicha reunión estaban, además de Luis Sánchez como organizador de la misma, varios profesores y estudiantes de doctorado del grupo de Química Organometálica del Departamento de QI de Sevilla como Ernesto Carmona, Manuel López Poveda, Pilar Palma, Agustín Galindo, Margarita Paneque, Miguel Angel Muñoz, Leopoldo Contreras, Juan Cámpora y Pedro Pérez.

En una primera revisión de los almacenes de productos químicos de todos los laboratorios del departamento de QI se encontraron alrededor de cincuenta elementos. Algunas de las muestras de elementos en polvo que teníamos en el laboratorio (Cr, Mo, W, Nb, Ta, Ni, Pd, Th y U) eran productos que empleábamos durante el desarrollo de las investigaciones del grupo de Química Organometálica que dirigía el profesor Ernesto Carmona sobre la síntesis y reactividad de compuestos organometálicos de estos metales en bajo estado de oxidación. En el seno del grupo de investigación estábamos también familiarizados con la manipulación de muchos otros elementos que utilizábamos, bien como reactivos bien para otros usos: Li, Na, K y Zn para reacciones de reducción, Mg para síntesis de los reactivos de Grignard, H₂ para reacciones de hidrogenación y O₂ para las de oxidación, Hg para preparar amalgamas reductoras de sodio, Ar y N₂ como gases inertes y este último en su forma líquida para la trampa de la línea de vacío, etc.

Una de las normas que se quiso mantener desde el inicio de la construcción de la TP fue que su coste resultara el menor posible, prácticamente cero, lo que se consiguió gracias al trabajo desinteresado de muchos y a las generosas donaciones de colegas y colaboradores. Así, los gases nobles Kr y Ne fueron cedidos por el profesor Guillermo Munuera, que disponía de un par de botellas de aluminio almacenadas en su despacho de no más de medio litro cada una de ellas, que usaba en experimentos de espectroscopía de dispersión de iones. El Ir en polvo fue cedido por el profesor Francisco González Vilchez, mientras que el profesor del CSIC José Manuel Criado regaló uno de los pequeños crisoles de Pt que utilizaba en sus investigaciones de cinética de sólidos inorgánicos.^[7] El Be lo suministró el profesor Manuel González y provenía de una ventana-barrera de un antiguo aparato de espectroscopía de fluorescencia de rayos X, que ya estaba inservible y listo para su desguace. El In procedía del servicio de RMN y se usaba para soldar algunos de los componentes de las sondas de detección de los equipos. Los miembros del departamento Alfonso Caballero y Jesús Benítez aportaron respectivamente los elementos Co y Rh, mientras que el profesor Fernando de Pablos del Departamento de Química Analítica proporcionó un poco de Tl. En los casos en los que fue necesario, las muestras de los elementos se purificaron y, posteriormente, su pureza y autenticidad se comprobaron con ayuda de las técnicas convencionales de caracterización.

Hay algunos datos curiosos que reseñar, por ejemplo los relativos a las muestras de los elementos cloro y oro. El primero se obtuvo de las síntesis que se realizaban en el la-



Figura 2. Muestras de pan de oro que se han utilizado para este elemento en la TP

boratorio durante las prácticas docentes. El Au fue cedido por el profesor Francisco González García, quien fue director del Departamento de QI y Rector de la Universidad de Sevilla. Él conservaba un “librito” que contenía varias hojas de “pan de oro” que estaba en el departamento desde los años 40 del siglo xx, cuando la Facultad de Ciencias se ubicaba en la calle Laraña en las antiguas dependencias de la Universidad de Sevilla (Figura 2). De origen desconocido, no se había usado nunca y fue la muestra escogida para este elemento en la TP. Su peso no llega al gramo, pero abulta mucho y, aunque resulta muy llamativo,^[8] no es muy tentador para los amigos de lo ajeno. Romper la ampolla y recuperar el poco oro que hay dentro es una labor bastante difícil, ya que al estar sellado a vacío esta operación produciría una entrada de aire brusca, lo que convertiría al pan de oro en un finísimo polvo adherido al vidrio que resultaría muy difícil de recolectar.

Otros muchos elementos de la TP provienen de donaciones de universidades extranjeras, principalmente inglesas y estadounidenses, y fueron obtenidos por profesores del departamento de QI, que aprovecharon sus estancias científicas en estos centros para conseguirlos. Especialmente fructífera para este fin fue la estancia sabática que realizó Ernesto Carmona en Oxford durante el curso 1989-1990. En los laboratorios de química de esta universidad disponían de abundantes elementos metálicos, ya que en el grupo del profesor Malcolm L. H. Green se preparaban algunos compuestos organometálicos mediante la evaporación y posterior condensación de los átomos metálicos en estado gaseoso en presencia de los ligandos apropiados. Ernesto consiguió muestras muy puras de Y, Zr, Hf, V, Nb, Ta, W, Re, Ru, Th, U, y de varios de los elementos lantánidos. La Figura 3 muestra un fragmento de un fax relacionado con este asunto. Por otro lado, Pilar Palma y Juan Cámpora consiguieron los elementos Ga y Ni, a raíz de su estancia en la universidad de Saint Andrews, mientras que Luis Sánchez obtuvo muestras cristalinas de B, Cr, Si y Te, así como algunos lantánidos y el P blanco con ocasión de su estancia con el profesor Richard A. Jones en la Universidad de Texas en Austin, a principios del año 1990. Por último, la delegación de Sevilla de la actual Air Liquide

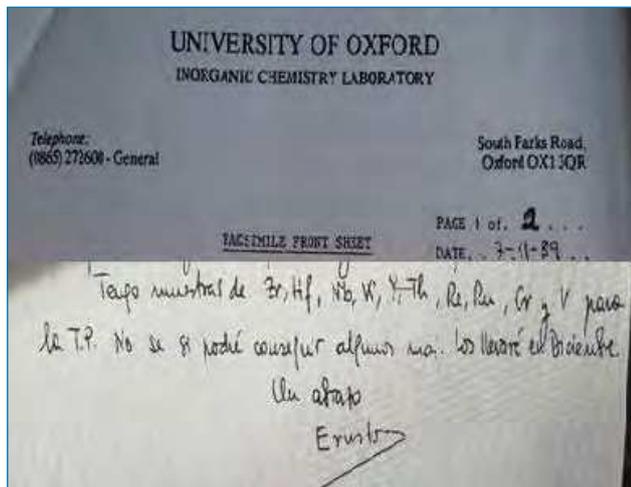


Figura 3. Fax del profesor Ernesto Carmona donde indicaba los elementos conseguidos para la TP

(entonces Sociedad Española del Oxígeno) proporcionó el Xe, mientras que las muestras de los metales Rb, Cs, Sc, La, Os, Ge, Ce, Pr, Nd y Eu fueron aportadas gentilmente por los profesores Miguel Seco de la Universidad de Barcelona y Stephen L. Buchwald del MIT de Boston, así como por la empresa comercial Strem Chemicals.

No todos los elementos que se encontraban en el departamento de QI se escogieron para exponerlos en la TP, ya que algunos fueron sustituidos por otros de mayor pureza o con apariencia física más atractiva, como por ejemplo el S y el Cu. Del primero se escogieron unos cristales de azufre nativo, provenientes de una mina de Conil de la Frontera (Cádiz), que aportó Juan Cámpora,^[9] mientras que del segundo se seleccionó una espectacular flor de cobre nativo hallado por el biólogo Jesús Sánchez en las minas de Aznalcóllar.^[10] Evidentemente, estas formas eran mucho más llamativas que las muestras de S y Cu en polvo de las que disponíamos en los laboratorios de QI.

Las muestras de los elementos metálicos que conseguimos obtener para la TP tenían diferentes formas. Las cristalinas, que lucen el particular brillo característico de los metales, eran sin duda las más notorias, aunque no suelen encontrarse en los laboratorios de Química, porque no suelen ser comerciales debido a su baja reactividad en comparación con otras formas menos compactas. Son por tanto difíciles de conseguir, aunque tuvimos la suerte de encontrarlas para muchos elementos y no dudamos en presentarlas de esta manera. Las que se muestran como polvos, virutas, gránulos, esponjas, lingotes, láminas, barras, pepitas, alambres o bolas, aunque menos vistosas, son ilustrativas ya que representan los diferentes modos en los que se suelen comercializar estos elementos. En los laboratorios de Química es frecuente encontrar virutas de magnesio, aluminio o hierro; barras y lingotes cubiertos de parafina de los elementos alcalinos y de algunos de los alcalinotérreos; pepitas de estaño; gránulos de zinc; bolas de níquel; alambres de estaño e indio; así como láminas y polvos de otros muchos elementos metálicos. En estos casos, siempre que tuvimos la ocasión de escoger entre varias formas,

seleccionamos aquéllas que mejor exhibían algunas de las interesantes propiedades de cada elemento en particular. Algunos elementos, de los que solo disponíamos de muestras en polvo, estos se compactaron mediante el empleo de la prensa hidráulica con la que obteníamos las pastillas de KBr para el infrarrojo. La aplicación de varias toneladas de presión a vacío producía pequeños cilindros que eran los que se empaquetaban en la ampolla (*vide infra*).^[11]

Las primeras ideas concretas acerca de la construcción de la tabla tuvieron en cuenta dos puntos principales: a) cómo conservar muestras reales de los elementos químicos; y b) cómo disponerlos. Con respecto al primero, era evidente que para evitar su alteración con el tiempo se tenían que guardar en recipientes herméticamente cerrados. Con objeto de darle homogeneidad a la TP se decidió empaquetar todos los elementos con el mismo formato. Se seleccionaron unas ampollas de vidrio de borosilicato, de paredes gruesas (3 mm) y alta resistencia, lo que permite observar su interior y proporciona un medio inerte que evita cualquier alteración de los elementos. Para ello, se contó con una amplia colección de estas ampollas a través de la donación que realizó Juan Gálvez, propietario de la empresa Anorsur de Sevilla (Figura 4), que además de gran amigo es nuestro suministrador habitual de material de vidrio de laboratorio. Para evitar que el calor producido pudiera alterar o evaporar los elementos sólidos y líquidos, los procesos de soldar las dos partes en las que estaba dividida la ampolla y de sellarla a vacío se efectuaron enfriando la de abajo, donde estaba depositado el elemento, a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ mediante un baño de nitrógeno líquido. Una vez soldada la caperuza a la parte principal de la ampolla (ver Figura 4), esta se sellaba a vacío. La presión residual, de nitrógeno (o argón cuando existía la posibilidad de formación de nitruros como en el caso del Li), que quedaba en la ampolla era de 10^{-3} torr, justo lo que alcanzaba la bomba Edwards con la que estaba equipada la línea de vacío/atmósfera inerte en la que se llevaron a cabo todas las operaciones de sellado. Una vez cerrada la ampolla, por razones de seguridad se dejaba que la muestra enfriada en el baño de nitrógeno líquido alcanzara la temperatura ambiente lo más lentamente posible.

En el caso de los elementos gaseosos, la presión se ajustó aproximadamente a 2 bar sobre la atmosférica a la temperatura ambiente (3 bar de presión absoluta), una presión lo suficientemente baja para que la manipulación de la ampolla de vidrio de borosilicato fuera segura y no entrañara peligro alguno, al tiempo que lo suficientemente elevada como para almacenar algunas decenas de miligramos del correspondiente elemento gaseoso. Debido a los bajos puntos de ebullición de los elementos hidrógeno, helio y neón, estos gases se empaquetaron en sus correspondientes ampollas a presión inferior a la atmosférica, con objeto de poder sellarlos fácilmente. El proceso de sellado fue realizado íntegramente por Luis Sánchez mediante el uso de un soplete de gas natural/oxígeno con el vidrio calentado a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es la técnica habitual que utilizan los soldadores profesionales de vidrio. Estos trabajos de soldadura fueron arduos y en ocasiones peligrosos ya que en el interior se depositaban elementos muy reactivos, como los

alcalinos o el fósforo blanco que arde espontáneamente en contacto con el aire, o muy venenosos, como el berilio, el talio o el arsénico. Con objeto de ofrecer la necesaria seguridad en la manipulación y reducir la posibilidad de contaminación, algunos de los elementos se empaquetaron en ampollas dobles. Ese fue el caso de, por ejemplo, el Sc, que de los elementos no radiactivos de la TP es el que tiene un mayor precio de mercado y es muy reactivo en contacto con el aire. Otros elementos inestables al aire, como los alcalinos Rb y Cs, o algunos de los lantánidos, también se empaquetaron de esa manera.

Los elementos Na y K, que tienen puntos de fusión relativamente bajos, se fundieron en sendos matraces y se introdujeron en las ampollas en estado líquido. En las condiciones en las que se efectuaron las transferencias de estos metales en estado líquido, el sodio adquirió una ligera tonalidad amarilla,^[12] mientras que la del K fue azul.^[13] Estos colores característicos son el resultado de reacciones superficiales que reflejan su identidad y se manifiestan como señales diferenciadoras. Por ello no se ha creído conveniente la eliminación de estas finas capas que se encuentran depositadas sobre la superficie de estos elementos. La misma norma se ha seguido con algunos de los restantes elementos de la TP, que también presentan una ligera contaminación superficial, principalmente formada por sus óxidos. El elemento Ga originó algunos problemas debido a su bajo punto de fusión, 30 °C, que al estar bajo vacío es algo inferior. Con el clima local, este elemento se fundía en verano y se volvía a solidificar durante el invierno. La diferencia en las densidades de ambas fases provocaba que en invierno la ampolla se resquebrajara. La solución fue depositar en la ampolla una cantidad de galio lo suficientemente pequeña para que no hiciera mucha presión sobre el vidrio, evitando de esta manera que se rompiera al solidificar.^[14]



Figura 4. Ampolla de vidrio empleada para almacenar los elementos

Finalmente, conviene señalar que el yodo empaquetado a vacío presenta un dinamismo constante que hace que los cristales de este elemento se sublimen con facilidad y se depositen en la zona más fría de la ampolla, que es la del fondo de la cuadrícula de madera en la que está situada. Si le damos la vuelta a la ampolla, podemos ver como lenta y sistemáticamente, durante el trascurso de unas pocas semanas, los cristales migran espontáneamente hacia la parte opuesta de donde estaban en un principio.^[15]

Después de casi treinta años de exposición, ningún elemento de los empaquetados parece haber experimentado transformación alguna, excepto el fósforo. El P blanco fue una donación de la Universidad de Austin, USA, y se hallaba empaquetado bajo agua. Con el paso del tiempo y la acción de la luz fue adquiriendo tonalidades más amarillentas hasta casi rojas correspondientes a la transformación a su variedad alotrópica más estable.^[16] En el año 2017 se consideró conveniente substituir la variedad de fósforo blanco por el rojo, que es el que se puede ver en la actualidad.

En relación con el segundo punto, la forma de disponer los elementos, cabe destacar la contribución del entonces estudiante de doctorado Pedro Pérez. Él realizó una pequeña maqueta de madera con la propuesta de diseño de la TP (Figura 5), maqueta que se conserva en el antiguo despacho de Luis Sánchez en el Instituto de Investigaciones Químicas en el centro de investigación CicCartuja (CSIC).^[17] Esta maqueta fue la que sirvió de base a la construcción del armazón actual, un mueble de madera de tamaño 1,92 x 1,28 m (Figura 1), obra que realizó de manera desinteresada el carpintero del servicio técnico del campus científico de Reina Mercedes.

El Departamento de QI de Sevilla tuvo a lo largo del siglo pasado una gran tradición investigadora en el campo de las arcillas. Por este motivo, se decidió que el diseño gráfico de la TP consistiera en pequeños azulejos cerámicos, que irían colocados en el fondo de cada una de las celdillas del mueble de madera destinadas a albergar los distintos elementos. El profesor Guillermo García Ramos, especialista en la materia, se ofreció desde el primer momento a asesorarnos y a introducirnos en las técnicas de



Figura 5. Maqueta original de la propuesta de construcción de la TP

elaboración de la cerámica. En primer lugar, se preparó la “galleta” de color rojizo para, a continuación, con un fumigador antiguo de émbolo de mano fabricado en latón (Figura 6; no se disponía de pistola de compresor), depositar sobre ella una fina capa de engobe^[18] que se dejaba secar. Los engobes se preparaban añadiéndoles pequeñas cantidades de óxidos coloreados (entre un 3 y 4%) para que el azulejo final adquiriera diferentes tonalidades dependiendo del tipo de elemento: violeta para los metales alcalinos y alcalinotérreos, amarillo para los metales de transición, verde para los metales de los grupos principales, rosa para los no metales, naranja para los lantánidos y actínidos y finalmente sin colorear para los gases nobles (Figura 1). Posteriormente, se procedió a pintar el azulejo sobre el engobe.

En la parte central se colocó la estructura y se utilizaron diferentes modelos para representarla con objeto de darle mayor diversidad. En la superior, de izquierda a derecha, se representó el símbolo químico, el nombre antiguo, la alegoría clásica y el número atómico. En la inferior izquierda se especificó la abundancia del elemento en la corteza terrestre y la forma en la que normalmente se encuentra en la naturaleza, mientras que el año y el nombre de su descubridor se dispusieron en la parte inferior derecha (Figura 7). Por último, con el mismo fumigador antiguo de mano, se depositaba el vidriado final sobre la manufactura anterior y el azulejo final se ponía a cocer entre 900 y 950 °C en los hornos de investigación que el grupo de arcillas del Departamento puso gentilmente a nuestra disposición. En la tarea de pintar azulejos intervinieron muchos compañeros, entre los que cabe destacar a Jesús Moreno, quien también se encargó de dibujar el retrato de Mendeleiev que encabeza el expositor de la TP (Figura 8). Los nombres de los elementos se grabaron sobre tiritas de latón que se colocaron justo en la parte inferior de cada una de las celdillas de madera de la TP (Figura 7).

En la actualidad, la TP contiene muestras reales de 83 elementos químicos, todos los que se pueden exponer y conservar sin necesidad de adoptar precauciones especiales. Entre los que las requieren está el flúor, que no se puede almacenar en vidrio debido a su alta reactividad, y constituye el único de los elementos no radioactivos que no se encuentra en nuestra TP en su estado elemental; en su lugar hay una muestra de teflón. Los veinte que faltan para componer la TP clásica de 103 elementos son muy radioactivos y en consecuencia no se pueden exponer. En su



Figura 6. Fumigador utilizado en la preparación artesanal de los azulejos de cada elemento



Figura 7. Ejemplo de azulejos de algunos elementos

lugar se muestran fotografías del elemento, de alguno de sus compuestos, o de la nota de un cuaderno de laboratorio donde se describe su detección y descubrimiento. En las últimas décadas, se han añadido a la TP quince elementos nuevos, hasta completar los 118 que se conocen hasta el presente.^[19] Todos son inestables, altamente radiactivos y se ubican a continuación del actinio. De estos elementos no se han incluido todavía las celdillas correspondientes en la TP.

Como se ha comentado al inicio, el principal objetivo de la elaboración de esta TP con elementos reales es su uso didáctico. A la mayoría de las personas les parece interesante ver con sus propios ojos qué aspecto presentan los elementos de este maravilloso alfabeto que utiliza la naturaleza para componer toda la materia que existe en el Universo. Por ello, la contemplación de la TP puede contribuir a acrecentar la motivación de los alumnos en el aprendizaje de la Química y a aumentar el interés por su estudio.

Nuestra TP con muestras reales de los elementos químicos, original y emblemático acervo científico de la Universidad de Sevilla, está colocada en el pasillo de entrada al Departamento de QI y, sin excepción, atrae la atención de todos los alumnos, profesores y visitantes que pasan por allí. Aunque no está abierta al público en general, la pueden visitar los estudiantes de otros centros educativos que soliciten el correspondiente permiso a las autoridades académicas competentes. Ver esta TP, y recibir algunas explicaciones precisas sobre ella, es una de las actividades que realizan muchos estudiantes, sobre todo alumnos de secundaria en las distintas visitas concertadas o en jornadas de divulgación. Por ejemplo, en días cercanos a la festividad de San Alberto Magno tienen lugar, en el marco de la semana de la Ciencia, las jornadas de divulgación QUIFIBIOMAT que todos los años organiza la Facultad de Química junto con las facultades del campus científico de Física, Biología y Matemáticas. Para finalizar



Figura 8. Encabezado de la TP con el retrato de Dimitri Mendeleiev



Figura 9. Muestras de oxígeno líquido, xenón líquido, cloro sólido y xenón sólido

esta historia de nuestra TP comentaremos a continuación algunas de las experiencias que se realizan durante estas visitas de divulgación.

Las ampollas de los elementos gaseosos cuyos puntos de fusión o ebullición son superiores a la temperatura del nitrógeno líquido permiten realizar experimentos interesantes, ya que al enfriarlas en un baño a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ se pueden observar dichos elementos en estado líquido, y en algunos casos también en estado sólido. Aprender la ligera tonalidad azul del oxígeno líquido, el xenón líquido o ver los elementos Cl, Kr o Xe en estado cristalino son experiencias difíciles de olvidar (Figura 9).

Las muestras de torio y de uranio, este último empujado en el isótopo 235, que se exponen en la TP, presentan una actividad radiactiva de apenas unos cuantos centelleos por segundo, cantidad muy por debajo de la que puede entrañar algún peligro para la salud, pero que hace las delicias de los estudiantes que acuden a visitar la TP provistos de un contador Geiger y observan, al acercar el aparato a estos elementos, cómo la aguja del detector se coloca ligerísimamente algo más arriba de lo que lo hace cuando miden la radiactividad que usualmente hay en su ambiente habitual. Por otro lado, el ferromagnetismo que presentan los elementos hierro, cobalto y níquel se puede comprobar fácilmente acercando un imán a las ampollas que contienen estos elementos. En invierno, este fenómeno también lo presenta el gadolinio (su temperatura de Curie es $16\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Estos jóvenes visitantes se muestran interesados por cuestiones muy diversas, como el aspecto exterior de los elementos, su estado de agregación, cuáles son metales y cuáles no; preguntan por aquellos que son más abundantes, más reactivos, más venenosos, más caros, por los que se

pueden encontrar en la Tierra en estado nativo, por los radiactivos, los magnéticos, los de mayor utilidad industrial. Algunos más avisados también se interesan por los que son esenciales para la vida y forman parte de los seres vivos, por los elementos conocidos desde la antigüedad, por los que forman moléculas o los que se disponen en redes cristalinas, etc. El interés que despiertan en ellos las respuestas a sus preguntas o la ilusión al conocer los tres elementos, V, W y Pt, con los que los españoles han contribuido a la TP, es una satisfacción que justifica, sin ninguna duda, la construcción de nuestra TP.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos los que han participado en esta historia y han contribuido a la creación de la Tabla Periódica. Se agradecen los comentarios y sugerencias recibidos, durante la redacción de este artículo, de los profesores Ernesto Carmona y Pedro Pérez.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://www.iypt2019.org/>
- [2] Eric R. Scerri, *The periodic table: its story and its significance*, Oxford University Press, 2007.
- [3] O. Val, *An. Quím.* **2015**, *111*, 109-117.
- [4] J. Elguero, P. Goya, P. Román, *La tabla periódica de los elementos químicos*, Ed. CSIC, Madrid, 2019.
- [5] <http://personal.us.es/galindo/tabla.htm>
- [6] <http://www.youtube.com/watch?v=hXdOIFdrmes>
- [7] Véase: <http://personal.us.es/galindo/078Pt01.jpg>
- [8] Véase: <http://personal.us.es/galindo/079Au01.jpg>
- [9] Véase: <http://personal.us.es/galindo/016S01.jpg>
- [10] Véase: <http://personal.us.es/galindo/029Cu01.jpg>
- [11] Por ejemplo, el cobalto: <http://personal.us.es/galindo/027Co01.jpg> o la plata: <http://personal.us.es/galindo/047Ag01.jpg>
- [12] Véase: <http://personal.us.es/galindo/011Na01.jpg>
- [13] Véase: <http://personal.us.es/galindo/019K01.jpg>
- [14] Véase el Ga sólido en: <http://personal.us.es/galindo/031Ga01.jpg>
- [15] Véase los cristales de yodo sublimado en: <http://personal.us.es/galindo/053I01.jpg>
- [16] Véase: <http://personal.us.es/galindo/015P01.jpg>
- [17] <http://www.iiq.us-csic.es/>
- [18] <http://dle.rae.es/?id=FNbSqLN>
- [19] <http://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>

El electrón diferencial (o diferenciador). ¿Para qué sirve?

Gabino A. Carriedo

Resumen: Este artículo defiende que la deducción de un átomo a partir de los cuatro números cuánticos de un llamado electrón diferenciador, es un problema artificial, innecesario y basado en reglas arbitrarias, resultando muy capaz de originar errores graves sobre el concepto y uso de la configuración electrónica. Por ello no debiera formar parte de un plan docente para química de Bachillerato ni incluirse entre los objetivos de la enseñanza de la química recogidos en los Boletines Oficiales del Estado.

Palabras clave: electrón diferenciador, configuración electrónica, números cuánticos, valencia, enseñanza de la química.

Abstract: The assignment of four quantum numbers to the so called differentiating electron, considered as the last to be “located” in the electronic configuration of an atom, may help to confuse electrons with the spin-orbitals used to obtain a good approximation to the polyatomic atom wave function. But, using those four quantum numbers to deduce which is the atom concerned is an artificial unnecessary problem based in arbitrary rules which, furthermore, leads to failures when the electronic configurations are exceptions to the *aufbau*, a case very frequent among the transition elements, the lanthanides and the actinides. Instead of helping to understand the atomic electronic structure, this problem is very capable of arising severe conceptual errors. Therefore, its inclusion in learning programs of secondary school chemistry should not be encouraged.

Keywords: differentiating electron, electron configuration, quantum numbers, valency, teaching chemistry.

INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo se viene observando la aparición en la enseñanza de la química en el bachillerato de problemas que piden la deducción de un átomo partiendo de los cuatro números cuánticos que, se supone, pertenecen a su “electrón diferenciador”, definido como el que “se añade al pasar de un elemento a otro”, o el “último electrón de un átomo”. Esos problemas pueden, a primera vista, parecer interesantes, pero, cuando se examinan los criterios propuestos para resolverlos, se encuentra que son arbitrarios y que solo conducen a respuestas “correctas” cuando se cumplen estrictamente las reglas del *aufbau* para la determinación de las configuraciones electrónicas de los átomos. Como es bien sabido, estas reglas tienen numerosas excepciones entre los elementos de transición, los lantánidos y los actínidos (la mayor parte de la Tabla Periódica). Pero, los problemas del electrón diferenciador encierran un peligro mayor: la propagación de errores conceptuales sobre la configuración electrónica de los átomos,

ya que equiparan a los electrones (partículas reales que en los átomos son indiscernibles), con los espín-orbitales (funciones matemáticas) que se utilizan para obtener una buena aproximación a la función de onda de los átomos polieletrónicos. Es cierto que el llamado *lenguaje coloquial* o distendido, es muy utilizado entre los profesores y alumnos para tratar temas mecanocuánticos realmente complejos. Por ejemplo: es frecuente hablar de “colocar” electrones en los orbitales; de orbitales “vacíos” o “llenos”; de que el orbital 4s está “por encima” o “por debajo” del 3d; que, al ionizarse un átomo, el electrón “sale” de tal orbital; o de que el electrón de valencia de litio es el 2s. Ese lenguaje es aceptable, por su evidente agilidad, solo si quien lo utiliza sabe realmente lo que está diciendo. Pero, puede estar sucediendo que, debido a su mala utilización, esté empezando, no ya a sustituir al lenguaje riguroso (mucho más árido), sino a ser considerado como si fuera conceptualmente realista. El problema del electrón diferenciador puede contribuir a empeorar esta situación.



G. A. Carriedo

Universidad de Oviedo
C/Julián Clavería 8. Oviedo 33006
C-e: gac@uniovi.es

Recibido: 29/03/2019. Aceptado: 20/05/2019.

EL ELECTRÓN DIFERENCIADOR Y SU CUESTIONABLE USO

La configuración electrónica de los átomos polieletrónicos es uno de los conceptos más importantes de la Química. Pero es esencial saber que consiste en una serie de orbitales atómicos elegidos para representar a los electrones del átomo de manera que, si se trata de describir el estado fundamental de ese átomo, conduzcan al mínimo posible de energía electrónica total.^[1] Esa elección se realiza

siguiendo las bien conocidas reglas del *aufbau* (a su vez, otra aproximación ya que tiene numerosas excepciones). Así, la configuración del Be, por ejemplo, es $(1s)^2(2s)^2$. Ésta indica que, para obtener una buena aproximación a la función de onda del átomo de Be (4 electrones) en su estado fundamental hacen falta cuatro espin-orbitales (funciones monoeléctricas) y se han elegido el orbital 1s del berilio dos veces (el $[1s, \frac{1}{2}]$ y el $[1s, -\frac{1}{2}]$) y el orbital 2s del berilio dos veces (el $[2s, \frac{1}{2}]$ y el $[2s, -\frac{1}{2}]$).^[2] No hace falta insistir en que elegir un mismo orbital más de dos veces supone repetir un espin orbital lo que conduce a un determinante de Slater nulo por lo que tal elección no puede describir ningún estado posible del átomo (es decir, la regla de Pauli).

La representación gráfica de la configuración electrónica con cajas “ocupadas” con uno o dos electrones de espines opuestos, es muy gráfica y fácil de entender para principiantes, de ahí su frecuente uso, pero, si no se utiliza correctamente, puede conducir a errores conceptuales muy difíciles de erradicar cuando se pasa a niveles más avanzados. Uno de esos errores es la insistencia en lo que se ha venido en llamar “el electrón diferenciador” que ha llegado hasta Boletines Oficiales para ser exigido a nivel de Bachillerato.^[3] Suele definirse como el “electrón que se añade al pasar de un elemento a otro”, o el “último electrón de un átomo”, o incluso “el más alejado” del núcleo, etc. Veamos, entonces, como funciona. Tomemos ahora el átomo de boro. Su configuración electrónica para el estado fundamental es $(1s)^2(2s)^2(2p)^1$. Por ello el electrón diferenciador sería el representado por uno de los orbitales 2p del boro. Dejando al margen que los 5 electrones del átomo de boro son indiscernibles (luego no hay un electrón último ni un electrón primero), y que es del todo indiferente que el espín orbital que aparece en último lugar en la configuración sea un $[2p, \frac{1}{2}]$ o un $[2p, -\frac{1}{2}]$, la pregunta relevante es ¿para qué sirve ese concepto? Más adelante veremos que, realmente, para nada. Pero, la cuestión puede complicarse más cuando, en una vuelta de tuerca, se identifica al “electrón diferenciador” con sus cuatro números cuánticos, para lo cual se hace necesario acordar todo un convencionalismo tan curioso como arbitrario.^[4]

Los orbitales se representan por cajas con sus números cuánticos y los orbitales np *deben* ordenarse, precisamente, en el orden $[n, -1]$, $[n, 0]$, $[n, +1]$ (en realidad, también podría haberse *acordado* el orden inverso del número cuántico l). Después, para los números cuánticos de espín, deben elegirse como primero el $+1/2$ (flecha hacia arriba). De este modo resulta que el electrón diferenciador del B es el $[2, 1, -1, +\frac{1}{2}]$ (nótese que, en realidad, eso correspondería a un espin-orbital y no a un electrón, por lo que se está confundiendo lo uno con lo otro).

Ahora dejemos de lado la evidente arbitrariedad de ese convenio y pasemos a la siguiente vuelta de tuerca que es plantear algo más difícil, el problema inverso, es decir: a partir de un electrón diferenciador identificar al átomo. Por ejemplo, el $[2, 1, -1, +\frac{1}{2}]$ nos llevaría al B. Nótese que el $[2, 1, -1, -\frac{1}{2}]$ nos llevaría al oxígeno, demostrando los

efectos de poner primero el espín $1/2$ o $-1/2$. De nuevo dejemos de lado los errores conceptuales derivados de identificar un electrón concreto entre los N electrones de un átomo mediante los 4 números cuánticos de uno de los N espín-orbitales correspondientes a su configuración electrónica, y concentremos nuestra atención en la utilidad real del problema. A ningún químico se le ha presentado, ni se presentará nunca en su vida profesional, el problema de identificar un átomo partiendo de 4 números cuánticos atribuidos a su “último electrón”. Es decir, *se trata de un problema artificial*, solo necesario para superar un examen donde se incluya tal pregunta. Pero, además, la solución de algunos “problemas de electrón diferenciador” puede resultar ambigua. Por ejemplo, ¿a qué átomo corresponde el electrón diferenciador $[3, 2, 2, \frac{1}{2}]$? Dado que el número cuántico principal es 3, el segundo número, un 2, apunta a un orbital d, en cuyo caso, sería un 3d. El tercer número es un 2, lo que, según las reglas acordadas, se trata del orbital d colocado en el “último” lugar (el quinto). Por lo tanto, el electrón es el “último” de un d^5 , es decir: $d_{(-2)}^1 d_{(-1)}^1 d_{(0)}^1 d_{(+1)}^1 d_{(+2)}^1$. El átomo en cuestión sería el d^5 del período 4, o sea el Mn ($4s^2 3d^5$).

Pero supongamos que *sabemos* que el cromo (grupo 6 de la Tabla Periódica) es una de las “excepciones” a las reglas del *aufbau* y que su configuración electrónica *en el estado fundamental* es $(4s)^1(3d)^5$ en lugar de $(4s)^2(3d)^4$. Entonces su “electrón diferenciador” es $[3, 2, 2, +\frac{1}{2}]$ (y no $[3, 2, 1, +\frac{1}{2}]$). Por tanto ¿a qué átomo pertenece el electrón diferenciador $[3, 2, 2, +\frac{1}{2}]$, al Mn o al Cr? *Es decir, para identificar a un átomo con el electrón diferenciador hay que saber de antemano si su configuración electrónica cumple las reglas del *aufbau* o si es una de las excepciones y, para eso, no hace falta utilizar al electrón diferenciador.* El problema no es irrelevante porque las excepciones a la regla del *aufbau* son muchas entre los elementos de transición y muchísimas entre los lantánidos y los actínidos. Tómese por ejemplo, el “electrón” $(3, 2, +1, -\frac{1}{2})$, debe ser un átomo con configuración en su capa de valencia $3d^9$. ¿Qué átomo es ese? La respuesta tentadora es el cobre, pero éste no puede ser ya que, como otra excepción al *aufbau*, su configuración para el estado fundamental es $(4s)^1(3d)^{10}$, y no $(4s)^2(3d)^9$. También podría haber sido un átomo $4s^1 3d^9$, que correspondería a un Ni muy lejos de su estado fundamental ($4s^2 3d^8$). Esas incertidumbres vienen del problema de la “ocupación” de un 3d antes que un 4s.^[5]

Quizá podría afinarse el “método identificativo del átomo” aumentando las reglas del “convenio” del electrón diferenciador, o dando alguna pista adicional. Pero, la pregunta sigue en pie ¿para qué sirve realmente un convenio tan artificioso y falto de rigor conceptual? Entonces, ¿de donde viene ese concepto y por qué se le considera lo suficientemente importante como para aparecer en los Boletines Oficiales que deben guiar la enseñanza de la química?

Revisando la bibliografía sobre el electrón diferenciador, que en su mayor parte está recogida en foros en internet donde abundan preguntas y repuestas no siempre bien fundamentadas, parece que todo pudo tener su origen en

una frase de Niels Borh introduciendo la idea de *differentiating electron* que, en la mayoría de los casos ocupa “an outer shell and not an inner one”.^[6] El concepto ha aparecido, como tal, en algún libro de texto de Química Inorgánica^[7] y ha sido utilizado para discutir sobre la más adecuada ubicación de átomos en los grupos de la Tabla Periódica.^[8,9] Por ejemplo, el He (1s)² con un orbital de valencia 1s está, sin embargo, en el bloque p con los demás gases nobles (ns)²(np)⁶. Lo que no parece es que esa idea deba servir también para “deducir” átomos a partir de supuestos “últimos” números cuánticos.

CONCLUSIONES

Por todo lo expuesto, sería muy deseable que, a pesar de lo “entretenido” que pueda resultar deducir átomos a partir de los cuatro números cuánticos de un supuesto “último” electrón, se tuviera en cuenta la arbitrariedad de sus reglas, su falta de rigor conceptual y su práctica inutilidad. El concepto de electrón diferenciador no contribuye a comprender mejor las configuraciones electrónicas de los átomos y el cociente entre su aportación y el tiempo invertido en deducciones artificiosas y conceptualmente vacías es muy pobre. Es mucho más preferible concentrarse en comprender bien el concepto de configuración electrónica, en las reglas del aufbau y en las consideraciones sobre las energía orbitales y los efectos de repulsión interelectrónica que explican las “excepciones”, como las del cromo o el cobre. Para todo ello, se recomienda la lectura de un artículo ya clásico titulado “Por qué el 4s se ocupa antes que el 3d”.^[5] Y, ya de paso, invertir más tiempo en algo tan importante como explicar el formato de la Tabla Periódica y las valencias de los átomos partiendo de su configuración electrónica.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los profesores de la Universidad de Oviedo José A. Sordo, Angel M. Pendás, Aurora Costales, Manuel Recio y Jose M. Fernández Colinas, la lectura crítica de este manuscrito y la incorporación de sugerencias útiles para su elaboración.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Téngase en cuenta que esto ya es una aproximación utilizada ante la imposibilidad de obtener la función de onda del átomo como solución exacta de la ecuación Schrödinger correspondiente.
- [2] En lugar de los números cuánticos de spin suelen emplearse las notación α y β para diferenciar entre los dos espín orbitales 1s, 2s, etc.
- [3] Véase, por ejemplo, el BOE de 15 de enero de 2019, página 2707 y el Boletín Oficial del Principado de Asturias, n.º 149, de 29-VI-2015, páginas 365-577.
- [4] Véase, por ejemplo, el recogido en el libro: J. C. Cedron y J. Robles. *Química General. Materia de Enseñanza*, Lima. Universidad Católica de Perú.
- [5] M. P. Melrose. *J. Chem. Educ.* **1996**, *73*, 498.
- [6] E. R. Scem. *A tale of seven scientist and a new philosophy of science*. Oxford University Press. 2016, pág. 123. E. R. Scem. “Selected Papers on the Periodic Table” Word Scientific Publishing, Co, Pte. Ltd. Singapore. 2009, pág 48 (*American Scientist*, vol. 85).
- [7] J. J. Lagowski. *Química Inorgánica Moderna*. Reverté S. A., 1975, pág. 33.
- [8] W. B. Jensen. *J. Chem. Educ.* **1982**, *59*, 634.
- [9] E. Scerri. Education in Chemistry. <https://eic.rsc.org/opinion/five-ideas-in-chemical-education-that-must-die-part-five/2010032.article>



Las dificultades de cristalización de cloruro de sodio (NaCl): un proyecto de investigación integrador del currículo de Ciencias en ESO y Bachillerato

Francisco Rojas Melgarejo

Resumen: Estudiamos la velocidad inicial de crecimiento de cristales de sal marina, formados por evaporación del agua a partir de una disolución saturada de esta sal. Mostramos la diferente forma de cristalización dependiendo de la estación del año en que nos encontremos, con una velocidad de crecimiento muy superior a principios de verano en comparación con la medida a inicios de otoño y una clara imposibilidad de formación de cristales de NaCl en plena estación otoñal. Estos resultados sugieren nuevos estudios para optimizar el final del período de cristalización y el inicio de la campaña de extracción de la sal formada.

Palabras clave: cloruro de sodio, sal marina, cristalización, velocidad de crecimiento, evaporación del disolvente.

Abstract: We study the initial growth rate in marine salt crystals which have been formed by solvent evaporation from its own saturated solution. We show the different crystallization process depending on the season in which we carry out this process. At the beginning of the summer, the growth rate is significantly higher if we compare it to the one obtained in early autumn. In addition, the crystallization of NaCl is not possible in mid-autumn. These results suggest further research in order to optimize the end of the crystallization period and the beginning of the extraction period of salt crystals.

Keywords: sodium chloride, marine salt, crystallization, growth rate, solvent evaporation.

INTRODUCCIÓN

Este artículo parte de la necesidad surgida a un grupo de estudiantes del IES Dos Mares de San Pedro del Pinatar, durante su participación en el VII Finde Científico 2016 celebrado los días 22 y 23 de octubre de 2016 en la ciudad de Alcobendas (Madrid). A esta feria científica nuestros estudiantes acudieron con una propuesta científica titulada «El Lenguaje de la Química en la Naturaleza» estructurada en tres talleres. Uno de ellos se basaba en un trabajo realizado en cursos anteriores^[1] y consistía en visualizar el crecimiento de cristales de cloruro de sodio (NaCl), para, con un adecuado método de captura y procesado de imagen, cuantificar la velocidad inicial de crecimiento real de los cristales formados. Se realizaron diferentes ensayos durante los meses de julio y septiembre. En ellos se reprodujo toda la secuencia de preparación de la muestra a partir de una disolución saturada de NaCl (0,38 g/ml), grabación de la secuencia de cristalización, selección del cristal a estudiar, reproducción de la secuencia, captura de imagen

a los tiempos deseados, traslado a formato de Microsoft Office Word y finalmente conversión a formato PDF. Este proceso se realizó al menos con diez-quince imágenes de cada una de las secuencias de cristalización grabada, para que los resultados y conclusiones obtenidas fueran lo suficientemente fiables.

Las circunstancias climatológicas que se dieron el fin de semana del 22 al 23 de octubre de 2016 en Alcobendas hicieron imposible el desarrollo del taller de cristalización y fue necesario explicar los motivos por los que nuestro trabajo no podía ser mostrado. La exposición de los resultados encontrados resultó más interesante que el contenido del propio taller.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este trabajo se realiza con estudiantes de 1.º de Bachillerato que han tenido un primer contacto con la Química en la asignatura de Física y Química, y con el trabajo de laboratorio, en la asignatura optativa de Ampliación de Física y Química, cuando cursan 4.º ESO. A los alumnos y alumnas que inician un itinerario académico de carácter científico resulta de interés habituarles al quehacer diario del investigador en sus múltiples facetas, con la finalidad de comenzar a emerger su futura vocación científica, pues en la mayoría de los casos resulta una tarea altamente rutinaria, reiterativa y desalentadora ya que buscar permanente soluciones a los innumerables retos que nos plantea resulta altamente agotador a la vez que retador y estimulante. El



F. Rojas
Melgarejo

Universidad de Murcia
Grupo de Química de Carbohidratos, Polímeros y Aditivos
Industriales E047-01
Calle Campus Universitario, 11
30100 Murcia
C-e: projasme@um.es
IES Dos Mares. San Pedro del Pinatar (Murcia)
C-e: francisco.rojas@murciaeduca.es

Recibido: 14/02/2019. Aceptado: 20/06/2019.

laboratorio de química permite trabajar de forma integrada las diferentes competencias básicas del currículo. El estudiante necesitará expresar de forma breve pero con total claridad tanto los objetivos que se pretende como los resultados que se obtendrán (Competencia en comunicación lingüística) y además deberá recurrir a bases de datos digitalizadas (Competencia digital) donde la información estará, en general, en lengua inglesa, destacando siempre el carácter universal del lenguaje matemático (Competencia matemática). En este trabajo se trata de resolver un problema que impide exponer un trabajo preparado y la solución debe encontrarse en un plazo de tiempo determinado. Este trabajo introduce a nuestros estudiantes en otra forma de entender la ciencia y la investigación: la resolución de problemas industriales, sociales, sanitarios o surgidos en líneas principales o prioritarias de investigación (Aprender a aprender y sentido de iniciativa y espíritu emprendedor). Para conseguir nuestro objetivo, el trabajo en grupo resulta imprescindible (Competencias sociales y cívicas). Con sólo diez componentes hay estudiantes de cuatro nacionalidades diferentes que intercambiaron su trabajo e impresiones sin generar conflictos con sus creencias culturales y/o religiosas (Conciencia y expresiones culturales).

Para la búsqueda de la solución a nuestro problema se utiliza la metodología y destrezas alcanzadas con un trabajo anterior^[1] y participa de sus objetivos generales y específicos de proyecto. Aportar a los estudiantes la visión del trabajo científico de resolver problemas que se nos plantean, mejorar líneas de trabajo o tecnologías anteriores y crear otras nuevas, así como describir y comprender los procesos que tienen lugar en la Naturaleza. Mostrar la ciencia como campo de conocimiento abierto e interrelacionado con multitud de disciplinas. Ejemplificar, mediante el cálculo de la velocidad de crecimiento de los cristales de NaCl, la utilización conjunta de diferentes conceptos de Física y Química impartidos en la etapa de Educación Secundaria Obligatoria como la cristalización (3º ESO), cálculo de velocidades (cinemática, 4º ESO), utilización de conceptos como proporcionalidad, cálculo y manejo de escalas (Matemáticas), adquisición de destrezas en el uso de herramientas para la visualización y captura de imágenes: lupa binocular, microscopio óptico, cámara de vídeo y fotografía (Biología y Tecnología). Análisis de imagen para la obtención de datos (Informática). Utilización de programas informáticos,^[2,3] para el procesado de datos, elaboración y análisis de tablas y gráficas (obtención de resultados) y redacción de informes, formato doc. y pdf, para su comunicación (Microsoft PowerPoint, Microsoft Word).

MATERIALES

Cloruro de sodio (NaCl) suministrado por Salinera Española, S. A. (San Pedro del Pinatar, Murcia), agua destilada y alcohol etílico 96% suministrados por QUIMICEN 84 (Madrid-España). Para el análisis de imagen se utilizó un dispositivo DC265 Visual Presenter de Lumens Digital Optics Inc., adaptado a una lupa estereoscópica binocular 10x

y objetivo 2x y conectados a un ordenador ACER Aspire 1312LC.

METODOLOGÍA

Tras buscar en bases de datos y consultar diferentes documentos, concluimos que la sal marina, como producto natural que es, debía estar sujeto a unas fechas concretas de explotación y recolección: producto de temporada.^[4,5,6] Estas coinciden con las fechas en las que hay más horas de luz solar y que ésta es de mayor intensidad para facilitar la evaporación del agua y la formación de cristales de NaCl.^[6,7] Este período se alarga desde finales de la primavera hasta el inicio del otoño,^[5,8] con un período de cristalización que suele iniciarse a principios de junio y finalizar la primera semana de septiembre, cuando comienza la campaña de explotación de la sal formada hasta finales de octubre o principios de noviembre. En la campaña 2016, el período de cristalización se alargó hasta el doce de septiembre, día que se inició la campaña de explotación hasta el día once de noviembre de 2016 (Datos suministrados por Salinera Española, S. A.). Cuando a lo largo de la campaña las condiciones climatológicas no son favorables (bajas temperaturas, escaso viento y elevada pluviosidad), la cristalización es más lenta y se obtiene NaCl de grano más pequeño y mayor consistencia, como en el caso de la denominada sal de invierno. Este hecho condicionará las labores de procesado a que se somete el producto inicialmente obtenido y que conducen a la fabricación de los diferentes tipos de sal.^[5,7,9,10]

Para comprobar si este argumento podía explicar el problema de cristalización surgido, se reprodujeron las secuencias de imágenes grabadas. Una secuencia se grabó el día cuatro de julio (período de cristalización de NaCl) y la otra el veintinueve de septiembre de 2016 (campaña de explotación de NaCl). En cada caso centramos nuestra atención en un cristal previamente seleccionado, tras varios rebobinados de la secuencia, y seleccionamos diferentes instantes de la secuencia de cristalización. Con las imágenes seleccionadas se procedió a la captura de pantalla, pegado en un documento de Microsoft Word y guardado en formato PDF. Para el análisis de las imágenes y medida de las dimensiones del cristal que consideramos convenientes, abrimos el programa GIMP 2.8.16,^[3] seleccionamos e importamos cada una de las imágenes en formato PDF guardada y anotamos la resolución de la imagen. Tras ampliar la imagen (normalmente 200%) se midió el cristal seleccionado mediante la herramienta «Herramienta de medida: medir distancias y ángulos» que se encuentra dentro de la pestaña «Herramientas» de la barra superior del programa. Para que el resultado de la medida sea visible en la pantalla, seleccionamos la pestaña correspondiente a «Usar la ventana de información». La imagen es ampliada una vez más (normalmente 400%) para verificar que los puntos inicial y final de la dimensión medida son adecuados. De lo contrario son corregidos, y el valor de la medida realizada en píxeles, registrada. Este protocolo de opera-

ciones se realiza con todas las imágenes seleccionadas de las dos secuencias de cristalización grabadas.

Conversión de píxeles (px) a centímetros (cm)

Las medidas realizadas permiten obtener los valores de longitud de las dimensiones objeto de estudio, tomando el píxel como unidad básica de medida de la imagen digitalizada en pantalla. Para su conversión a unidades de longitud convencionales (cm) se emplea una ecuación que requiere utilizar la resolución de la imagen.

$$L(\text{cm}) = [l(\text{px}) \div R(\text{ppp})] \times 2,54 \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde,

L (cm): longitud calculada en centímetros.

l (px): longitud medida sobre la imagen en píxeles.

R (ppp): resolución de la imagen en píxeles/pulgada.

2,54: factor de conversión entre pulgadas y centímetros.

Cálculo de la escala

Un alfiler de grosor conocido (0,60 mm) se somete a igual proceso de grabación, captura de imagen, medida y conversión a unidades de longitud convencionales que el utilizado para las imágenes de los cristales. El valor final obtenido (6,4 mm) permite calcular la escala (Ecuación 2) y obtener los valores reales de longitud de nuestros cristales, expresados en milímetros.

$$\text{Esc.: } L_{\text{dibujado}}/L_{\text{real}} = 10,668/1 \quad (\text{ecuación 2})$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las dos secuencias de cristalización grabadas comenzaron a registrar imágenes sobre las que pudimos realizar medidas en aproximadamente el mismo instante de tiempo, por lo que las imágenes y datos obtenidos en ambas secuencias fueron comparables. Se observa un diferente patrón de crecimiento dependiendo de la fecha de grabación de la secuencia de cristalización, tanto en tamaño como en velocidad de crecimiento.

Los valores experimentales reales de longitud de cristal (mm) versus el tiempo de captura (minutos) fueron representados mediante una gráfica de puntos del programa SigmaPlot® 12.0 para Windows®.^[2] Las gráficas fueron ajustadas a la función más adecuada en cada caso. La coherencia del ajuste fue valorado con el valor de R². La velocidad inicial de crecimiento real de los cristales se calculó a partir de la pendiente del tramo recto inicial, por ajuste de los datos correspondientes a la ecuación de la recta más adecuada.

Para cristales grabados en julio de 2016 (período de cristalización) se encuentra un patrón similar al descrito

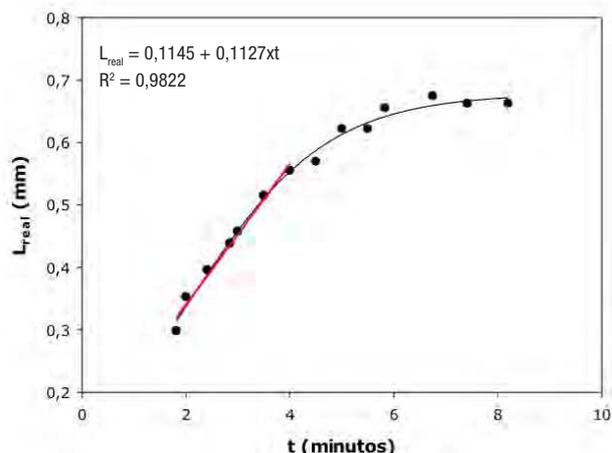


Figura 1. Velocidad inicial de crecimiento real de cristales de NaCl. Representación de la longitud real de los cristales (L_{real}, mm) frente al tiempo de cristalización (t, minutos). Datos obtenidos en fecha 4 de julio de 2016: período de cristalización de la sal marina

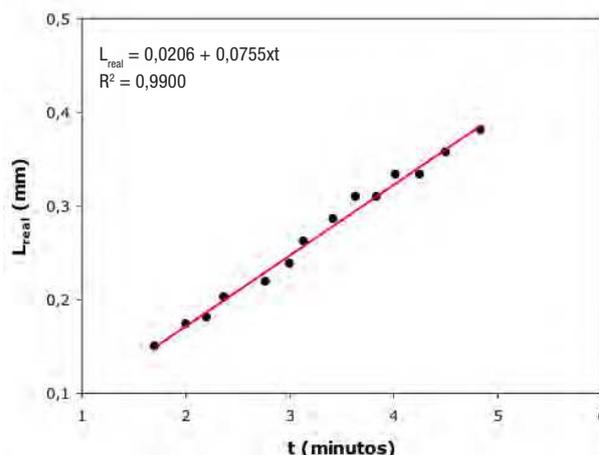


Figura 2. Velocidad inicial de crecimiento real de cristales de NaCl. Representación de la longitud real de los cristales (L_{real}, mm) frente al tiempo de cristalización (t, minutos). Datos obtenidos en fecha 29 de septiembre de 2016: campaña de extracción de la sal marina

en trabajos anteriores.^[1] La velocidad de crecimiento aumenta de forma lineal hasta un instante (4,5 minutos) en que la velocidad disminuye y muestra una cinética de saturación (Figura 1).

Para cristales grabados a finales de septiembre (campaña de extracción) sólo fue posible registrar el tramo recto de crecimiento inicial (Figura 2).

La velocidad de los cristales grabados a principios de julio ($v_0 = 112,7 \pm 6,8 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) fue 1,5 veces superior que la de los cristales grabados a finales de septiembre ($v_0 = 75,5 \pm 2,2 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), con errores de cálculo dentro de un rango permitido. El cálculo de la velocidad de crecimiento en cristales obtenidos a principios de julio mostró un coeficiente de variación (CV, %) del 6,0%, mientras que en cristales obtenidos a finales de septiembre fue sólo de un 2,9 %. Esto supone un cambio significativo en la velocidad de crecimiento de los cristales de NaCl sujeto a la estacionalidad. Las temperaturas registradas en las fechas en que

se realizaron las grabaciones no muestran grandes diferencias. El cuatro de julio se registró una temperatura de 29 °C y el veintinueve de septiembre dos grados centígrados menos, 27 °C.^[11] Otros factores como humedad relativa, número de horas de luz solar e intensidad de la misma, asociados a la estación del año en la que nos encontremos, afectan claramente de forma significativa al proceso estudiado. Durante el fin de semana del 22 y 23 de octubre de 2016, llovió de forma abundante en Alcobendas. La temperatura era baja (15-17 °C) y la humedad relativa elevada e imposibilitaba la evaporación del agua de la muestra y la cristalización de la sal. Las precipitaciones acumuladas este fin de semana alcanzaron 15 mm,^[11] un 5 % de lo que normalmente se acumula a lo largo de todo el año en San Pedro del Pinatar (≤ 300 mm).^[7] Nos encontrábamos fuera del período de cristalización de la sal marina que finalizó el doce de septiembre de 2016 y este proceso resultaba imposible. En estas condiciones se requiere de un proceso de evaporación inducida para la obtención de los cristales de NaCl.^[10]

Para los cristales de NaCl no se observa un comportamiento sigmoideal al inicio del proceso como el descrito para las moléculas de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,^[11] de mayor tamaño y complejidad estructural. Además, la velocidad de crecimiento para NaCl fue entre 2,4 y 3,6 veces mayor que la medida para los cristales de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ la cual osciló entre $v_0 = 29,3 \pm 2,1$ y $v_0 = 33,6 \pm 2,3 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. El menor tamaño de la red cristalina de NaCl y su menor complejidad estructural permiten una mayor velocidad de crecimiento de los cristales así como la no observación de un período de retardo o lag en el inicio de la formación de los cristales que caracterizó el inicio sigmoideal del patrón de crecimiento en cristales de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Los resultados obtenidos fueron expuestos a don Julio Francisco Fernández Ramos, director de Salinera Española, S. A., quien los corrobora por su coherencia con su experiencia práctica en la extracción de esta sal en sus instalaciones de San Pedro del Pinatar. Durante los meses de junio, julio y agosto se produce la fase de cristalización y precipitación de NaCl, para a primeros de septiembre iniciar la campaña de extracción de la sal formada. La campaña de extracción de sal 2016, que se inició el doce de septiembre y finalizó el once de noviembre, supuso un total de cuarenta y dos días laborales y una extracción de 99952 toneladas de sal (Datos suministrados por Salinera Española, S.A.). A partir del doce de septiembre la cristalización de NaCl no es representativa o se produce a una velocidad que no resulta rentable para la empresa. El aumento en la producción de NaCl que obtendrían por alargar el período de cristalización hasta más avanzado el mes de septiembre no compensaría las pérdidas que se producirían si se vieran obligados a adelantar el fin de la campaña de explotación de sal por la implantación de unas condiciones climatológicas desfavorables propias de la estación otoñal en la que nos encontraríamos. Todo esto suma un conjunto de factores difíciles de conjugar y por tanto de planificar,^[5,81] por lo que sería necesario realizar nuevos estudios para facilitar la toma de decisiones en este aspecto tan relevante para la empresa Salinera Española, S.A. En la actualidad, la plani-

ficación que se realiza se basa en parámetros físicos de la medida del espesor de la capa formada de NaCl y en las previsiones meteorológicas de las que se dispone para la campaña de extracción,^[7] pero no de parámetros cinéticos de velocidad de formación de cristales de esta sal, que es la base de nuestro trabajo y proporcionarían una idea real de su estado de cristalización.

CONCLUSIONES

Apenas hay experiencias publicadas de este proceso industrial ancestral^[6,7,12,13] que aporten datos cuantitativos como los que se citan en este estudio.

Los distintos estándares de aprendizaje con los que se pretenden alcanzar las competencias básicas reguladas en la normativa educativa en vigor, desde las áreas que integran el currículo de Ciencias en ESO y Bachillerato, surgen de manera lógica, integrada y coordinada, y posibilitan alcanzar los resultados que aquí se exponen.

Explicamos las diferencias de cristalización observadas para NaCl dependiendo de la fecha en que se grabó la secuencia de cristalización, la imposibilidad para la formación cristales a finales de octubre y aportamos valores cuantitativos que ilustran tales diferencias. Utilizamos un trabajo anterior^[11] para solucionar un nuevo problema. Mejoramos la metodología de estudio del proceso de cristalización así como la precisión y exactitud de los resultados obtenidos con la introducción de nuevos programas informáticos para el procesado de imagen y medida, obteniendo unas conclusiones más fiables. Los resultados, claros e inequívocos, permiten validar y consolidar el método de trabajo propuesto.

Los resultados de este trabajo permiten abrir la posibilidad de iniciar una investigación que se desarrollaría a pie de las lagunas denominadas cristalizadores, con la finalidad de estudiar la evolución de la velocidad de crecimiento de los cristales de NaCl a lo largo del período de cristalización (junio-agosto) con el objetivo de optimizar el final de dicha fase y el inicio de la campaña de explotación de la sal formada. Esto permitiría reducir y optimizar los gastos de personal, maquinaria y fuentes de energía^[7] derivados de una cristalización más larga de lo necesario y evitaría las pérdidas que se producirían, en años en que la campaña de extracción se ha iniciado demasiado tarde, por un adelanto del final de dicha extracción debido a la implantación de unas condiciones climatológicas desfavorables propias de la estación otoñal, que aunque no es habitual que se produzca, suelen darse de forma cíclica en esta región del litoral mediterráneo.

AGRADECIMIENTOS

A mis alumnos y alumnas S. Alcaraz-Gómez, O. S. Balan, C. Bouhou, M.^a I. Egea-Cegarra, A. Escudero-Albaladejo, V. Gálvez-Martínez, L. I. M. Hardoi, D. P. Japón-Llivipuma, G. Rabal-López, A. Rodríguez-Cifuentes, E. Sánchez-Gómez, a mis compañeros de trabajo que han contribuido

a su formación, al equipo directivo del IES Dos Mares por facilitar nuestra tarea en todas aquellas cuestiones solicitadas, y en especial a su directora doña M.^a J. Cantos del Viejo que activamente ha contribuido para que este trabajo pudiera materializarse con éxito. Al Excmo. Ayuntamiento de San Pedro del Pinatar (Murcia), a Salinera Española S. A. y a la Fundación Cajamurcia por su generoso apoyo a nuestra labor docente.

«A Marta, la sangre que me da la vida, y a Ruth, el corazón que la bombea».

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Rojas-Melgarejo. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: Génesis Celeste. III concurso «La química en mi entorno», convocado por la RSEQ-Sección Territorial de Murcia, 2015. Fecha de presentación 15 de enero de 2015. Premio: ACCESIT. <https://youtu.be/maNeGXN7rP8>.
- [2] Jandel Scientific. «SigmaPlot® 12.0 for Windows®». (Jandel Scientific, Ed.). Jandel Scientific: Corte Madera, 2011.
- [3] GIMP 2.8.16 (GNU Image Manipulation Program) Programa de edición de imágenes digitales. Licencia pública general de GNU, 2015.
- [4] R. P. Multhauf. *Neptune's gift, a history of common salt*. Johns Hopkins University Press, 1978. ISBN 08-018-19555.
- [5] J. F. Fernández-Ramos y J. Cifuentes-Rodríguez. *Explotación de unas salinas marítimas*. Fondos bibliográficos de Salinera Española, S. A., 2013.
- [6] Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente. *Salinas de Andalucía*, 2004. ISBN: 84-96329-23-2.
- [7] G. A. Ballesteros-Pelegrín y J. F. Fernández-Ramos. La explotación industrial de las salinas de San Pedro Del Pinatar (Murcia). *Papeles de Geografía* 2013, 57-58, 55-68.
- [8] Salinera Española, S. A. Proceso de obtención de sal a partir de agua del mar extracción de sal marina. Fondos bibliográficos de Salinera Española, S.A., 2007.
- [9] K. F. Kiple y K. Coneè-Ornelas. *The Cambridge World History of Food*, Cambridge University Press, vol. 1 (IV.B.7. «Sodium», Thomas Wilson & Clarence E. Grim), 2000.
- [10] ISAL. La sal que nutre y alimenta, 2013. www.institutodelasal.com
- [11] AccuWeather®, Inc., 2017. <http://www.accuweather.com>
- [12] O. Weller. Los orígenes de la producción de sal: evidencias, funciones y valor en el Neolítico europeo. *PYRENAE* 2004, 35 (1), 93-116.
- [13] R. Mellado-Pérez. Las salinas marítimas de San Pedro del Pinatar. *Revista Murciana de Antropología* 2007, 14, 481-514.

¿Quieres ser socio de una de las sociedades científicas más importantes de España?



Si tienes menos de 25 años, hazte socio de la RSEQ por 5 EUR

RSEQ
Real Sociedad Española de Química
www.rseq.org

La acreditación internacional de química por ANECA-RSEQ

Ana Isabel Bonilla-Calero, David Carabantes-Alarcón, Miguel Ángel Sastre-Castillo

Resumen: Los sellos internacionales de calidad de química Euro-bachelor® y Euro-master®, creados por la agencia europea *European Chemistry Thematic Network Association* (ECTN), son evaluados por la *Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación* (ANECA) en colaboración con la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) desde el año 2018 con el objetivo de conceder reconocimientos internacionales a programas formativos universitarios de universidades españolas y latinoamericanas en un proceso de evaluación en el que participan académicos, profesionales, estudiantes y técnicos de calidad, seleccionados entre las dos instituciones. 2 programas formativos universitarios han obtenido el Sello Euro-bachelor® en el 2018. Estos resultados deben renovarse dentro de 6 años al ser títulos de Grado y dentro de 4 años si hubieran sido títulos de Máster o similar.

Palabras clave: Acreditaciones internacionales, acreditación enseñanzas, química.

Abstract: The International Quality labels of Chemistry Euro-bachelor® and Euro-master®, created by the European agency *European Chemistry Thematic Network Association* (ECTN), are evaluated by the National Agency for the Evaluation of Quality and Accreditation (Spanish acronym ANECA) in collaboration with the Royal Spanish Society of Chemistry (Spanish acronym RSEQ) since 2018 with the aim of granting international recognition to university training programs of Spanish and Latin American universities in an evaluation process involving academics, professionals, students and quality technicians, selected between the two institutions. 2 university programs have obtained the Euro-bachelor® label in 2018. These results must be renewed within 6 years when they are Bachelor's degrees and 4 years if they were Master's degrees or similar.

Keywords: International accreditations, accreditation, teaching, chemistry.

INTRODUCCIÓN

El centro de estudio del presente trabajo es la acreditación internacional en química a través de la agencia internacional *European Chemistry Thematic Network Association* (ECTN), que es una certificación concedida por dicha agencia a una universidad respecto a un título de química según una serie de estándares definidos de acuerdo con los principios de calidad, relevancia, transparencia, reconocimiento y movilidad contemplados en el Espacio Europeo de Educación Superior.

La ECTN, es una asociación europea de redes temáticas de química sin ánimo de lucro registrada en Bélgica, com-

puesta por instituciones de educación superior, sociedades químicas y empresas con representantes de más de 30 países europeos diferentes y con miembros asociados en todo el mundo. En ella se trabajan una gran variedad de temas en el ámbito de química con una dimensión internacional.

En un contexto educativo en el que el docente es un guía o facilitador cuyo trabajo consiste en diseñar entornos de aprendizaje adecuados para que el estudiante los haga suyos, de tal forma que pueda aprender a partir de conocimientos previos, fomentando el aprendizaje activo y significativo mediante el uso de estrategias metodológicas centradas en el estudiante (Serrano-Pérez, J. J., 2018), se busca una cultura de calidad que se interiorice en todos los estamentos universitarios, de tal forma que se obtengan logros conducentes a un mejoramiento continuo a partir de la definición previa de una ruta de excelencia, que pase por los planes de mejoramiento que deben ser diseñados con participación de todos y monitoreados en términos de su ejecución para garantizar que los problemas detectados en los diagnósticos se solucionen y a la vez los objetivos estratégicos institucionales se consigan (González-Corredor, J. A. y Ramírez-Adarme, J. P., 2019). Una ruta de excelencia en la que los procesos de autoevaluación y acreditación a los que se someten las instituciones educativas constituyen una herramienta que permite identificar fortalezas y debilidades, que impulsan la mejora continua de la calidad de los programas de educación superior, lo que se convierte en beneficio para los estudiantes y para la sociedad (Esquivel-Ferriño, P. C., González-González, M. R., Cantú-Cár-



A. I. Bonilla-Calero¹



D. Carabantes-Alarcón²



M. Á. Sastre-Castillo³

¹ Jefa del Programa de Sellos Internacionales de Calidad de ANECA.

² Director de Evaluación de Enseñanzas e Instituciones de ANECA

³ Secretario de la Comisión de Acreditación Eurolabels® ANECA-RSEQ

C-e: abonilla@aneca.es

Recibido: 30/06/2019. Aceptado: 01/06/2019.

denas, M. E., Cantú-Cárdenas, L. G., 2014), tiene sentido establecer políticas estandarizadas en los sistemas de acreditación a nivel global, con el fin de incentivar la movilidad estudiantil a la vez que se fomenta el proceso de internacionalización de la educación, siendo necesario la validación de títulos a cargo de los distintos organismos educativos (Cruz-Tapia, M. A., 2019), como la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA), que con el objetivo de dar un paso más en promover la calidad educativa y ofrecer a las universidades españolas y de Latinoamérica un reconocimiento internacional en el ámbito de la química firma el 18 de julio del 2018 un convenio de colaboración con la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) para poner en marcha un proceso de evaluación que otorgue a los programas formativos universitarios de España y Latinoamérica calidad fuera y dentro del país en el que se imparte cada título con la concesión de los sellos de ECTN, en cuya evaluación de obtención de éstos se cuenta con estándares internacionales establecidos por académicos y profesionales de diferentes países, dado que estas instituciones tienen las siguientes misiones:

- La Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA), contribuir a la mejora de la calidad del sistema de educación superior mediante la evaluación, certificación y acreditación de enseñanzas, profesorado e instituciones www.aneca.es.
- Real Sociedad Española de Química (RESQ) promover, desarrollar y difundir en España la disciplina de la Química, tanto en su aspecto de ciencia pura como en el de sus aplicaciones [https://rseq.org](http://rseq.org).

El principal objetivo de este estudio es compartir la primera experiencia en acreditaciones internacionales en el ámbito de química de ANECA en colaboración con RESQ realizada en el año 2018, que se desglosa en los siguientes objetivos:

- Mostrar el procedimiento de evaluación de estos sellos y los agentes implicados en él, así como los criterios y directrices de evaluación que tiene cumplir un título universitario para obtenerlos y los resultados obtenidos en esta primera convocatoria piloto.
- Identificar los beneficios que aportan la obtención de estos sellos para los egresados de los títulos que los adquieren y las universidades que los imparten.

La técnica empleada para el desarrollo de este trabajo ha sido la técnica de investigación documental sobre la calidad en edición académica, que comprendió la recolección de la información procedente de documentos publicados en revistas y presentados en páginas web, a través de la búsqueda en diferentes bases de datos bibliográficas internacionales. Las bases de datos seleccionadas para la consulta han sido las siguientes: DOAJ: *Directory of Open Access Journals*, que un directorio internacional de revistas en acceso abierto creado y mantenido por *Lund University Libraries* de Suecia que recoge más de 600.000 documentos científicos a texto com-

pleto de Humanidades, Ciencias Sociales, Ciencia y Tecnología procedentes de 119 países. (<http://www.doaj.org/>); REDALYC, que es un repositorio institucional internacional en línea en diferentes idiomas de libre acceso creado por la Universidad Autónoma del Estado de México que recoge más de 200.000 registros distribuidos en las áreas de Humanidades, Ciencias Sociales, Ciencias Naturales y Exactas. (<http://redalyc.uaemex.mx/>); SCOPUS, es una herramienta informática distribuida por la editorial Elsevier de acceso a resúmenes, referencias e índices de literatura científica, técnica y médica que alcanza más 45.000.000 registros procedentes de más 19.000 revistas científicas en los siguientes ámbitos temáticos: Agricultura, Biología, Química, Geología, Economía, Negocios, Ingeniería, Salud, Ciencias de la vida, Matemáticas, Física, Psicología y Ciencias Sociales. (<http://www.scopus.com/>) y WoS, una serie de bases de datos bibliográficas multidisciplinarias con más de 6.000 revistas científicas internacionales indexadas (webofknowledge.com). Una vez realizadas las consultas de búsqueda bibliográfica relacionadas con los objetivos del presente trabajo en cada una de estas bases de datos, se han leído todos los documentos obtenidos en ellas. De éstos se citan aquellas fuentes de las que se han extraído ideas o reflexiones vinculadas directamente con los objetivos del estudio y que se exponen en el mismo.

La motivación que ha llevado a la publicación de este trabajo se debe a que en el 2018 se ha realizado el proyecto piloto de las dos primeras acreditaciones internacionales de los sellos de *European Chemistry Thematic Network Association* (ECTN) por ANECA (agencia autorizada para evaluar la obtención de estos sellos) en colaboración con RESQ.

MATERIAL Y MÉTODOS

A continuación se enumeran los diferentes agentes implicados en este proceso de evaluación:

1. **Comisión Mixta (ANECA-RSEQ)**, el órgano competente para la toma de decisiones estratégicas de la evaluación de los sellos internacionales de calidad del ámbito de química de ANECA en colaboración con RSEQ. Esta comisión está compuesta por el Director de ANECA, el Director de Evaluación de Enseñanzas e Instituciones de ANECA, la Jefa del Programa de Sellos Internacionales de Calidad de ANECA, el Presidente de RSEQ y el Editor General de *Anales de Química de la RSEQ*.
2. **Comisión técnica (ANECA-RSEQ)**, el comité encargado de velar por el buen funcionamiento de este procedimiento de evaluación de estos sellos, así como de la revisión de toda la documentación utilizada en él. Esta comisión está compuesta por representantes de ANECA y de la RSEQ.
3. **Beneficiarios**, los programas formativo universitarios oficiales de química de los ciclos de Grado y Máster o similar de universidades españolas y de Latinoamérica. Está prevista la evaluación de este sello a los programas de doctorado.

4. **Participantes**, las universidades que presentan las solicitudes de evaluación por cuántos títulos de Grado o Master o similar de química que se impartan en ellas.
5. **Panel de evaluación externa o panel de visita**, equipo compuesto por 5 expertos con experiencia en procesos de evaluación de calidad educativa universitaria: un presidente académico, un vocal académico, un vocal estudiante y un secretario (seleccionados por ANECA) y un vocal profesional seleccionado por la RSEQ.
6. **Comisión evaluadora**, el órgano formado por 6 académicos seleccionados por ANECA (uno de ellos ejerce como Presidente), 6 profesionales (uno de ellos ejerce como Vicepresidente), En la que actúa, como secretario, sin voto, un representante de ANECA. Esta Comisión es la encargada de resolver si el título evaluado obtiene o no el sello internacional de calidad de química.
7. **Comisión de apelación**, el comité formado por 2 académicos seleccionados por ANECA (uno del ámbito de química y otro del ámbito jurídico), 2 profesionales seleccionados por la RESQ (ambos del ámbito de química) y un secretario. Esta Comisión es la encargada de revisar las reclamaciones sobre la decisión del sello, que son presentadas por las universidades que ha solicitado la evaluación de estos sellos para sus títulos. Una vez analizadas, esta comisión resuelve la reclamación y tramita la decisión final.

El proceso de evaluación incluye un análisis documental, del informe de autoevaluación y evidencias presentadas por la universidad solicitante de la evaluación del sello de química durante el proceso de evaluación y una visita a las instalaciones a la universidad por el panel de expertos, durante la que se entrevista a representantes de los diferentes agentes implicados en el título a evaluar. Con la información obtenida en el análisis documental y en la visita a la universidad el panel de expertos redacta un informe de visita. La Comisión de Evaluación es el órgano competente para la adopción de la **resolución provisional** para la obtención del sello de calidad que avala el reconocimiento internacional basado en estándares europeos establecidos por una agencia compuesta por representantes del ámbito académico y profesional de diferentes países, una vez revisada la documentación aportada por el solicitante y analizada la información emitida en el informe del panel de expertos. Una vez emitido el informe provisional a la universidad, ésta tiene un plazo máximo e improrrogable de 20 días naturales a contar desde la fecha de la publicación para exponer las alegaciones que estime oportuno realizar. Examinadas las alegaciones, la Comisión de Evaluación elabora un **informe de evaluación final** en el que se incluye una propuesta de resolución definitiva de concesión del sello. En último lugar, si la universidad no estuviera de acuerdo con el resultado final podrá exponer una apelación en un plazo máximo de 30 días naturales. Esta reclamación será analizada por la Comisión de Apelación.

Los criterios de evaluación se agrupan en 4 dimensiones que a su vez se desglosan en criterios y éstos en directrices. A continuación se muestran cada uno de ellos (ANECA, 2019a):

DIMENSIÓN 1. DISEÑO Y GESTIÓN DEL TÍTULO

Criterio 1. Diseño, organización y desarrollo de la formación: El título constituye una propuesta de formación relevante en su contexto y coherente con las necesidades del mercado de trabajo y la sociedad, y su diseño contempla los resultados del aprendizaje establecidos por la agencia europea de calidad para la acreditación del sello en el ámbito del título evaluado y está actualizado y se ha implantado de acuerdo a las condiciones establecidas en el diseño de la formación y/o sus posteriores actualizaciones.

- Directriz 1.1: el título cuenta con referencias adecuadas y su implantación es relevante dentro del contexto de la institución de educación superior que lo imparte, desde el punto de vista académico, investigador y/o profesional.
- Directriz 1.2: los objetivos del título son consistentes con la misión de la institución de educación superior y han sido definidos con el objetivo de que los estudiantes alcancen un perfil de egreso coherente, que permita dar respuesta a las necesidades del mercado de trabajo y la sociedad en general.
- Directriz 1.3: la planificación del título en términos de unidades formativas, carácter, asignación de créditos, contenidos, organización temporal, metodologías de enseñanza-aprendizaje y sistemas de evaluación es congruente con la adquisición del perfil de egreso definido.
- Directriz 1.4: el título cuenta con mecanismos de coordinación docente (articulación horizontal y vertical entre las diferentes unidades formativas) que permiten tanto una adecuada asignación de la carga de trabajo del estudiante como una adecuada planificación temporal, permitiendo el desarrollo adecuado del perfil de egreso.
- Directriz 1.5: los criterios de admisión aplicados permiten que los estudiantes tengan el perfil de ingreso adecuado para iniciar estos estudios y en su aplicación se respeta el número de plazas establecidas en el diseño del plan de estudios aprobado previamente a la implantación del título.
- Directriz 1.6: la aplicación de las diferentes normativas académicas (de acceso y admisión, de adaptación, de reconocimiento de créditos, etc.) se realiza de manera adecuada y permite mejorar los valores de los indicadores de rendimiento académico.

Criterio 2. Información y transparencia: la institución dispone de mecanismos para comunicar de manera adecuada a todos los grupos de interés las características del programa y de los procesos que garantizan su calidad.

- Directriz 2.1: los responsables del título publican información adecuada y actualizada sobre las características del programa formativo, su desarrollo y sus resultados, incluyendo la relativa a los procesos de seguimiento y de acreditación.
- Directriz 2.2: la información necesaria para la toma de decisiones de los potenciales estudiantes interesados en el título y otros agentes de interés del sistema universitario de ámbito nacional e internacional es fácilmente accesible.
- Directriz 2.3: los estudiantes matriculados en el título, tienen acceso en el momento oportuno a la información relevante del plan de estudios y de los resultados de aprendizaje previstos.

Criterio 3. Sistemas de Garantía Interno de Calidad (SGIC): la institución dispone de un sistema de garantía interna de la calidad formalmente establecido e implementado que asegura, de forma eficaz, la calidad y la mejora continua del título.

- Directriz 3.1: el SGIC implementado y revisado periódicamente garantiza la recogida y análisis continuo de información y de los resultados relevantes para la gestión eficaz del título, en especial de los resultados de aprendizaje y la satisfacción de los grupos de interés.
- Directriz 3.2: el SGIC implementado facilita el proceso de seguimiento, modificación y acreditación del título y garantiza su mejora continua a partir del análisis de datos objetivos y verificables.
- Directriz 3.3: el SIGC implementado dispone de procedimientos que facilitan la evaluación y mejora de la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje.

DIMENSIÓN 2. RECURSOS

Criterio 4. Personal académico: el personal académico que imparte docencia es suficiente y adecuado, de acuerdo con las características del título y el número de estudiantes.

- Directriz 4.1: el personal académico del título reúne el nivel de cualificación académica requerido para el título y dispone de la adecuada experiencia y calidad docente e investigadora.
- Directriz 4.2: el personal académico es suficiente y dispone de la dedicación adecuada para el desarrollo de sus funciones y atender a los estudiantes.
- Directriz 4.3: el profesorado se actualiza de manera que pueda abordar, teniendo en cuenta las características del título, el proceso de enseñanza-aprendizaje de una manera adecuada.
- Directriz 4.4: (en su caso) la universidad ha hecho efectivos los compromisos incluidos en la memoria verificada y las recomendaciones definidas en los informes de verificación, autorización, en su caso, y seguimiento del título relativos a la contratación

y mejora de la cualificación docente e investigadora del profesorado.

Criterio 5. Personal de apoyo, recursos materiales y servicios: el personal de apoyo, los recursos materiales y los servicios puestos a disposición del desarrollo del título son los adecuados en función de la naturaleza, modalidad del título, número de estudiantes matriculados y competencias a adquirir por los mismos.

- Directriz 5.1: el personal de apoyo que participa en las actividades formativas es suficiente y soporta adecuadamente la actividad docente del personal académico vinculado al título.
- Directriz 5.2: los recursos materiales (las aulas y su equipamiento, espacios de trabajo y estudio, laboratorios, talleres y espacios experimentales, bibliotecas, etc.) se adecuan al número de estudiantes y a las actividades formativas programadas en el título.
- Directriz 5.3: en el caso de los títulos impartidos con modalidad a distancia/semipresencial, las infraestructuras tecnológicas y materiales didácticos asociados a ellas permiten el desarrollo de las actividades formativas y adquirir las competencias del título.
- Directriz 5.4: los servicios de apoyo y orientación académica, profesional y para la movilidad puestos a disposición de los estudiantes una vez matriculados se ajustan a las competencias y modalidad del título y facilitan el proceso enseñanza aprendizaje.
- Directriz 5.6: en el caso de que el título contemple la realización de prácticas externas, estas se han planificado según lo previsto y son adecuadas para la adquisición de las competencias del título.
- Directriz 5.7: la universidad ha hecho efectivos los compromisos incluidos en la memoria verificada y las recomendaciones definidas en los informes de verificación, autorización, en su caso, y seguimiento del título relativo al personal de apoyo que participa en las actividades formativas, a los recursos materiales, y a los servicios de apoyo del título.

DIMENSIÓN 3. RESULTADOS

Criterio 6. Resultados de aprendizaje: los resultados de aprendizaje alcanzados por los titulados son coherentes con el perfil de egreso y se corresponden con su nivel según el Marco Español de Cualificación para la Educación Superior (MECES) <http://www.mecd.gob.es/servicios-ciudadano-mecd/catalogo/educacion/gestion-titulos/estudios-universitarios/titulos-espanoles/202058.htm> o según la Clasificación Internacional Normalizada de la Educación CINE <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002207/220782s.pdf> (en los títulos de Latinoamérica).

- Directriz 6.1: las actividades formativas, las metodologías docentes y los sistemas de evaluación em-

pleados son adecuados y se ajustan razonablemente al objetivo de la adquisición de los resultados de aprendizaje previstos.

- Directriz 6.2: Los resultados de aprendizaje alcanzado satisfacen los objetivos del programa formativo y se adecúan a su nivel del MECES (títulos españoles) y CINE (títulos latinoamericanos).

Criterio 7. Indicadores de satisfacción y rendimiento: los resultados de los indicadores del programa formativo son congruentes con el diseño, la gestión y los recursos puestos a disposición del título y satisfacen las demandas sociales de su entorno.

- Directriz 7.1: la evolución de los principales datos e indicadores del título (número de estudiantes de nuevo ingreso por curso académico, tasa de graduación, tasa de abandono, tasa de eficiencia, tasa de rendimiento y tasa de éxito) es adecuada, de acuerdo con su ámbito temático y entorno en el que se inserta el título y es coherente con las características de los estudiantes de nuevo ingreso.
- Directriz 7.2: la satisfacción de los estudiantes, del profesorado, de los egresados y de otros grupos de interés es adecuada.
- Directriz 7.3: los valores de los indicadores de inserción laboral de los egresados del título son adecuados al contexto científico, socio-económico y profesional del título.

DIMENSIÓN 4. SELLO INTERNACIONAL DE CALIDAD

Criterio 8. Resultados de aprendizaje del sello internacional de calidad: los egresados del título han alcanzado los resultados de aprendizaje establecidos por la agencia de calidad internacional que concede el sello internacional de calidad.

- Directriz 8.1: los resultados de aprendizaje definidos en el plan de estudios incluyen los resultados establecidos por la agencia de calidad internacional que concede el sello internacional de calidad.
- Directriz 8.2: los resultados de aprendizaje alcanzados por los titulados satisfacen aquellos establecidos por la agencia internacional de calidad que concede el sello.

Criterio 9. Soporte institucional del título: el título cuenta con un soporte institucional adecuado para el desarrollo del programa formativo que garantiza su sostenibilidad en el tiempo.

- Directriz 9: los objetivos del título son consistentes con la misión de la universidad y su consecución se garantiza a través de un adecuado soporte en términos económicos, humanos y materiales y de una estructura organizativa que permite una apropiada designación de responsabilidades y una toma de decisiones eficaz.

El reconocimiento internacional de la calidad educativa universitaria para los egresados en química

Los títulos de Grado o Máster que superan con éxito el proceso de evaluación obtienen un sello de calidad internacional como reconocimiento de la calidad educativa basada en criterios internacionales establecidos por académicos y profesionales de diferentes países. Este reconocimiento se otorga por un período de 6 años para títulos de Grado y de 4 para títulos de Máster, pudiendo ser renovado de nuevo tras la finalización de dicho período. Los títulos que obtienen estos sellos de química reciben el correspondiente certificado -que está firmado por el Presidente de ECTN, el Director de ANECA y el Presidente de RSEQ- y es incluido en la lista de títulos con Sello ECTN <http://ectn.eu/committees/label/awards/> y de ANECA <http://www.aneca.es/Programas-de-evaluacion/Evaluacion-de-titulos/SIC/Resultados-de-los-Sellos-Internacionales-de-Calidad/Titulos-con-sello> y los informes de los títulos que han obtenido el sello son publicados en la página web de ANECA <https://cloud2.aneca.es/owncloud/index.php/s/7GAzpFcdnLzc5qg>. En el caso de títulos de fuera de España, el certificado incluye el logo de la agencia de acreditación de títulos del ámbito del sello del país donde esté radicada la institución de educación superior que oferta el título objeto de evaluación como agencia colaboradora.

Utilización del sello

Los títulos en ámbito del sello que hayan obtenido el certificado del sello internacional de calidad correspondiente, podrán utilizar el logo de dicho sello para indicar que la enseñanza cumple con los estándares europeos de la agencia europea de calidad correspondiente. El logo del sello podrá ser descargado de la página Web de ANECA para ser incluido en la página Web del título, logo que deberá dirigir, mediante un hipervínculo, a la página Web de la agencia europea de calidad internacional correspondiente. La correcta utilización del logo del sello será responsabilidad de la institución de educación superior que ofrezca el título objeto de evaluación. El uso indebido del sello o del logo podrá resultar en su inhabilitación.

En esta primera convocatoria han obtenido el sello internacional de química los títulos que se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1: Resultados de la primera convocatoria del Sello de Calidad Internacional de química Euro-bacher®

Universidad	Nombre del título universitario evaluado	Sello	Fecha expiración concesión del Sello
Universidad Autónoma de Madrid	Graduado o Graduada en Química	Euro-bacher® de química	10/05/2025
Universidad de Valencia	Graduado o Graduada en Química	Euro-bacher® de química	10/05/2025

Fuente: (ANECA, 2019).

CONCLUSIONES

Con el objetivo de dar un paso más en promover la calidad educativa universitaria y el reconocimiento internacional de los egresados en el ámbito de química se implantan los Sellos Internacionales de Calidad Euro-bacher[®] y Euro-master[®], creados por ECTN, entre las actividades de evaluación de ANECA, que firma un convenio de colaboración con RSEQ con el objetivo de incluir en los equipos de evaluación de ANECA (hasta ahora principalmente de académicos, estudiantes y técnicos de calidad) la participación de profesionales de química por la importancia del vínculo académico-profesional en estos sellos de calidad internacional.

En la convocatoria-piloto 2 programas de Grado han obtenido el sello, uno de la Universidad Autónoma de Madrid y otro de la Universidad de Valencia. A la segunda convocatoria (2019) se han presentado a evaluación 4 programas de Grado.

La validez de estos resultados tiene una limitación en el tiempo de 6 años para títulos de Grado o similar y de 4 para títulos de Máster o similar. Es por tanto imprescindible mantener estos resultados actualizados en la medida que se pueda: el mundo académico es muy fluido y hay que mantener la calidad educativa a través de un constante proceso de mejora continua.

Los ventajas que aportan la obtención de estos sellos a los egresados de los títulos que consiguen este reconocimiento y a la universidad que lo imparten son varios. Algunos de ellos son: garantizar que un título con alguno de estos sellos de química cumple criterios de calidad establecidos más allá de las fronteras del título evaluado, acordados por agencias internacionales de aseguramiento de calidad en educación superior, basándose en estándares internacionales reconocidos por empleadores de Europa. Estos sellos reconocen la calidad del título dentro y fuera del país donde se imparte, siendo este reconocimiento un incentivo para potenciales estudiantes para elegirlo, porque esta acreditación ofrece información fiable sobre la calidad de los títulos que obtienen un sello internacional de calidad, lo que beneficia a la universidad que lo imparte. Estos sellos incrementan las probabilidades de inserción laboral de los egresados de títulos con algunos de ellos, porque asegura a los empleadores que estos egresados han adquirido conocimientos y competencias prácticas basadas en estándares internacionales de la educación en el ámbito de química.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANECA (2019a). *Criterios de evaluación de los Sellos Internacionales de Calidad*. Disponible en: [https://cloud2.aneca.es/owncloud/index.php/s/VYKqLoDaX7DTgVz?path=%2F1.%20Documentaci%C3%B3n%20General%20\(procedimiento%20y%20criterios%20de%20evaluaci%C3%B3n\)#pdfviewer](https://cloud2.aneca.es/owncloud/index.php/s/VYKqLoDaX7DTgVz?path=%2F1.%20Documentaci%C3%B3n%20General%20(procedimiento%20y%20criterios%20de%20evaluaci%C3%B3n)#pdfviewer) [Consulta: 21 de junio de 2019].

ANECA (2019b) *Listado de títulos universitarios con Sello Euro-labels*. Disponible en: <http://www.aneca.es/Programas-de-evaluacion/Evaluacion-de-titulos/SIC/Resultados-de-los-Sellos-Internacionales-de-Calidad/Titulos-con-sello> [Consulta: 30 de junio de 2019].

Cruz-Tapia, M. A. (2019). "Internacionalización en la Educación Superior: Perspectivas y desafíos". *Latin American Journal of International Affairs*. Disponible en: <https://www.lajia.net/lajia/article/view/76/56> [Consulta: 30 de junio de 2019].

González-Corredor, J. A. y Ramírez-Adarme, J. P. (2019). "Caracterización de instituciones académicas que dinamizan mediante la gestión de recursos, la educación superior en Colombia", *Horizontes Empresariales*, vol. 18, núm 1.

ECTN (2019) *Listado de títulos Euro-bacher[®] y Euro-master[®] evaluados por todas las agencias autorizadas por ECTN*. Disponible en: <http://www.aneca.es/Programas-de-evaluacion/Evaluacion-de-titulos/SIC/Resultados-de-los-Sellos-Internacionales-de-Calidad/Titulos-con-sello<http://ectn.eu/committees/label/awards/> [Consulta: 30 de junio de 2019].

Esquivel-Ferriño, P. C., González-González, M. R., Cantú-Cárdenas, M. E., Cantú-Cárdenas, L. G. (2014). "Acreditación como un proceso en la mejora continua en una carrera profesional del área de ciencias". *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*. Disponible en: [file:///C:/Users/visita.ANECA/Downloads/113-511-1-PB%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/visita.ANECA/Downloads/113-511-1-PB%20(2).pdf) [Consulta: 13 de junio de 2019].

Serrano-Pérez, J. J. (2018). "Aprender física y química "jugando" con laboratorios virtuales". *Anales de química*, vol.114, núm 1.

Enlaces:

ANECA: www.aneca.es

DOAJ: www.doaj.org

ECTN: www.ectn.eu

RSEQ: www.rseq.org

REDALYC: www.redalyc.uaemex.mx

SCOPUS: www.scopus.com

WoS: www.webofknowledge.com

XXXVII Reunión Bienal de la RSEQ, Donostia-San Sebastián, 2019

Coincidiendo con la celebración del primer centenario de la IUPAC, del 26 al 30 de mayo de 2019 se celebró en el palacio de congresos Kursaal de Donostia-San Sebastián la XXXVII Reunión Bienal de la RSEQ, organizada por el Departamento de Química Orgánica I de la Universidad del País Vasco. La reunión se inició la tarde del domingo y fue precedida por la asamblea de la RSEQ. Tras la breve apertura protocolaria se dio paso al acto de entrega de los Premios Lilly, para concluir con la conferencia inaugural de Frances H. Arnold (California Institute of Technology, premio Nobel de Química 2018), con un auditorio completo. El resto de conferencias plenarias fueron impartidas por Paul Chirik (Princeton University), Anne Andrews (Semel Institute, UCLA) y Makoto Fujita (University of Tokio), además de los galardonados con la Medalla de Oro de la RSEQ en el 2017 y 2018 (Claudio Palomo y Jesús Jiménez Barbero).

El grueso de las sesiones científicas se distribuyó en 21 Simposios en torno a diversas temáticas de actualidad que acogieron 83 conferencias invitadas, 198 comunicaciones orales y 194 *flash* en 5 salas en paralelo. La presencia de asistentes a las charlas fue en general muy elevada y activa. Hubo además un total de 427 posters. La participación puede considerarse un éxito: de los más de 1.000 participantes inscritos, alrededor de 450 fueron estudiantes de doctorado, y de ellos más de 376 han recibido beca. Agradecemos el esfuerzo realizado por los Grupos Especializados y las Secciones Territoriales de la RSEQ en este ámbito.

Por otra parte, merece destacar que 49 de las conferencias invitadas fueron impartidas por ponentes internacionales de primerísimo nivel, lo que viene a consolidar la importante presencia internacional en esta cita siguiendo la tendencia ya marcada en ediciones previas. Queremos agradecer la gran labor realizada por los coordinadores y



La premio Nobel de Química 2018, Frances H. Arnold, durante su conferencia

Todas las noticias deberán enviarse a la Secretaría de Publicaciones pyanezs@ucm.es
Su publicación es discrecional al Comité Editorial de *Anales*.



Participantes de la sesión de pósteres

coordinadoras de simposio en atraer ponentes tan notables. Tampoco faltaron a la cita las empresas, editoriales, y otras instituciones que mostraron sus productos y servicios *in situ*.

El principal objetivo que nos marcamos cuando asumimos la organización de la Bienal fue que el congreso mostrara la vitalidad y pujanza de la química española, aspecto que creemos se ha logrado. Desde la organización

agradecemos el apoyo recibido de la RSEQ y de los miembros del comité científico, así como la magnífica respuesta de la comunidad química española. Para nosotros ha sido una satisfacción haber podido contribuir.

CLAUDIO PALOMO
Universidad del País Vasco

Presentación del número especial de *Anales de Química* dedicado al Año Internacional de la Tabla Periódica

El viernes 10 de mayo de 2019 se presentó el número especial de la revista *Anales de Química* dedicado al año internacional de la Tabla Periódica y a su 150 aniversario. El acto se celebró en el salón de actos de la Facultad de Químicas de la Universidad Complutense. La profesora Mercedes Gómez Bautista, vicerrectora de Transferencia del Conocimiento y Emprendimiento de la UCM presidió el acto, junto al profesor Francisco Ortega, decano de la Facultad de Ciencias Químicas de la UCM, el profesor Antonio M. Echavarren, presidente de la Real Sociedad Española de Química y el profesor Gabriel Pinto, de la Universidad Politécnica de Madrid.

Durante la presentación de este número especial el profesor Pascual Román de la Universidad del País Vasco impartió la conferencia titulada “¿Quién fue el padre de la tabla periódica de los elementos químicos?”. Los profesores Ana López de la Universidad de Zaragoza, Félix Zamora de la Universidad Autónoma de Madrid, Kilian Muñoz del ICIQ (Tarragona) y Marta Mosquera de la Universidad de Alcalá hablaron sobre cuatro artículos



De izda. a dcha.: Gabriel Pinto, Francisco Ortega, Mercedes Gómez, Antonio M. Echavarren



De izda. a dcha.: Pascual Román, Manuela Martín, Inés Pellón, Gabriel Pinto

incluidos en el número: “Osmio - El más noble de los metales”; “Antimonio. “Antimoneno” su alótropo de marca España”; “Yodo. El elemento químico del vapor violeta” y “Litio. El elemento sólido más ligero capaz de flotar en el agua”, respectivamente.

El número especial de *Anales de Química* contiene 120 artículos (uno por cada elemento conocido más tres elementos por descubrir), y dos artículos, uno sobre Mendeléiev y el segundo sobre la tabla periódica de EuChemS que resalta la escasez y disponibilidad de los elementos químicos naturales. Este número ha sido editado por el profesor

Gabriel Pinto, junto a los profesores Manuela Martín, Inés Pellón y Pascual Román. La RSEQ y el comité editorial de *Anales de Química* agradecen el enorme esfuerzo y la magnífica labor que han hecho para editar este número.

Por último, la página web de *Anales de Química* tiene una tabla periódica interactiva en la que, pinchando en un elemento se accede al correspondiente artículo de este número especial.

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

La Facultad de Química de la Universitat de València y la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid obtienen el sello Eurobachelor® en Química

La Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación y la Real Sociedad Española de Química (RSEQ), con fecha 18 de julio de 2018 suscribieron un Convenio para la evaluación de enseñanzas en el ámbito de la Química dirigida a acreditar programas oficiales de nivel Grado y Máster de acuerdo con los estándares de la European Chemistry Thematic Network Association (ECTN) para conceder los sellos EUROBACHELOR® y EUROMASTER® en el marco del programa de Sellos Internacionales de Calidad de ANECA.

La Facultad de Química de la Universitat de València y la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid han sido las primeras en participar en la evaluación de la ANECA, y las dos han obtenido el reconocimiento sin prescripciones, por lo que el sello tiene una validez de seis

años. El estudiantado que se gradúe el 2019 en cualquiera de estas dos Facultades ya lo hará con este sello.

El acto de entrega se celebró en Madrid el día 19 de junio de 2019. El acto, incluido dentro de la “III Jornada sobre los Sellos Internacionales de Calidad y su desarrollo en España y Latinoamérica”, ha sido organizado por la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA), el Instituto de Ingeniería de España (IIE) y la Real Sociedad Española de Química (RSEQ).

La jornada contó con la presencia del profesor José Manuel Pingarrón, Secretario General de Universidades, el profesor José Arnáez, director de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA) y el profesor Miguel Á. Sierra, Editor General de *Anales de Química* en representación de la Real Sociedad Española de Química.



La profesora Adela Mauri i Aucejo Decana de la Facultat de Química y la profesora Isabel Vázquez Navarro Vicerrectora de Estudios y Política Lingüística de la Universitat de València recogen el Diploma acreditativo de la concesión del Eurolabel® de Química



El Decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid, profesor José M.^a Carrascosa y el Vicerrector de Docencia, Innovación Educativa y Calidad, profesor Juan Antonio Huertas recogen el Diploma acreditativo de la concesión del Eurolabel® de Química

Por parte de la Universitat de València recogieron el diploma acreditativo del Sello de Calidad Eurolabel® en Química las profesoras Adela Mauri i Aucejo Decana de la Facultat de Química e Isabel Vázquez Navarro Vicerrectora de Estudios y Política Lingüística

Por parte de la Universidad Autónoma de Madrid recogieron el diploma acreditativo del Sello de Calidad Eurolabel® en Química el profesor José M.^a Carrascosa Decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid y el Vicerrector de Docencia, Innovación Educativa y Calidad, profesor Juan Antonio Huertas.

Los Sellos Chemistry Quality Eurabel® se conceden a una universidad respecto a un título de Química de grado

o máster. Este Sello Internacional es un certificado concedido a una universidad respecto a un título de Química evaluado según una serie de estándares definidos, de acuerdo con los principios de calidad, relevancia, transparencia, reconocimiento y movilidad contemplados en el Espacio Europeo de Educación Superior. Además, reconoce la calidad del título dentro y fuera del país donde se imparte, siendo este reconocimiento un incentivo para potenciales estudiantes para elegirlo. La acreditación ofrece información fiable sobre la calidad del título, y asegura a los empresarios que los conocimientos y las competencias prácticas de los titulados cumplen una serie de estándares internacionales de la educación en la rama de la Química.

La Real Sociedad Española de Química inaugura en Córdoba su serie de conferencias “Química para la sociedad”

Con el fin de acercar la química a la sociedad y, en particular, a los jóvenes, para despertar vocaciones científicas, la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) inauguró el pasado 21 de marzo en Córdoba la serie de conferencias “Química para la sociedad”, que este año ha sido impartida por el Dr. Rubén Martín Romo, Group Lider en el ICIQ y profesor de Investigación de la Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados (ICREA) cuyo título fue, “Nuevas reacciones catalizadas por níquel».

Con motivo de la declaración de 2019 como Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos

por la UNESCO, la celebración de esta jornada en la Universidad de Córdoba cuenta con la colaboración de la Facultad de Ciencias y de la Sección Territorial de Andalucía Occidental de la RSEQ.

Además de este acto al que acudió profesorado y estudiantes de los centros de Enseñanza Secundaria, la RSEQ celebró en el Rectorado una sesión ordinaria de su Junta de Gobierno que habitualmente se celebra en Madrid. Entre los temas a tratar en la misma destaca la aprobación de los premios nacionales a la excelencia investigadora RSEQ 2019 y de la sede para la celebración de la XXXVIII Reunión Bienal de 2021.



De izquierda a derecha, Antonio M. Echavarren, presidente de la Real Sociedad Española de Química, Rubén Martín Romo, José Carlos Gómez Villamandos, rector de la Universidad de Córdoba, Manuel Blázquez Ruiz, vicepresidente de la Sección Territorial Andalucía Occidental de la Real Sociedad Española de Química

ChemPubSoc Europe

Esta reseña, remitida por el Dr. Haymo Ross se publica en inglés para mantener su espíritu original. Da una visión general de las personas que trabajan para que las revistas editadas por ChemPubSoc Europe, de la que la Real Sociedad Española de Química es copropietaria, sean posibles. Sirva también esta reseña para recordar a todos los socios que una parte importante de los ingresos de esta sociedad,

que se utilizan para financiar las actividades de las secciones territoriales y los grupos especializados, derivan de los beneficios de nuestra participación como copropietarios de ChemPubSoc Europe. Por ello es importante que consideréis publicar en las revistas de este consorcio.

MIGUEL Á. SIERRA



© 2019 Real Sociedad Española de Química

May I introduce you to the ChemPubSoc Europe journal editors?

The ChemPubSoc Europe family of journals comprises 15 journals and an international magazine covering all fields of chemistry. They are run by professional editors who work closely with each other. Think of this group of editors as a chamber orchestra: each of them are masters of their instrument and the conductor ensures that their performance as an ensemble is outstanding.

The picture represents Haymo Ross conducting the “ChemPubSoc Europe Orchestra”. Using the words of Pau Casals “The most perfect technique is that which is not noticed at all”.



Haymo Ross, Editor-in-Chief of Chemistry—A European Journal, studied chemistry at the Technische Universität Braunschweig and the Universität Kiel where he received a doctoral degree in organic chemistry in 1997. In the same year, he joined Wiley-VCH as a member of the *Angewandte Chemie* editorial team.

From 2000 to 2017 he was a Deputy Editor of *Angewandte Chemie* and from 2003 to 2017 he was the Editor-in-Chief of the *European Journal of Organic Chemistry* (EurJOC). He joined *Chemistry—A European Journal* as Neville Compton’s successor in October 2017.



Vera Köster studied chemistry and received her Ph.D. from the University of Bielefeld, Germany, in 2003. She joined Wiley-VCH in 2001. Here she has worked on *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* and on several journals, including *Chemical Engineering & Technology* and *Clean—Soil, Air, Water* and has been **Editor-in-Chief of ChemistryViews.org** since its inception in 2010.

In 2012, **Vera Köster** has been awarded the **Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh, German Chemical Society) Prize for Journalists and Writers**. The prize is awarded for outstanding contributions to the communication of chemistry to a broader audience. Köster is honored for her role in the planning, development, and running of this website, *ChemistryViews.org*, and its associated online magazine, *ChemViews*.



Ruben Ragg, Editor-in-Chief of ChemBioChem, studied biomedical chemistry at the Johannes Gutenberg University Mainz and graduated under the supervision of Klaus Müllen. He obtained his PhD in 2016 from the Max Planck Graduate Center Mainz working with Wolfgang Tremel on enzyme-mimetic catalysis and joined Wiley-VCH in April 2016, initially for *Chemistry-A European Journal* and *ChemistrySelect*. Ruben left *Chemistry-A European Journal* in December 2017 and took on a new role at *ChemBioChem*.



Michael Rowan, Editor-in-Chief of ChemCatChem, studied chemistry at the University of East Anglia and completed his MChem in 2002. He earned his PhD studying the design and synthesis of transition metal catalysts under the supervision of Carl Redshaw. Michael joined Wiley-VCH in the winter of 2006 and

worked for *Chemistry—A European Journal* before joining *ChemCatChem* in 2011.



Kate Lawrence, Editor-in-Chief of ChemElectroChem and ChemistryOpen, completed her Master's degree in Chemistry for Drug Discovery and Ph.D. in Chemistry at the University of Bath, UK, supervised by Prof. Tony James and Prof. Frank Marken. She also spent some time with the group of Prof. Jianzhang Zhao at the State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, China. Her main research focus was on the synthesis and functionalization of carbon nanoparticles for fluorescence and electrochemical sensing applications, which formed the basis of her current scientific interests, spanning materials science, physical and electrochemistry, as well as device fabrication and real-life applications.



David Peralta, Editor-in-Chief of ChemMedChem, studied chemistry and German culture and language at the Ateneo de Manila University, Philippines (BSc Chem 2006, MSc Chem 2009). There, he taught various courses in chemistry and science and society while finishing his MSc degree, focusing on organic, analytical, and biochemistry. In 2009, he moved to Germany for his PhD at the German Cancer Research Center (DKFZ), in the research group of Prof. Tobias Dick, where he discovered a mechanism for the H₂O₂-sensitivity of the moonlighting enzyme glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (GAPDH). In 2015, he earned his Dr. rer. nat. in biosciences/biochemistry from the DKFZ and the Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Shortly before his doctoral defense, he joined Wiley-VCH in 2014 as an Assistant Editor for both *ChemMedChem* and *ChemistryOpen*, and later also *ChemistrySelect*. He became Managing Editor of *ChemMedChem* in 2016, and has been its Editor-in-Chief since July 2017.



Greta Heydenrych, Editor-in-Chief of ChemPhysChem, ChemPhotoChem as well as Batteries & Supercaps, has been with Wiley-VCH since 2007. Starting out as an Assistant Editor for the ChemPubSoc Europe journal *ChemPhysChem*, today she is Editor of *ChemPhysChem*. Her work also entails the development of our society publishing programme, resulting in the recent launches of *ChemElectroChem*, *ChemPhotoChem*, *Batteries & Supercaps* and *ChemSystemsChem*. Greta did her Ph.D. at the University of Stellenbosch on homogeneous catalysis and computational chemistry under the tutelage of Jan Dillen and Helgard Raubenheimer. In the year before joining Wiley-VCH, she was a post-doc at the Philipps-Universität Marburg in the group of Gernot Frenking, where she studied structure-property relations of small molecules and organometallic compounds.



Anne Deveson, Editor-in-Chief of ChemistrySelect and Acting Editor of ChemPlusChem, obtained her B.Sc. in Chemistry from the University of East Anglia (UEA) in 1991. She went on to do a Ph.D. in the field of bioinorganic chemistry under the supervision of Annie Powell, also at UEA. In 1995 she moved to

Germany to do postdoctoral research on copperchalcogenide clusters in the group of Dieter Fenske at the Universität Karlsruhe. In October 1997 she joined Wiley-VCH as part of the editorial team for *Chemistry-A European Journal*. She was promoted to Deputy Editor of *Chemistry-A European Journal* in 2002 and took on the additional role of Editor of *ChemistrySelect* in May 2016. She was made Acting Editor of *ChemPlusChem* in January 2019.



Jonathan Faiz, Deputy Editor of ChemPlusChem, studied at the University of Oxford, where he carried out his Part II research with Harry L. Anderson. He obtained his PhD (supervised by Zoe Pikramenou) from the University of Birmingham in 2005, and carried out postdoctoral research in Birmingham (2005-2006) and with Jean-Pierre Sauvage at the Université Louis Pasteur, Strasbourg (2006-2008), he joined the editorial team of *Angewandte Chemie* in 2008. He moved to *ChemPlusChem* in January 2019 and is also Deputy Editor of *ChemistrySelect*.



Francesca R. Novara, Deputy Editor of ChemistryOpen, studied chemistry at Sapienza Università di Roma (Italy), and graduated in 2004 under the supervision of Maurizio Speranza. She obtained her PhD in 2010 from the Technische Universität Berlin under the supervision of Helmut Schwarz, working on enantioselective reactions in the gas phase. She joined Wiley-VCH in 2010 and *Chemistry—A European Journal* in February 2011.



David J. Smith, Editor-in-Chief of ChemSusChem, obtained his PhD from the University of Nottingham in 2007 under the supervision of Neil Champness and joined Wiley-VCH in 2008, initially working on *Angewandte Chemie* and later on the launch of *ChemCatChem*. From 2011, David worked at the American Chemical Society before returning to Wiley-VCH in September 2014 to join *Chemistry—A European Journal*. He has been Editor in Chief at *ChemSusChem* since 2016.



Anne Nijs, Editor-in-Chief of EurJOC, studied chemistry at RWTH Aachen University (Aachen, Germany) and obtained her PhD in 2011 under the supervision of Carsten Bolm working in the area of asymmetric transition-metal catalysis. She joined Wiley-VCH in September 2011 as Assistant Editor of *Chemistry—A European Journal*, and she continued working for the journal as Associate Editor one year later. In May 2016, she moved to the *European Journal of Organic Chemistry* as Deputy Editor, where she was promoted to Managing Editor in October 2017. Since July 2018, she has been serving as the Editor-in-Chief of the journal.



Preeti Vashi, Editor-in-Chief of EurJIC, obtained her PhD in bioinorganic chemistry at the University of the Witwatersrand (Johannesburg, South Africa) under the supervision of Professor Helder Marques. She began freelancing as a language polisher for the European Journal of Inorganic Chemistry (EurJIC) in 2000 during her studies. In March 2004, she moved to Germany to officially join the EurJIC editorial team and became Editor in 2018.

HAYMO ROSS

Editor-in-Chief of *Chemistry—A European Journal*

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

The advertisement features a collection of journal covers from the RSEQ family. At the top right is the RSEQ logo. Below it, several journal covers are displayed, including *Chemistry A European Journal*, *ChemPlusChem*, *ChemistryOpen* (marked as an Open Access journal), *ChemViews* (ChemPubSoc Europe Magazine), *EurJOC* (European Journal of Organic Chemistry), *EurJIC* (European Journal of Inorganic Chemistry), *ChemBioChem*, *ChemSusChem*, *ChemCatChem*, *ChemPhysChem*, and *ChemElectroChem*. Some covers also feature 'Online Magazine' labels.

Visita de Bibiana Campos Seijo editora de *C&E*

A principios de junio, Bibiana Campos Seijo impartió conferencias en el Instituto de Química Médica CSIC e ICIQ.

A través del siguiente enlace, se puede el texto que, con motivo de su estancia en España, Bibiana Campos publica en el número 23 del *C&E: A week in Spain by Bibiana Campos Seijo*.

[A week in Spain by Bibiana Campos Seijo](#)



De izquierda a derecha: Pilar Goya IQM-CSIC y presidenta de EuChemS, M.^a de Carmen de la Torre IQOG-CSIC y miembro del Consejo Editorial de *Anales de Química*, Bibiana Campos Seijo y Javier García Martínez (IUPAC), posan con el número monográfico de *Anales de Química* dedicado a la Tabla periódica y la insignia de la RSEQ.

Medallas del Grupo Especializado de Química Orgánica 2019

El Grupo Especializado de Química Orgánica concede anualmente entre sus socios, en convocatoria abierta, la Medalla Félix Serratosa, la Medalla Ignacio Ribas y la Medalla José Barluenga.

Los galardonados de este año son:

Medalla Félix Serratosa: profesor Miguel Á. Sierra (UCM).

Medalla Ignacio Ribas: doctor Javier Rojo (IIQ-CSIC).

Medalla José Barluenga: profesor David González (UAM)

MEDALLA FÉLIX SERRATOSA



Miguel Á. Sierra. Nacido en Villamiel (Toledo) en 1960. Doctor (UCM, Cum Laude, Premio Extraordinario) en 1987. Profesor Ayudante en 1987, post-doc en la Colorado State University (profesor Louis S. Hege-dus, síntesis orgánica usando metales de transición) 1988-1989. Profesor Titular de Química Orgánica 1990. Catedrático Habilitado de Química Orgánica en 2003 y Catedrático de Química Orgánica en 2005. En la actualidad es director del grupo de Química Bio-Organometálica de la UCM (calificado en 2018 como Excelente 96/100 por la Agencia Nacional de Evaluación de Investigación, ANEP) y coordina el Centro de Innovación en Química Avanzada (ORFEO-CIN-QA). Asimismo, es director del Programa de Doctorado en Química Orgánica de la Universidad Complutense de Madrid.

Ha publicado más de 200 artículos científicos y es autor de cuatro libros y cinco patentes. Desde 2001, ha desarrollado proyectos de I+D conjuntos con distintas empresas agroquímicas nacionales e internacionales, así como con el Ministerio de Defensa de España, actuando como asesor del Laboratorio de Verificación de Armas Químicas español (LAVEMA), laboratorio de referencia de la Organización para la prohibición de Armas Químicas (OPAQ).

Ha sido miembro del Comité Científico Consultivo de la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas con sede en La Haya (2002-2009), secretario del Grupo de Química Orgánica de la Real Sociedad Española de Química, Miembro de la junta de Gobierno de esta Sociedad (2006-2012) y Miembro Honorario de la Sociedad Química Argentina.

Ha recibido la Cruz del Mérito Militar con distintivo blanco (2003) y el Premio Ignacio Ribas del Grupo de Química Orgánica de la RSEQ (2013). Ha dirigido 23 Tesis Doctorales (dos de ellas con Premio Extraordinario de Doctorado) con 9 tesis en curso.

En la actualidad es Editor General de *Anales de Química*, la revista de la Real Sociedad Española de Química, y pertenece al comité editorial del *European Journal of Organic Chemistry*.

MEDALLA IGNACIO RIBAS



F. Javier Rojo estudió Ciencias Químicas en la Universidad Autónoma de Madrid donde obtuvo el doctorado en 1995 bajo la supervisión del Profesor Juan Carlos Carretero. Posteriormente, realizó dos estancias postdoctorales, en la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo, Francia (1995-1898) bajo la supervisión del profesor Jean Marie Lehn y en Boston College, Boston, EE. UU. (1998-1999) con el profesor Larry W. McLaughlin. En el año 2000 se incorpora al Instituto de Investigaciones Químicas del CSIC en Sevilla con un contrato de reincorporación de doctores (2000-2001) y posteriormente como Investigador Ramón y Cajal (2001-2004). En mayo de 2004 obtiene una plaza permanente como Científico Titular del CSIC promocionando a Investigador Científico en 2011. De mayo de 2012 a noviembre de 2017 fue Coordinador del Área de Ciencia y Tecnologías Químicas del CSIC y desde febrero de 2018 es el director del Centro de Investigaciones Científicas Isla de la Cartuja (cicCartuja).

Javier Rojo ha publicado 79 artículos en revistas como *Nature Chemistry*, *Nature Communications*, *JACS*, *Angewandte*, *Chemical Science*, etc., con más de 3675 citas y un índice h=32. Su investigación se ha centrado en el desarrollo de estrategias sintéticas para la preparación de sistemas multivalentes, fundamentalmente de carbohidratos, con el fin de obtener herramientas que permitan conocer, a nivel molecular, cómo participan dichos carbohidratos en procesos de Reconocimiento Molecular implicados en importantes eventos biológicos. Más recientemente, esta investigación ha derivado en la preparación de sistemas dendríticos para la presentación de péptidos inmunogénicos a células especializadas del sistema inmune con el objetivo de modular la respuesta inmune, aplicación orientada al desarrollo de vacunas sintéticas en alergia, cáncer, infección, etc.

MEDALLA JOSÉ BARLUENGA



David González Rodríguez (Madrid, 1976) obtuvo su Licenciatura en Ciencias Químicas en 1999 por la Universidad Complutense de Madrid (3.3/4). Se unió entonces al grupo de investigación de Nanociencia y Materiales Moleculares del profesor Tomas Torres en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), donde consiguió su título de Doctor en Químicas en 2003, con una tesis titulada: "Sistemas Multicomponentes basados en Subf-talocianinas: Síntesis y Propiedades Electroquímicas y Foto-

físicas”. Realizó entonces 2 estancias de investigación en los grupos del profesor D. M. Guldi (University of Notre Dame, EE. UU.) y L. Echegoyen (Clemson University, EE. UU.). Entre 2005 y 2008, trabajó en los laboratorios del profesor E.W. (Bert) Meijer, en la Eindhoven University of Technology (Países Bajos) como becario postdoctoral Marie Curie-IEF.

El doctor González es autor de casi 70 publicaciones, entre ellas patentes, capítulos de libros, y artículos en revistas de alto prestigio internacional.

A lo largo de su carrera ha sido subvencionado con distintas becas y proyectos nacionales e internacionales, entre los que cabe destacar: Marie Curie Intra-European Fellowship, Marie Curie Reintegration Grants, ERC-Starting Grant (PROGRAM-NANO) y, más recientemente, 2 ERC-Proof of Concept Grants (CompAd y PolyHeal). También ha sido galardonado con una serie de premios, como: el premio SUSCHEM 2010 en la categoría postdoc, el premio RSEQ-Sigma Aldrich para jóvenes investigadores de 2011, el Premio Joven Universidad Complutense de Madrid 2012, o el

2012 Young Investigator Award de la “International Society of Porphyrins and Phthalocyanines”. Desde el año 2012 es miembro de la “scientific advisory board” de la revista Chemical Communications.

Desde 2010 David González Rodríguez es Profesor Titular de la Universidad Autónoma de Madrid. En la actualidad lidera el grupo de Materiales y Sistemas Moleculares Nanoestructurados (MSMn), formado por unos 10-12 investigadores. Su investigación se centra en el desarrollo de estrategias novedosas y versátiles con el fin de mejorar o crear nuevas funciones en materiales orgánicos, haciendo uso de técnicas de autoensamblaje para lograr un orden molecular preciso y racional. Estos sistemas funcionales nanoestructurados se dirigen a aplicaciones de muy diversa índole, como dispositivos electrónicos orgánicos, polímeros auto-reparables, catálisis, biomedicina, o membranas porosas.

MAR GÓMEZ GALLEGO

Departamento de Química Orgánica, Universidad Complutense

XIIth International School on Organometallic Chemistry “Marcial Moreno Mañas”

Durante los pasados días 12-14 de junio tuvo lugar la XIIth International School on Organometallic Chemistry “Marcial Moreno Mañas”, que este año se celebró en el edificio de postgrado de la Universitat Jaume I de Castellón. Esta reunión contó con 160 participantes de 30 países diferentes. Las conferencias plenarias corrieron a cargo de Tom Baker (Univ. Ottawa), Christopher C. Cummins (MIT), Antonio Echavarren (ICIQ-Tarragona), Matthew Gaunt (Cambridge Univ.), Dmitry Gusev (Wilfrid Laurier University), Daniel Mindiola (U. Penn.), Kyoko Nozaki (University of Tokyo) and Sven Schneider (Univ. Gottingen). Los asistentes también disfrutaron de las 14 comunicaciones orales, y las 40 presentaciones flash impartidas por los investigadores más

jóvenes. La jornada científica se completó con la presentación de 97 pósteres. Al final de la jornada científica se hizo entrega de seis premios financiados por Wiley, a las tres mejores comunicaciones orales y a los tres mejores posters.

La organización del evento no podría haberse celebrado sin el apoyo de la Universitat Jaume I, que cedió el fabuloso salón de actos del edificio de postgrado y aportó una valiosísima ayuda técnica. Los organizadores de la escuela agradecen a todos los participantes el éxito de la bial por su contribución al éxito del congreso.

EDUARDO PERIS

Catedrático de Química Inorgánica



Los participantes del congreso

Apadrina un elemento Alicante

Con 174 proyectos presentados y 115 pósters, de 44 centros de secundaria de la provincia, el pasado 17 de mayo se fallaron en la Universidad de Alicante, los premios del concurso “Apadrina un elemento” promovido por la Sección Territorial de Alicante con la colaboración de la Facultad de Ciencias. El acto fue presidido por D. Vicente Montiel, presidente de la Sección Territorial, D. Enrique Herrero, vicerrector de Estudios y Formación de la UA, D. Manuel Jordán, vicerrector de Investigación e Innovación de la UMH, D. Javier Martínez, representante de la IUPAC y D. Luis Gras, decano de la Facultad de Ciencias.

Ante un público entusiasmado, que llenaba el paraninfo de la UA, D. Claudi Mans, pronunció, de forma amena y divertida, la conferencia “La Tabla Periódica. El Piano de la Química”. D. Vicente Montiel destacó durante su discurso, la calidad de todos los trabajos presentados, aunque finalmente resultaron premiados los siguientes:

Pósters:

- Primer premio: El Iridio, el peso más pesado: por Ana Baywa, Sara Rico, Tania Expósito y Alejandro Reig del IES Nou Derramador de Ibi.
- Segundo premio: El Silicio: por Elías Ferrández y Guadalupe Navarrete de IES Dr. Balmis de Alicante.

- Tercer premio: Nitrógeno: por Catalina Molano y Vanesa Tuni del IES L’Allusser de Mutxamel.

Proyectos audiovisuales:

- Primer premio: El rap del Livermorio, por María Cutilas, Lucía Durá, Ruyi Susana Pan y Carmen Mas, del IES Macià Abela de Crevillente.
- Segundo premio: Radio 88 On Air por Carla Trelia, Marcos Balart y Paula Navarro del Col·legi Sant Roc de Alcoi.
- Tercer premio: Oro parece, Plata no es por Marta Bonilla y Sofía Alexandra Lugo del Colegio San Juan Bautista-Maristas de Denia.

Finalistas:

- Helio con voz propia por Nuria Granja del IES Lloixa de Sant Joan d’Alacant.
- Gallia, Gallo, Galio, por Marta Sarabia, Ainara Mauriz, Mar Martínez y María Brotons del Colegio de Fomento Altozano de Alicante.

Además de una cuantía económica, los premios incluían lotes educativos para los centros y tarjetas culturales por valor de 50€ para los profesores tutores de los proyectos ganadores.



Colocación y visionado de los pósters



Vista general del paraninfo de la UA durante la entrega de premios

Jornada Conmemorativa del Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos

La Sección Territorial de Castilla-La Mancha (ST-CLM) organizó el 6 de mayo de 2019 una Jornada Conmemorativa del Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos en el Paraninfo Luis Arroyo de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) en el campus de Ciudad Real.

El principal objetivo de esta jornada fue la divulgación, especialmente entre los más jóvenes, del sistema de ordenación de los elementos químicos que ideó Dimitri I. Mendeléiev en 1869 y que es un icono científico. En esta Jornada también se presentó a los miembros de la RSEQ-sección territorial de Castilla La Mancha y las actividades y acciones realizadas desde su toma de posesión. Entre ellas se destacó el patrocinio de diferentes eventos de divulgación científica, la fase regional de la Olimpiada de Química, subvenciones para la inscripción de estudiantes predoctorales e investigadores posdoctorales a la XXXVII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Química o al congreso internacional “2nd Iberian Thermolectric Workshop ITW2019”, que se celebrarán este año en San Sebastián y Ciudad Real, respectivamente.

Otra de las actividades desarrolladas por la ST-CLM junto con el Instituto Regional de Investigación Científica Aplicada (IRICA) ha sido el diseño de una tabla periódica que pretende, al mismo tiempo que muestra los elementos químicos, hacer divulgación científica mostrando científicos de gran relevancia en cada uno de estos elementos. Esta tabla, que es interactiva (<https://www.uclm.es/centros-investigacion/irica/news>) con el fin de dar a conocer a cada uno de los científicos que se han incluido en ella, fue presentada por la directora del IRICA, Ester Vázquez Pacheco.

Los más de 200 participantes, la mitad de ellos estudiantes preuniversitarios (secundaria y bachillerato) y estudiantes de doctorado, conmemoraron el 150 aniversario de la creación de la tabla periódica disfrutando de charlas divulgativas, juegos, monólogos y vídeos sobre la Tabla Periódica. El profesor Pascual Román impartió la charla “Mitología y arte en la Tabla Periódica de los elementos químicos”.

Dentro del programa de la Jornada, Alberto Vivó, de Big Van Ciencia, con su monólogo sobre la tabla periódica y la nanotecnología y los alumnos de Educación Secun-



Mesa inaugural de la Jornada formada de izquierda a derecha por: Dra. María Antonia Herrero Chamorro (Presidenta de la ST-CLM), profesor Ángel Ríos Castro (Decano de la Facultad de ciencias y Tecnologías Químicas de la UCLM), Dr. José Julián Garde López-Brea (Vicerrector de Investigación y Política Científica de la UCLM), Dra. Ester Vázquez Pacheco (Directora del Instituto Regional de Investigación Científica Aplicada - IRICA) y Dra. Elena Jiménez Martínez (secretaria de la ST-CLM)

daria ganadores del concurso “¿Qué haría Mendeléiev si fuera youtuber? Youtubea la Tabla Periódica”, organizado por la ST-CLM de la RSEQ, hicieron pasar un rato muy divertido a los asistentes. Este concurso ha tenido una gran acogida y repercusión no solo en Castilla- La Mancha, sino en otras comunidades autónomas como Andalucía o Murcia, participando 18 centros de educación secundaria con un total de 40 vídeos. Los vídeos ganadores de este concurso han sido:

1.º premio: “La Tabla Periódica Adquiere Vida”, 2º de la ESO y 1.º de PMAR del I.E.S. Maestro Juan de Ávila de Ciudad Real.

2.º premio: “Aprendiendo los Elementos Químicos con Mendeléiev”, 1.º de Bachillerato del I.E.S. Miguel de Cervantes Saavedra de Alcázar de San Juan (Ciudad Real)

3.º premio: “La Tabla Periódica”, alumnos del Colegio Maristas Santa María del Prado de Talavera de la Reina (Toledo).

Accésit: “Física y Química” del I.E.S. Leonardo da Vinci de Albacete, “Mendeléiev y los Elementos” del IES Izipisúa Belmonte de Hellín (Albacete) y “Los Científicos Youtubers”, del I.E.S. Maestre de Calatrava de Ciudad Real.

Durante esta jornada conmemorativa, se otorgaron además los premios convocados por esta sección territorial de la RSEQ en las siguientes categorías:

- Premio al “Trabajo Fin de Máster” otorgado a Dña. Sonia Moreno Blázquez Instituto de Nanociencia, Nanotecnología y Materiales Moleculares (INA-MOL) de Toledo.

- Premio a la “Mejor Tesis Doctoral en Química” otorgado al Dr. Juan Carlos de Haro Sánchez realizada en el departamento de Ingeniería Química, ITQUIMA, de la UCLM y que lleva por título “Development of biomaterials from renewable resources” defendida en 2018.
- Premio “Jóvenes Investigadores Químicos” otorgado a la Dra. M.ª Victoria Gómez Almagro, actualmente investigadora Ramón y Cajal en el grupo de Microondas en Química Orgánica Sostenible del departamento de Química Inorgánica, Orgánica y Bioquímica de la UCLM.
- Premio a la “Trayectoria Científica en Química” al profesor Dr. Antonio L. Otero Montero, catedrático del departamento de Química Inorgánica, Orgánica y Bioquímica de la Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas de la UCLM.
- Premio a la “Divulgación Científica en Química” a la Dra. María José Ruíz García, Profesora Titular de la Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica de la UCLM.

La Dra. Ruíz impartió una conferencia sobre la quimi-fobia.

La jornada finalizó con una mesa redonda, moderada por el tesorero de la ST-CLM, el Dr. Gregorio Castañeda Peñalvo, en la que participaron investigadores tan prestigiosos como María Vallet Regí, galardonada con el Premio Nacional de Investigación 2019, algunos de los premiados en este acto y el Vicerrector de Investigación y Política Científica de la UCLM, José Julián Garde López-Brea.

ELENA JIMÉNEZ
Secretaria de la ST-CLM de la RSEQ



Ganadores del concurso “¿Qué haría Mendeléiev si fuera youtuber? Youtubea la Tabla Periódica”, alumnos del I.E.S. Maestro Juan de Ávila de Ciudad Real

Tabla Periódica Facultad de Ciencias Universidad de A Coruña

Con motivo del Año Internacional de la Tabla Periódica, la asociación de estudiantes UDCbigbang (@UDCbigbang) ha presentado una Tabla Periódica gigante en la Facultad de Ciencias de la Universidad de A Coruña, después de tres años de proyecto y trabajo. Cada elemento tiene un casillero con muestras del mismo, de algunos compuestos relevantes y objetos cotidianos que lo contienen. Estas muestras fue-

ron recogidas de forma participativa y fueron donadas por profesores, alumnos y persona ajenas a la universidad. Los datos principales de los elementos aparecen en el fondo iluminado. Esta iniciativa contó con la financiación de la UDC.

LUIS A. SARANDESES

Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña



Tabla periódica gigante en la Facultad de Ciencias. A la derecha ampliación casilleros de muestras

Jornada de divulgación: 150 años de la Tabla Periódica en la Universitat Jaume I de Castelló

Alumnado y profesorado del Grado en Química de la Universitat Jaume I de Castelló compartieron el pasado viernes 5 de abril de 2019 una jornada didáctica-lúdica para conmemorar el 150 aniversario de la publicación de la tabla periódica de los elementos químicos. La jornada se organizó por la Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales, con la colaboración del Vicerrectorado de Promoción Lingüística e Igualdad, el Ilustre Colegio Oficial de Químicos de la Comunidad Valenciana y la Sección Territorial de Valencia de la RSEQ.

La jornada fue presentada por la vicerrectora de Promoción Lingüística e Igualdad, Pilar Safont, el vicedirector del Grado en Química Mario Llusar y la directora de la Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales, Amelia Simó, que destacó el papel de la titulación de Química dentro de la historia de la UJI, una de las primeras titulaciones que ya se impartía desde los años 70 en el antiguo colegio universitario, y la excelencia de sus grupos de investigación.

La jornada se inició con la conferencia de la profesora Adela Muñoz, de la Universidad de Sevilla, quien dio visibilidad al importante papel desempeñado por las mujeres en el descubrimiento de los elementos, haciendo un recorrido por algunas de las mujeres científicas vinculadas a la ta-

bla periódica. Muñoz comentó al inicio de su intervención que «fue feminista antes que química» y que su interés por el papel que habían tenido las mujeres en el mundo de la ciencia le llevó a iniciar en la década de los 90 una serie de investigaciones sobre mujeres científicas recogidas en sus numerosas publicaciones y algunas de ellas en el título *Sabias* (Debate, 2017). La web <http://hypatia.es/> recoge todas sus actividades de divulgación científica.

Tras su intervención, la profesora Adela Muñoz cedió la palabra al alumnado del Grado en Química de la UJI, quien participó activamente presentando tres exposiciones orales: la primera sobre los elementos descubiertos por científicos españoles, la segunda sobre el silicio y su importancia en la actualidad y la última de ellas haciendo una breve pero detallada historia sobre algunos de los elementos más antiguos de la tabla. Además, el estudiantado participó también en una especie de “mini-congreso” preparando 26 pósteres sobre la amplia temática de la tabla, que fueron expuestos y explicados por ellos mismos durante el descanso de las charlas. Algunos de los temas de los pósteres fueron sobre mujeres científicas, el grupo de los lantánidos o el último elemento descubierto, el oganesón, con el número 118.

Tras la sesión de pósteres y las intervenciones de los estudiantes, la Jornada pudo disfrutar como colofón de



De izquierda a derecha: los profesores Adela Muñoz de la Universidad de Sevilla, Mario Llusar, Pilar Safont y Amelia Simó de la UJI y el profesor Miquel Durán de la Universitat de Girona

la “mágica” intervención del profesor Miquel Durán de la Universitat de Girona, quien ofreció una conferencia-espectáculo, con varios trucos de magia. Durán explicó que la tabla periódica es uno de los iconos mundiales y que hay varios tipos de tabla: compacta, larga y simétrica, que para él es la más interesante, porque como físico le encuentra relación con el mundo cuántico. El profesor realizó varios trucos donde adivinaba el número atómico del elemento elegido o jugó también con las letras para crear nombres de elementos. El profesor cuenta con un blog muy interesante Edunomia (<http://edunomia.net>) donde escribe sobre diferentes aspectos de la Educación Superior, las redes sociales y la comunicación científica.

Durante la Jornada se otorgaron premios a las mejores comunicaciones orales y póster. Las comunicaciones premiadas fueron la de Carmen Ramos Vellón, en la modalidad oral, bajo el título “Cumpliendo el sueño de Mendeléiev. Historias de la Química” y la de Laura Agost, Laura Ibáñez y Ezequiel Valero, en la modalidad de póster con el título “Platinum, the ‘holy grail’ element for oncologic Applications”, las cuales recibieron como premio un talón de 150 euros cada una, entregado por la presidenta de la sección territorial de Valencia de la RSEQ, Carmen Ramírez de Arellano.

Dentro del capítulo de premios, se obsequió también con un ejemplar del libro “Sabias. La cara oculta de la ciencia” de Adela Muñoz a los estudiantes que realizaron

las presentaciones orales (¡que precisamente fueron todas alumnas!): a Victoria Bolos Sánchez, Ana María Mitroi y Rosa Peris, con “Elementos descubiertos por españoles”, a Andrea Jordán Bocero y Sara Vaya Gual por “Un mundo de Silicio” y a Carmen Ramos (antes mencionada). Además, entre los participantes en la exposición de pósteres se sorteó también cinco ejemplares de “*The Disappearing Spoon: And Other True Tales of Madness, Love, and the History of the World from the Periodic Table of the Elements*”, de Sam Kean y cuatro de “*El secreto de Prometeo y otras historias sobre la Tabla Periódica de los Elementos*” de Alejandro Navarro Yáñez.

La jornada contó con el patrocinio del Aula Torrecid de Liderazgo e Innovación.

Se pueden encontrar más imágenes y vídeos de la jornada en los siguientes enlaces:

<https://www.uji.es/com/fotonoticias/archivo/2019/04/150-años-mesa-periodica/>

Inauguración Jornada divulgativa: 150 anys de la Taula Periòdica (<http://www.svideo.uji.es/peli.php?codi=2925&lg=>)

Mujeres elementales de la tabla periódica (<http://www.svideo.uji.es/peli.php?codi=2926&lg=>)

Los secretos de Mendeléiev

(<http://www.svideo.uji.es/peli.php?codi=2927&lg=>)

CARMEN RAMÍREZ DE ARELLANO
RSEQ-Sección Territorial de Valencia



Estudiantes premiadas con la mejor comunicación oral y póster



Recibiendo el talón de la RSEQ

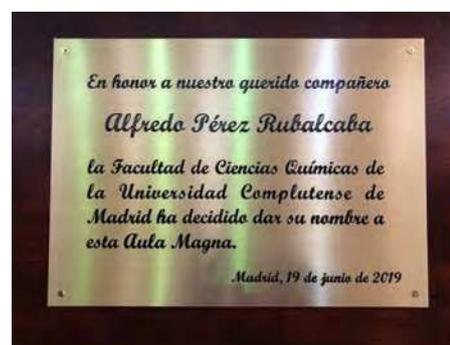
La Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid da el nombre Aula Alfredo Pérez Rubalcaba a su Aula Magna

El pasado 19 de junio se celebró, en el Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid, un acto de homenaje al profesor Alfredo Pérez Rubalcaba. Este Acto estuvo presidido por el Rector de la UCM el profesor Joaquín Goyache Goñi y contó con la presencia de la profesora Pilar Goya Laza, esposa del profesor Pérez Rubalcaba. Al Acto acudieron familiares y amigos, diversas autoridades, alumnos y numerosos compañeros de la Facultad y del resto de la UCM.

En este Acto, en el que se interpretaron varias piezas musicales por parte de la Orquesta de Cámara de la UCM, intervinieron el Decano de la Facultad de Ciencias Químicas D. Francisco Ortega Gómez, el Catedrático de Química Orgánica D. Odón Arjona Loraque, la Técnico de Laboratorio de Química Orgánica Dña. Laura García Sánchez, el Catedrático del Departamento de Química Inorgánica D. José M.^a González Calbet, la Alumna Dña. Sandra Rodríguez Blázquez, el Ex-Rector de la Universidad Complutense D. Carlos Andradás Heranz, la Profesora Dña. Pilar Goya Laza y cerró las intervenciones el Rector de la UCM D. Joaquín Goyache Goñi.

Posteriormente la profesora Pilar Goya acompañada del Rector y el Decano descubrió una placa conmemorativa donde se recoge la decisión de la Facultad de Ciencias Químicas de dar el nombre de Alfredo Pérez Rubalcaba al Aula Magna.

En este emotivo y entrañable Acto Académico se expresó el reconocimiento de la Comunidad Universitaria UCM y en particular de la Facultad de Ciencias Químicas al Profesor Alfredo Pérez Rubalcaba por tener siempre presente



la Universidad, desde sus funciones políticas y de servicio público, por decidir, tras abandonar la política activa, regresar a su Facultad, la Facultad de Ciencias Químicas de la UCM y por su sencillez, cercanía y voluntad constante de colaboración con la Facultad, la UCM y la Universidad pública en general.

FRANCISCO ORTEGA
Catedrático de Química Física,
Decano de la Facultad de Ciencias Químicas de la UCM



De izda. a dcha.: Joaquín Goyache, rector de la UCM; Pilar Goya Presidenta de EuChemS y Francisco Ortega, Decano de la Facultad de Química de la UCM

Luis Oro Giral, Doctor honoris causa por la Universidad Complutense

El pasado 21 de mayo tuvo lugar en la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid la ceremonia de investidura como honoris causa al profesor Dr. Luis Antonio Oro Giral, catedrático de Química Inorgánica de la Universidad de Zaragoza.

A continuación, reproducimos su discurso.

Rector Magnífico, dignísimas autoridades, Claustro Universitario, queridos colegas, señoras y señores.

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento al Rector Magnífico de la Universidad Complutense de Madrid, Dr. Carlos Andradás, así como a su Consejo de Gobierno por otorgarme el gran honor de ser investido Doctor honoris causa por esta prestigiosa Universidad, cuyas raíces se hunden en los más profundos de la Historia de España.

Decía Abderrahman III, fundador de Medina Azahara y gran promotor de las ciencias y las artes, que había anotado diligentemente los días de pura y auténtica felicidad que había disfrutado. “Suman catorce”, concluía. Yo no he sido tan diligente en el recuento y no sé cuántos días de auténtica felicidad llevo, pero sin duda hoy es uno de ellos.

Estoy muy agradecido por tan generosa distinción, y abrumado al constatar que los tres últimos doctores honoris causa de esta Universidad, propuestos por la Facultad de Química, Kroto, Molina y Zewail, han sido premios Nobel. Por ello deseo dar las gracias muy especialmente a los doctores Nazario Martín y Ramón González Rubio, catedráticos del departamento de Química Orgánica y Química Física, respectivamente, así como al Decano de la Facultad de Ciencias Químicas, Dr. Francisco Ortega, que iniciaron el proceso que culmina hoy con este acto de investidura. Asimismo, quisiera dar las gracias a mi familia: a mis padres que me inculcaron el amor por el conocimiento y la docencia; y a mi esposa e hijos que me han apoyado en todo momento, a pesar de detraer parte del tiempo que les pertenecía.

Quisiera agradecer también especialmente las elogiosas palabras de mi padrino en este acto, el profesor Nazario Martín, del que fui profesor en el penúltimo año de sus estudios de Licenciatura. Con él trabajé muchos años en la Real Sociedad Española de Química, de la que los dos fuimos presidentes. A estas alturas de mi vida es un placer contemplar cómo antiguos alumnos realizan contribuciones de gran repercusión internacional, avaladas por numerosos premios y reconocimientos, como es el caso del profesor Martín. Siempre he pensado que un deber universitario es tratar de que, en último término, los que fueron nuestros alumnos sean más competitivos de lo que podamos ser nosotros mismos. Yo debo mucho a mis alumnos y colaboradores, ya que son precisamente ellos, ese numeroso y excepcional grupo de colaboradores que he tenido a lo largo de mi vida profesional, los que han hecho posible que nuestra investigación haya adquirido un cierto prestigio internacional. Sin ellos, el camino andado

no hubiera sido el mismo. Porque hoy día, el progreso en ciencia y tecnología no es fruto de personalidades aisladas, sino más bien del esfuerzo colectivo de un equipo; un equipo y un entorno adecuado como el que se ha ido generando en nuestro sistema de ciencia y tecnología actual, tan diferente del que teníamos en los años setenta, cuando me iniciaba en la investigación científica. Asimismo, quisiera agradecer el apoyo institucional que siempre he encontrado en las universidades donde he trabajado, Zaragoza, Complutense de Madrid, Cantabria, Cambridge, Würzburg y Münster, y en las entidades que financian y promueven la investigación, entre ellas el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Por todo ello, al honor que siento por este reconocimiento, le acompaña mi gratitud hacia todos aquellos que me han ayudado a lo largo de mi vida profesional, y entre ellos es un placer manifestar también mi agradecimiento al Dr. Ramón González Rubio, que me acompañó, con gran eficacia y generosidad, en mi etapa de gestión en la administración científica española.

En 1973, regresaba de una estancia posdoctoral en la Universidad de Cambridge, becado por la Fundación Juan March. Allí me inicié en un área emergente de la química, que me ha proporcionado importantes satisfacciones, y adquirí conciencia plena de la relación entre investigación y competitividad universitaria. Mi estancia, como profesor agregado en esta Universidad Complutense, a mediados de los setenta, fue muy importante ya que me permitió consolidar una prometedora línea de investigación sobre compuestos organometálicos de rodio que dio lugar a las tesis doctorales de los que fueron profesores de esta Universidad, José Vicente Heras y Elena Pinilla.

Tras cincuenta años dedicados a la investigación y a la docencia de la química, con un paréntesis de unos años en la administración científica española, me permito en este acto proponer una intervención basada en los dos pilares básicos de mi actividad profesional: la química y la política científica.

Química

El año 2019 es un año importante para la química, ya que ha sido declarado, por la Unesco, como el Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, en reconocimiento a la función crucial que desempeñan la química y la física, entre otras ciencias fundamentales en el desarrollo de soluciones a muchos de los desafíos del mundo. Esta celebración conmemora el 150 aniversario de la creación de la tabla periódica por Dmitri Ivánovich Mendeléyev, considerado uno de los padres de la química moderna. La aportación determinante de Mendeléyev en 1869 fue la ordenación de los 63 elementos químicos que se conocían en su época, en forma de una tabla. Una lista prácticamente desordenada de elementos se convertía en una tabla ordenada donde –y este es uno de los mayores lo-

gros del químico ruso— dejó huecos para elementos aún no descubiertos, incluyendo la descripción de sus propiedades. La Tabla Periódica es una herramienta muy importante de la química, pues proporciona información sobre las propiedades y las características más relevantes de los elementos químicos, que son la base de los compuestos químicos, de los que actualmente hay registrados más de 145 millones. Sin duda, quedan otros muchos por descubrir.

La Química es una ciencia creativa. Los químicos no solo tratamos de entender la Naturaleza como hacen otras áreas de la ciencia, sino que además creamos nuevas moléculas y materiales con propiedades y aplicaciones insospechadas. Con más de cien elementos conocidos y técnicas de síntesis química que evolucionan constantemente, las oportunidades para diseñar y crear nuevas moléculas son casi infinitas. Por ello, estamos convencidos de que la Química quizá no sea un producto bello, aunque para muchos de nosotros lo es, pero es sin duda, como decía Gabriel Celaya de la poesía, un arma cargada de futuro, de un brillante futuro. Posiblemente fue este componente, esta carga de futuro, la que me atrajo hacia la química.

La Química es una ciencia central que por su propia naturaleza ocupa un lugar destacado entre todas las disciplinas científicas, con las que está estrechamente relacionada. Forma la base de todas las ciencias moleculares como la Biología, Farmacia, Ciencia de Materiales, etc. Su ámbito es universal. Por otra parte, la Química es una ciencia con un brillante futuro. No hay que olvidar que esta ciencia ha proporcionado importantes aportaciones y soluciones innovadoras en el pasado y va a seguir haciéndolo en el futuro en aspectos tan relevantes como un mejor entendimiento de la química de la vida, o la creación de nuevos materiales, que mejoran sustancialmente nuestra calidad de vida.

A finales del siglo pasado, el entonces editor de *Nature*, John Maddox, publicó un libro titulado *Lo que nos queda por descubrir*, del que parecía desprenderse la idea de que el tiempo de la química como ciencia “estrella” había pasado. No ha sido una idea muy compartida ya que los avances de la investigación en las últimas décadas no hacen más que demostrar que esta “estrella” no solo brilla con luz propia, sino que presta su luz a otras disciplinas.

Tal vez los químicos no hemos sido capaces de hacer llegar a la sociedad, y a los medios, la contribución fundamental de la química, y algunos descubrimientos importantes basados en la investigación química aparecen catalogados como avances de otras disciplinas. El prestigioso químico orgánico, Georges Whitesides de la Universidad de Harvard, señala: “La naturaleza de la célula es un problema absolutamente molecular. No tiene nada que ver con la biología”. Lo que sí es cierto es que no resulta tan fácil plantear desde la química preguntas atractivas para nuestra sociedad como hacen nuestros colegas de física o biología al preguntar en público cuál es el origen del universo o cuál es el origen de la vida. Pero que la Química no tenga ese encanto “natural”, no hace de ella un área menos fascinante, solo más difícil de comunicar; sería como un cuadro de Bacon frente a un Van Gogh, un concierto de Stravinsky frente a una sencilla pieza de Mozart... algo no menos trascendente, sino solo de una belleza, digamos,

“menos evidente”. Y debería ser motivo de orgullo ser capaces de apreciarla.

Además de bella, la Química es una ciencia esencial y “urgente”. Porque urge sentar las bases de un desarrollo sostenible del planeta Tierra y ese es precisamente uno de los cometidos principales de la Química. La energía, el agua, los alimentos y el medio ambiente son los cuatro retos más importantes de nuestro mundo y todos ellos encuentran respuestas en la química. Es ella quien puede proporcionar las bases para realizar un balance inteligente, en todo momento, del binomio riesgo/beneficio. Sin duda, en este siglo XXI, el desarrollo sostenible de nuestro planeta necesita de la Química y su capacidad permanente de aportar soluciones a las crecientes y cada vez más complejas demandas de nuestra sociedad.

Por fortuna, la investigación española en el campo de la química se encuentra actualmente en una situación excelente, cuantitativa y cualitativamente, destacando muy especialmente la contribución de la Universidad Complutense de Madrid. Así datos de ISI Web of Knowledge, referidos a los últimos diez años, pone de manifiesto que España, con sesenta y cinco mil publicaciones en química ocupa el décimo lugar en el concierto internacional, mientras que con sus un millón doscientas mil citas se sitúa en la octava posición. Es particularmente destacable que en el importante parámetro citas por artículo, hemos superado recientemente a países con importante tradición en investigación en química, como son Francia, Italia o Japón. Por ello, hoy día, no resulta extraño que en nuestros laboratorios de investigación estemos recibiendo a doctorandos y pos-doctores de países avanzados, para completar su formación. Y ello es especialmente reconfortante para los científicos de mi generación que nos tuvimos que iniciar en la investigación en química moderna saliendo a formarnos fuera y regresando con gran ilusión a unos laboratorios con medios escasos.

Nuestra actividad de investigación se ha centrado fundamentalmente en compuestos organometálicos y catálisis homogénea, una actividad que está próxima a lo que hoy denominamos química verde o química sostenible. Una indicación de la importancia de esta área ha sido la concesión de los premios Nobel de Química en los años 2001 a Knowless, Noyori y Sharpless, en 2005 a Chauvin, Grubbs y Schrock y en 2010 a Heck, Negishi y Suzuki, por sus contribuciones al desarrollo de compuestos organometálicos para catálisis asimétrica, metátesis de olefinas, y acoplamientos carbono-carbono, respectivamente. En esta área hemos estudiado la actividad catalítica homogénea de numerosos nuevos compuestos de metales de transición, principalmente, de rodio, iridio, rutenio y osmio. En su estudio hemos ahondado especialmente en la utilización de métodos espectroscópicos, cinéticos y teóricos para la elucidación de los mecanismos de las reacciones catalíticas. En esta línea, en estos últimos años, hemos podido demostrar los primeros ejemplos de catalizadores de iridio activos en reacciones de hidrosililación de dióxido de carbono o de alquinos, a través de mecanismos de esfera externa, favorecidos por la oxofilia del silicio.

Los procesos catalíticos homogéneos han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, y son nume-

rosos los procesos industriales, especialmente en química fina, en los que alguna etapa necesita de un catalizador homogéneo. Nuestra aproximación en esta área ha tenido como eje fundamental el centrarnos en aquello que debe demandarse a una actividad académica: formar químicos creativos y competentes e investigar aquellos aspectos demasiado básicos para el sector industrial, pero que pueden ser de gran utilidad. En definitiva, tratar de resolver problemas. El mundo académico y el industrial podemos tener visiones y funciones diferentes, pero podemos, y debemos, complementarnos. Y creo relevante recordar la importancia de la industria química que genera actualmente el 13,4% del producto industrial bruto y más de 660.000 empleos. Por ello, fomentar la relación entre el sector académico y el sector industrial debiera ser una prioridad para los responsables de la política de investigación y desarrollo.

Política científica

En 1967, año en el que terminaba, en la universidad de Zaragoza, mi Licenciatura en Ciencias Químicas, no existía en la práctica política científica alguna. Se estima que las inversiones en I+D, en 1967, representaban el 0,19% del PIB, participando las universidades con un exiguo 3%. Afortunadamente, la llegada de la democracia, en las últimas décadas del siglo pasado, supuso un cambio importante en nuestro país por el acceso a cargos de responsabilidad de una generación de profesionales con la determinación de incorporarnos a las modernas tendencias en ciencia y tecnología. Me permito señalar como un hito importante, el establecimiento en 1986 de la “Ley de la Ciencia”, llamada oficialmente “Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica”. Esta ley, que coincide en el tiempo con nuestro ingreso en la Unión Europea, vino a poner orden en el llamado modelo “espontáneo” de organización del sistema nacional de investigación y desarrollo (que era el adjetivo entonces utilizado para no tener que reconocer la carencia de cualquier modelo explícito). La Ley de la Ciencia puso en marcha mecanismos de programación de la actividad científica y tecnológica; facilitó una cierta coordinación entre los ministerios con responsabilidades en Investigación científica y Desarrollo tecnológico (I+D) y creó el Plan Nacional de I+D, que se convirtió en el principal instrumento de fomento de la actividad investigadora en el sector público, un plan que diseñó las bases sobre las que se asentaría la concurrencia competitiva en la consecución de fondos públicos de investigación. A título personal, fue para mí una etapa grata en la que tuve la fortuna de colaborar con ilustres personalidades que fueron determinantes en la modernización de la política científica española. Fui director general de Investigación Científica con José María Maravall y Juan Rojo (1987-1988), y secretario general del Plan Nacional de Investigación (1988-1994) con Javier Solana y Juan Rojo y también con Alfredo Pérez Rubalcaba, una persona excepcional que lamentablemente nos dejó hace unos días. Todos ellos han sido profesores de la Universidad Complutense de Madrid, y contaban con una amplia experiencia profesional en prestigiosas universidades extranjeras. Como Ministros de Educación y Ciencia, y Secretario de Estado de Universidades e Investigación, junto con la que fue Directora General de Uni-

versidades y también catedrática de esta universidad Ana Crespo de las Casas, fueron personajes clave en el proceso de modernización de nuestra ciencia. Todos compartimos entonces y ahora el profundo convencimiento de que las universidades deben compatibilizar una docencia de calidad con actividades de investigación. En ese cometido tuve la fortuna de poder contar con la magnífica colaboración del catedrático de Química Física, y promotor de esta distinción, Ramón González Rubio, que, como vicesecretario para la coordinación de programas de investigación científica y desarrollo tecnológico del Plan Nacional de I+D, realizó una excelente labor. La puesta en marcha de dicho Plan Nacional exigía el establecimiento de un sistema de gestión eficiente, en coordinación subsidiaria con las líneas priorizadas en la política de I+D de la Unión Europea, así como el establecimiento de programas nacionales que tuvieran en cuenta la emergencia de modernas áreas transversales y la deseable armonización entre el sector académico y el empresarial.

En el contexto internacional era y es evidente que las universidades más competitivas son aquellas en las que los criterios de excelencia investigadora son fundamentales. Afortunadamente, un cambio relevante en la universidad española ha sido el importante progreso de la investigación universitaria. En unas décadas, ha dejado de ser una actividad minoritaria para pasar a constituir parte esencial del quehacer cotidiano de la mayoría del profesorado universitario, contribuyendo de modo sustancial al incremento de la producción científica, tanto en cantidad como en calidad. Así pues, habida cuenta de nuestras limitadas inversiones en esta rúbrica, pudiera concluirse que nuestra productividad científica es destacable en relación a la inversión que nuestro país realiza en investigación y está por encima de la posición económica que el país ocupa en el concierto global.

El resultado de las acciones iniciadas en los años ochenta fue un incremento, que casi podríamos calificar de espectacular, ya que la contribución española a la producción científica, en todas las áreas, ha pasado del 0,5% al 3,7% actual, con un incremento destacable en su impacto. Si nos referimos a la producción recogida en el 25% de revistas más influyentes, Q1, la contribución española actual se aproxima al 7%. La mencionada “Ley de la ciencia” de 1986, fue sustituida en 2011 por la actual “Ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación”, que no ha sido capaz de evitar el deterioro de nuestras inversiones en investigación. Por el momento, la recuperación económica española está dejando de lado la investigación y, aunque las inversiones en términos absolutos han iniciado un leve aumento, en términos de PIB, hemos pasado del 1,40% de 2010, al 1,20% de 2017, lejos del objetivo del 2% exigido por Europa para 2020. España convergió con la Unión Europea en el período 2000-2010, y divergió desde entonces, debido a una notable reducción de la intensidad inversora, que ha sido especialmente acusada en el sector público, mientras que la Unión Europea ha mantenido una trayectoria de crecimiento. Nuestro diferencial con Europa es actualmente del 0,85 frente al 0,5 que teníamos al inicio de esta última crisis. Las inversiones en Investigación y Desarrollo de la Unión Europea, en el período 2009-2016, han creci-



do un 27%, liderados por Reino Unido (39%) y Alemania (38%), mientras que España las ha reducido en un 9%. De las cinco grandes economías de Europa, nuestro país es el único que no ha recuperado los niveles de inversión previos a la crisis.

Puede decirse que, en los últimos años, hemos asistido a un recorte significativo de la mayoría, si no de todos los indicadores relacionados con la relativa pujanza —y fortaleza— de nuestro país en este ámbito, lo que de continuar en esta línea puede suponer la pérdida de una generación de jóvenes bien formados en los que el país ha realizado una importante inversión. Sin embargo, resulta un tanto paradójico que mientras las inversiones en investigación están descendiendo en términos reales, nuestra presencia en bases de datos internacionales continúa incrementándose. Una explicación simplista sería que estamos recogiendo los frutos de inversiones anteriores, pero debiéramos preocuparnos seriamente por nuestro futuro. Deberíamos tomar conciencia de que se puede estar poniendo en riesgo una parte de nuestro frágil sistema de investigación y desarrollo y, en cierto modo, la posibilidad de que la economía y la sociedad española construyan unas bases más sólidas y sostenibles para mejorar el bienestar de sus ciudadanos en el próximo futuro.

Quisiera pensar que las debilidades de nuestro sistema de ciencia y tecnología han tocado fondo al percibirse una firme voluntad de que, en breve plazo, la política científica volverá a tener el apoyo que le corresponde. Un modelo económico basado en la generación de conocimiento sólo tendrá éxito si se garantiza la estabilidad del sistema

de investigación en términos de recursos económicos y humanos y si hay un sector privado que, más allá de las declaraciones de intenciones, apueste de verdad por la investigación y la innovación.

El esfuerzo hecho a lo largo de los últimos decenios no puede desaprovecharse. Por el contrario, deberíamos volver a hacer un esfuerzo en I+D anticíclico aplicando una política científica adecuada, que permita sacar a flote las fortalezas, que las hay, de nuestras universidades y de nuestro sistema de ciencia y tecnología.

Mendeléyev dejó unos huecos en la tabla periódica que no esperaba que quedaran en blanco. Dejar huecos para nuevos descubrimientos e innovaciones es tener fe en el futuro. Invertir en ciencia también lo es. Invertir en ciencia es creer y crear el futuro.

Magnífico Rector, agradezco sinceramente este acto de investidura como Doctor honoris causa que me devuelve de nuevo al claustro de esta Universidad Complutense, cuatro décadas después de haber sido miembro del mismo. Mi ilusión y deseo de trabajar por y para esta Universidad siguen intactos y son los mismos que tenía aquel joven de treinta años que trataba de adquirir nuevos niveles de conocimiento. Porque creo que, mientras estemos vivos, debería ser así. Como decía Oliver Sacks, la renuncia a avanzar en conocimientos, debería ser nuestra última renuncia en esta gran aventura y enorme privilegio que es la vida.

Muchas gracias.

PROFESOR LUIS ORO
Dr. Honoris Causa por la UCM

Sílvia Osuna, Premio Lilly “Joven Investigador 2019”

La investigadora, que trabaja en el Instituto de Química Computacional y Catálisis de la Universidad de Girona, ha sido galardonada con el Premio Lilly “Joven Investigador 2019” por su investigación centrada en el diseño racional de nuevas enzimas mediante simulaciones y herramientas computacionales con el fin de extender su aplicación en la industria.

El trabajo premiado se centra en la evaluación del conjunto de estructuras diferentes que las enzimas naturales pueden adoptar en solución y que son claves para desarrollar su función.

El premio se hizo entrega durante la XXXVII Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Química (RSEQ), que se celebró en Donostia-San Sebastián del 26 al 30 de mayo. En el transcurso de esta reunión, se impartió la conferencia “Conformational heterogeneity for novel enzyme activity” (Heterogeneidad conformacional para obtener nuevas actividades enzimáticas), en la que se resaltó la visión de la enzima como conjunto de estructuras y cómo el estudio de dichas estructuras es esencial para entender su función y, por tanto, para diseñar nuevas variantes de interés industrial.

Sílvia Osuna es Licenciada en Química por la Universidad de Girona (2005). En 2010 recibió el título de doctora con la máxima calificación de sobresaliente “cum laude” y su tesis fue galardonada con el Premio Extraordinario de Doctorado.

Desde 2010 a 2012 trabajó como investigadora postdoctoral en la Universidad de Los Ángeles, California (UCLA),



gracias al programa de becas Marie Curie y, posteriormente, en 2013, obtuvo un contrato postdoctoral dentro del programa Juan de la Cierva y después un contrato Ramón y Cajal (2016) para continuar su investigación en el Instituto de Química Computacional y Catálisis (IQCC) de la Universidad de Girona. En 2018 se incorporó como Investigador ICREA al IQCC de esta universidad, donde actualmente lleva a cabo su labor científica.

En su día a día trabaja en el desarrollo de estrategias computacionales y su aplicación en diferentes campos y en la colaboración con diferentes grupos para estudiar el proceso de reconocimiento entre proteínas y fullerenos o nanotubos, la inhibición de determinadas proteínas relevantes desde el punto de vista médico, así como para investigar el papel que juegan diferentes enzimas en la propulsión de micromotores moleculares.

XVII Premios de Investigación Lilly para Alumnos de Doctorado

Ana García Herraiz y José Enrique Gómez Pulido, ambos del Institut Català d'Investigació Química (ICIQ), y Esther Sánchez Tirado, del Departamento de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid, son los tres jóvenes investigadores que han resultado ganadores de los XVII Premios Lilly de Investigación para Alumnos de Doctorado-

Los tres científicos han sido premiados por la excelencia en las investigaciones que están llevando a cabo en los campos de la Química Orgánica, Farmacéutica y

Analítica. En concreto, Ana García Herraiz ha sido reconocida por su estudio de la nueva reactividad química del carbono a través de la catálisis fotoredox y José Enrique Gómez Pulido ha sido premiado por su estudio de la síntesis estereoselectiva de sulfonas y aminoácidos a partir de heterociclos funcionalizados. El jurado también ha valorado el trabajo de Esther Sánchez Tirado, centrado en el estudio de la monitorización de biomarcadores del envejecimiento en muestras clínicas con inmunosensores electroquímicos.

Los XVII Premios de Investigación para Alumnos de Doctorado se entregaron XXXVII Reunión Bienal de la RSEQ, que tuvo lugar en Donostia-San Sebastián del 26

al 30 de mayo. Allí los tres premiados de este año expusieron en una presentación oral los resultados de sus investigaciones.



De izquierda a derecha: Sonsoles Martín Santamaría, Secretaria General de la RSEQ, Sonia Gutiérrez Lilly, Dra. Sonia María Gutiérrez, miembro de European Academic Contacts Committee-EUACC, Lilly Antonio M. Echavarren, presidente de la RSEQ, Ana García Herraiz, José Enrique Gómez Pulido, Esther Sánchez Tirado, Dr. Juan Antonio Rincón, miembro de European Academic Contacts Committee-EUACC, Lilly

La profesora Leticia González elegida miembro de la Academia Europea de Ciencias (EurASC)

La profesora Leticia González, catedrática en la Universidad de Viena, doctora en ciencias químicas por la Universidad Autónoma de Madrid, y honoris causa por la Universidad de Lorraine, ha sido elegida miembro de la Academia Europea de Ciencias (EurASC). A este reconocimiento se une su reciente premio a la Excelencia Investigadora por la Real Sociedad Española de Química.

La EURASC es una organización no gubernamental sin ánimo de lucro formada por los más distinguidos académicos unidos por el compromiso de promover la ciencia y la tecnología al más alto nivel. Su misión es fortalecer la cooperación científica europea y utilizar la experiencia de sus miembros para asesorar a otros organismos europeos en la mejora de la investigación europea, la aplicación tecnológica y el desarrollo social.

Desde aquí, nuestras cordiales felicitaciones.



Ciencia en Europa: los números

Un artículo reciente en *Nature* ofrece un panorama de la ciencia europea basado en un análisis numérico del gasto de los distintos países en ciencia y el número de citas en comparación con otras potencias mundiales como Estados Unidos y China. De este análisis surgen datos curiosos. Así, por ejemplo, los países europeos han incrementado su inversión en I+D en un 5% anual desde el año 2000. Sin embargo, China invierte aproximadamente 2/3 del gasto total de la Unión Europea en I+D y ha sobrepasado la ha sobrepasado en términos de poder adquisitivo. Es destacable que la contribución de la UE al gasto mundial en I+D ha disminuido de un 28% en el año 2000 a un 23% en 2016.

Las diferencias regionales del gasto en I+D dentro la UE son dramáticas, con regiones como Braunschweig (Alemania) que invierte 3.737€/habitante a regiones como Castilla-la Mancha o Extremadura que se encuentran entre las regiones con menor inversión en I+D.

El número de artículos producidos por la UE ha disminuido dramáticamente en los últimos 20 años, de 1/3 de los artículos producido en el mundo a 1/4 en 2018.

Fuente: *Nature*, 2019, 569, 470-471.

RETRASO EN LA APLICACIÓN DEL PLAN S

La implementación del Plan S se ha retrasado un año, hasta 2021 “para dar tiempo a los investigadores y a las editoriales para adaptarse a los desafíos requeridos por el audaz plan”.

Los promotores de la Coalición S, afirman de que ya están preparados para dar a las editoriales mayor flexibilidad en la transformación revistas cerradas o híbridas en “open-access”. Así mismo, no pondrán límite a los costes de publicación en revistas “open-access”.

Aún más interesante es la inclusión de un nuevo principio en el Plan S. Este principio afirma que “al financiar a un investigador, las agencias de financiación ignorarán

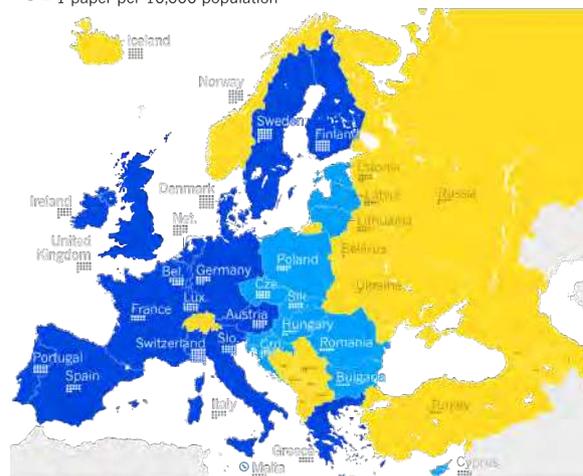
el prestigio de las revistas en las que los investigadores publiquen”. Este cambio se debe a que sería difícil para los científicos cambiar su forma de publicar si el sistema de financiación depende, en gran medida, de la publicación en revistas prestigiosas con sistemas de pago cerrados.

Para más información, ver, entre otras muchas fuentes: *Nature*, 2019, 30 de mayo y la clarificación de 31 de mayo.

WIDE REACH

Switzerland, Denmark and Norway are among the world's most research-intensive countries, with more than 25 papers per 10,000 people. But to the east of the region, countries such as Albania and Azerbaijan produce fewer than 1 paper per 10,000 people*. (Azerbaijan, Georgia, Armenia, Turkey and Russia bridge both Europe and Asia.)

- EU member states:
 - EU15: before 2004
 - EU13: joined since 2004
- Other European countries
- = 1 paper per 10,000 population



Bel. – Belgium, Net. – The Netherlands, Lux. – Luxembourg, Cze. – Czech Republic, Slo. – Slovakia, Slo. – Slovenia, Cro. – Croatia

Nature publications remain neutral with regard to contested jurisdictional claims in published maps.

*Papers assigned to countries fractionally by authors

©nature

Alfredo Pérez Rubalcaba, el químico que mejoró su entorno

In memoriam

Conocí a Alfredo hace más de 45 años haciendo la carrera de químicas. Esta amistad la hemos mantenido desde entonces, yo siempre aquí y él, al principio aquí, luego allí y en estos últimos cinco años de nuevo en nuestra querida facultad. Siempre iba con Jaime Lissavetzky. En seguida me aceptaron, aunque yo fuera químico inorgánico. Dicho de otra manera, fuimos precursores de lo que en los últimos años es una línea prioritaria de investigación: los híbridos orgánico-inorgánicos.

Al terminar la carrera, Alfredo realizó su tesis doctoral en el Departamento de Química Orgánica. Desde sus inicios como ayudante en la Facultad de Químicas de la UCM dedicó parte de su actividad a intentar superar la precariedad en la que nos encontrábamos a mediados de los años 70, cuando empezábamos la tesis. Éramos profesores no numerarios de distintas facultades que compartíamos esa misma inquietud. Alfredo compaginaba su actividad investigadora y docente, con esa lucha para mejorar la universidad, llegando a ser uno de los líderes del movimiento de los PNNs. Y le quedaba tiempo para practicar su actividad deportiva favorita: el atletismo. Fue campeón de España universitario de 100 metros con 10.9 s, una gran marca en aquella época.

La actividad principal en esa segunda década de los años 70 era la tesis. Las condiciones eran muy diferentes a las actuales. Esa falta de medios fomentaba la solidaridad. Y eso a Alfredo le sobraba. Pronto demostró sus dotes como científico. Todo tenía un por qué. Se ha comentado muchas veces, aunque no siempre se entiende bien, que la mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, se pueden expresar en un lenguaje comprensible para todos. Alfredo lo aplicaba a las mil maravillas.

Esta necesidad de hacerse entender era otra de sus cualidades, particularmente importante en el mundo de la docencia universitaria: “Es imposible educar sin sentimiento”, decía. Y cuando volvió a la facultad esa era una de sus grandes preocupaciones. Que sus alumnos le entendieran. Su vuelta le sirvió, asimismo, para observar de cerca lo que muchas veces habíamos comentado: el maltrato al que a veces somete la administración a los investigadores. Eso le llevó a escribir: “El pacto por la ciencia debería llevar aparejada la voluntad de las Administraciones para facilitar



la vida de nuestros investigadores y profesores, sometida a una incesante y kafkiana proliferación de trámites administrativos”.

Con estas inquietudes por su relación con los alumnos, por su preocupación por las condiciones de trabajo de sus compañeros profesores, con su “mono” de docencia, volvió a la facultad y disfrutó como un enano. Le gustaba el orden y el sistema periódico. Me vais a dejar que os comente lo que, en ese tono distendido que utilizaba, se le ocurría sobre los elementos químicos que deben su nombre a los países en los que se descubrieron, como el galio, el escandio, el germanio, el americio, el californio... Después de hacer una reflexión sobre las similitudes entre el nacionalismo y los gases *que parece que ocupan todo el territorio posible*, dio su versión sobre los posibles nombres que podría haber tenido el wolframio, uno de los pocos elementos descubiertos por españoles: los hermanos Elhuyar. Naturales de Logroño, realizaron su descubrimiento en Vergara (Guipúzcoa) y lo hicieron en un crisol de Zamora. Ante esta información, apareció su deformación profesional: “Riojanos trabajando en Euskadi con un crisol de Zamora”. Y decía Alfredo: “Maragall hubiera dicho que es el mejor ejemplo de la Es-

pañá plural. Ibarretxe hubiera pedido que el elemento se denominara euskadio. Y Rajoy hubiera lamentado la escasa vena patriótica de estos dos logroñeses que bautizaron el elemento con el nombre de un alemán, en vez de recurrir al topónimo patriótico”, hispanio.

Era un hombre entrañable, con gran sentido del humor, con el que era muy fácil dialogar. Intentaba aportar soluciones y casi siempre, como hemos tenido ocasión de comprobar en numerosas ocasiones, mejoraba su entorno. Y ya que hemos entrado en comparaciones entre elementos químicos, a Alfredo habría que asignarle uno. Buscarle una similitud con un elemento del sistema periódico. Teniendo en cuenta su capacidad para dialogar con todo tipo de elementos, y dada su condición de químico orgánico, el carbono podría ser un buen candidato ya que es el elemento que da lugar a mayor número de compuestos químicos. Esto en su faceta de químico molecular. La de químico no molecular le era un poco más lejana. Pero su capacidad para hibridarse con un químico inorgánico también se la podemos reconocer a Alfredo. Hay ejemplos en los que el carbono juega un papel fundamental en los materiales inorgánicos. Esta

capacidad que tenía Alfredo para mejorar su entorno hay que considerarla como algo que se aleja de la rutina. Algo raro. Al carbono con el hierro le pasa algo parecido. Todos los sólidos inorgánicos tienen defectos. Esto no es despectivo. Y su presencia en un sólido cristalino puede mejorar, en ocasiones, sus propiedades. El hierro, un sólido con simetría cúbica, se oxida. Pero si se introducen unos pocos átomos de carbono distribuidos al azar, sin orden, como defectos en la red cristalina del hierro, mejoran sus propiedades: se convierte en acero inoxidable. Definitivamente, esa rareza para mejorar su entorno, hace que la forma de comportarse de Alfredo, su relación con los demás, la influencia positiva que ejercía en su entorno, se pueda comparar al papel tan importante que juega el carbono en la vida, en la química, en el mundo orgánico e inorgánico.

A ti Alfredo, recordando a *Queen* en aquel concierto contra el hambre que tanto te gustó, te diré, como decía Freddy Mercury: “You are the champion, my friend”.

JOSÉ M. GONZÁLEZ CALBET
Catedrático de Química Inorgánica, UCM

Querido Alfredo:

Nunca imaginé que tendría que escribirte esta carta, mucho menos el día que nos conocimos, hace más de 60 años, en el Colegio en que compartimos la misma clase y durante tanto tiempo.

Lo primero que quiero decirte es la palabra que nos ha unido todos estos años: AMISTAD. Hoy más que nunca seguimos siendo amigos con la misma intensidad de siempre y siempre intentaré seguir aplicando a mi vida los consejos, las enseñanzas, el ejemplo y el coraje que siempre tuviste. Me ocuparé de mi amiga Pilar Goya, lo que ella quiera, de los Rubalcaba, de mi mujer, también Pilar, claro, que está muy, muy triste y por supuesto de todos nuestros amigos y amigas que tanto queríamos. Jose y yo hablamos muy a menudo de ti y nos damos algún homenaje. Ya sabes, la gastronomía. Sé que no podré ocupar tu lugar ni lo pretendo, éramos distintos, pero sí tu estilo vital de escuchar a todos y de buscar soluciones y dar ánimos en las distintas peripecias que ocurren en la vida. Por aquí no te preocupes.

Por cierto, se ha formado un gran revuelo con tu marcha amigo, pero has tenido un gran homenaje social y un reconocimiento muy generalizado por tu labor todos estos años. A ti no te voy a contar todo lo que hiciste, para qué, pero no te imaginas cómo fueron los actos de tu despedida: ¡juntaste a todo el PSOE en tu capilla! Y a muchos políticos de distinto signo, a prácticamente, todas las Instituciones del Estado y a la sociedad. Ves cómo había muchos que te

querían. Por cierto los que más afectados estaban te puedes imaginar quiénes eran. Lo habíamos hablado tantas veces en esas llamadas diarias que me hacías de 8 a 9 mientras paseabas por Majadahonda, conversaciones inolvidables en las que repasábamos el mundo y nos contábamos nuestra vida hasta los pequeños detalles.

No me quiero poner triste, soy algo “blandibloot” como tú me decías, por lo que vamos a cambiar de tema. Una buena noticia. Han puesto tu nombre al Aula Magna de la Facultad de Ciencias Químicas. Ahora se llama Alfredo Pérez Rubalcaba. Los químicos son buena gente. Otra cosa que te gustaría. ¡Cómo te quieren tus alumnos y alumnas de Químicas! A ver si va a ser verdad que eras un gran profesor... Esa era tu pasión la enseñanza. También conseguiste eso. ¡Ah! Se me olvidaba. La Facultad de Ciencias Políticas y Sociología de la Complu te ha hecho también un reconocimiento. Creo que vendrán más reconocimientos pero cuando escribo estas líneas aún no están confirmados y desde el rigor científico, al que estamos acostumbrados y a ti tanto te gustaba mejor esperar un tiempo.

Voy terminando. Del Real Madrid nada nuevo, ni bueno. A la espera de fichajes pero no lo veo claro. Ha subido el Racing a Segunda. Eso te lo perdiste, pero mira otra buena noticia. Nada más Alfredo. Ya sabes dónde me tienes. Y sí te haré caso amigo. Una vez más, como siempre.

JAIME LISSAVETZKY

Traduttore traditore

Javier de Mendoza

Muchos de los nombres españoles de las películas no se parecen en nada a sus títulos originales. Algunos resultan particularmente grotescos. Por ejemplo, *Con la muerte en los talones*, de Alfred Hitchcock, se llama en realidad *North by Northwest*, jugando con el nombre de una compañía aérea americana, que aparece fugazmente en la película. Se entiende que lo cambiaran, pues a un espectador español el título original le resultaría algo críptico, pero ello no justifica que se le haya dado ese ridículo nombre de película de pistoleros. En otros casos, la traducción pretende ser fiel al original, pero la desidia o ignorancia del traductor resulta todavía más ridícula. Hay un ejemplo del que casi nadie habla, y que tiene que ver con la química, y por eso lo traigo a colación aquí. Me refiero a *La gata sobre el tejado de zinc*, dirigida por Richard Brooks en 1958 y protagonizada por Elisabeth Taylor y Paul Newman, basada en la obra de teatro del mismo nombre escrita por Tennessee Williams, y ganadora de un Premio Pulitzer en 1955. ¿Del mismo nombre? Veamos. El título original es *Cat on a Hot Tin Roof*. De entrada no se especifica que se trate de un gato o de una gata, pues el inglés no sufre de los problemas de género que tan de moda están entre nosotros, ni tampoco en el título español se indica que el tejado esté caliente (aunque en las traducciones de la obra teatral sí se suele especificar). Pero lo más curioso es que *tin*, en inglés, es *estaño*, y no *zinc*, como el traidor traductor ha bautizado, quizás influido por el parecido fonético entre ambas palabras y, por supuesto, por su total ignorancia de la química. Hoy en día, los tejados metálicos, llamados popularmente de chapa, de lata o de hojalata, según los países, son láminas de acero laminado (aunque a veces se ha utilizado plomo, cobre, hierro o el propio zinc), recubiertas de una fina lámina de estaño para evitar la corrosión, que se fija por galvanoplastia, un proceso electroquímico. En el siglo XIX el hierro estañado era el tipo más corriente de techo de metal. Pero todo el mundo en España e Hispanoamérica se ha tragado lo del zinc de la película. Un día le pregunté a un amigo si había leído *Gato sobre un tejado de estaño caliente* de Tennessee Williams y me miró raro.

Pero eso no es todo. La desidia en la traducción de los términos químicos del inglés al español campa ahora a sus anchas en el lenguaje corriente, en la publicidad y en los medios de comunicación. Cuando me dicen que un alimento, un detergente o un cosmético contiene muchos *químicos*, me dan ganas de mirarlo al microscopio a ver si descubro en él

danzando a unos diminutos hombrecillos con bata blanca. Se me dirá que eso no tiene importancia, que cuando hablamos de químicos nos referimos a *productos químicos*, pero en realidad sí la tiene. En inglés un producto químico es un *chemical*, mientras que un químico de esos de bata blanca es un *chemist*, que no es lo mismo. Por no mencionar el hecho de que cuando se habla de que algo lleva mucha química, se hace casi siempre de forma peyorativa, para resaltar que no es natural, como si las cosas naturales no fueran también constituidas por materia química. Ah, claro, es que esa química la ha producido la Naturaleza, no el hombre en el laboratorio, te dicen convencidos. Nos tendremos que resignar a que la única acepción positiva de nuestra ciencia sea *tener buena química* para referirnos a la atracción entre dos personas. Por el contrario, la física, tan alabada como motora del conocimiento, en ese contexto resulta perjudicada, pues la atracción física tiene menos de espiritual. No voy a seguir aquí y ahora con ese gran tema de debate, que dejo para otra ocasión.

Los hidrocarburos son otro ejemplo interesante. Están constituidos, como todo el mundo sabe, esencialmente por hidrógeno y carbono, y en inglés se denominan *hydrocarbons*. A nadie se le ocurriría llamarlos *hidrocarbonos*. Sin embargo, si llevan otros elementos, como flúor (los freones de los aerosoles, el teflón, etc.), muchos los traducen sin pestañear como *fluorocarbonos*. Lo mismo ocurre con determinados polímeros. Las siglas del popular PVC corresponden al nombre inglés *poli(vinyl chloride)*, es decir, es un monómero, el cloruro de vinilo (cloroeteno en su nombre sistemático), que se polimeriza uniendo de forma aditiva muchos monómeros entre sí. Al final queda una larga cadena lineal con un átomo de cloro colgando cada dos carbonos. Pues bien, en español es frecuente verlo traducido (incluso en libros de texto) como *cloruro de polivinilo*, como si hubiera una larga estructura química (el polivinilo, en realidad polietileno) unida a un solo cloro. Lo correcto debería ser obviamente *poli(cloruro de vinilo)*.

Bueno, no quiero parecer muy técnico, ni pretendo que todo el mundo sea un experto en química, pero no sería mala idea que los medios de comunicación tuvieran algún contacto en el mundo científico, al que pudieran consultar cada vez que aparece un término químico que requiera traducción, o algún concepto que merezca ser explicado. Los diarios más importantes tienen una sección periódica dedicada a la ciencia y a la innovación dirigida por especialistas, a ellos podrían acudir. Incluso algunas revistas de entre las más prestigiosas, como *Nature* o *Science*, o la misma Academia que otorga los Premios Nobel, tienen departamentos de prensa que se ocupan de divulgar, en un lenguaje asequible, pero riguroso, los descubrimientos que salen a la luz.

El idioma español es sumamente rico, y muchos términos técnicos admiten diversas traducciones que a unos les suenan bien y a otros no tanto, pero que son todas razonables y no merecen ser criticadas. Por ejemplo, las reacciones de transposición pueden ser también de reagrupamiento o de

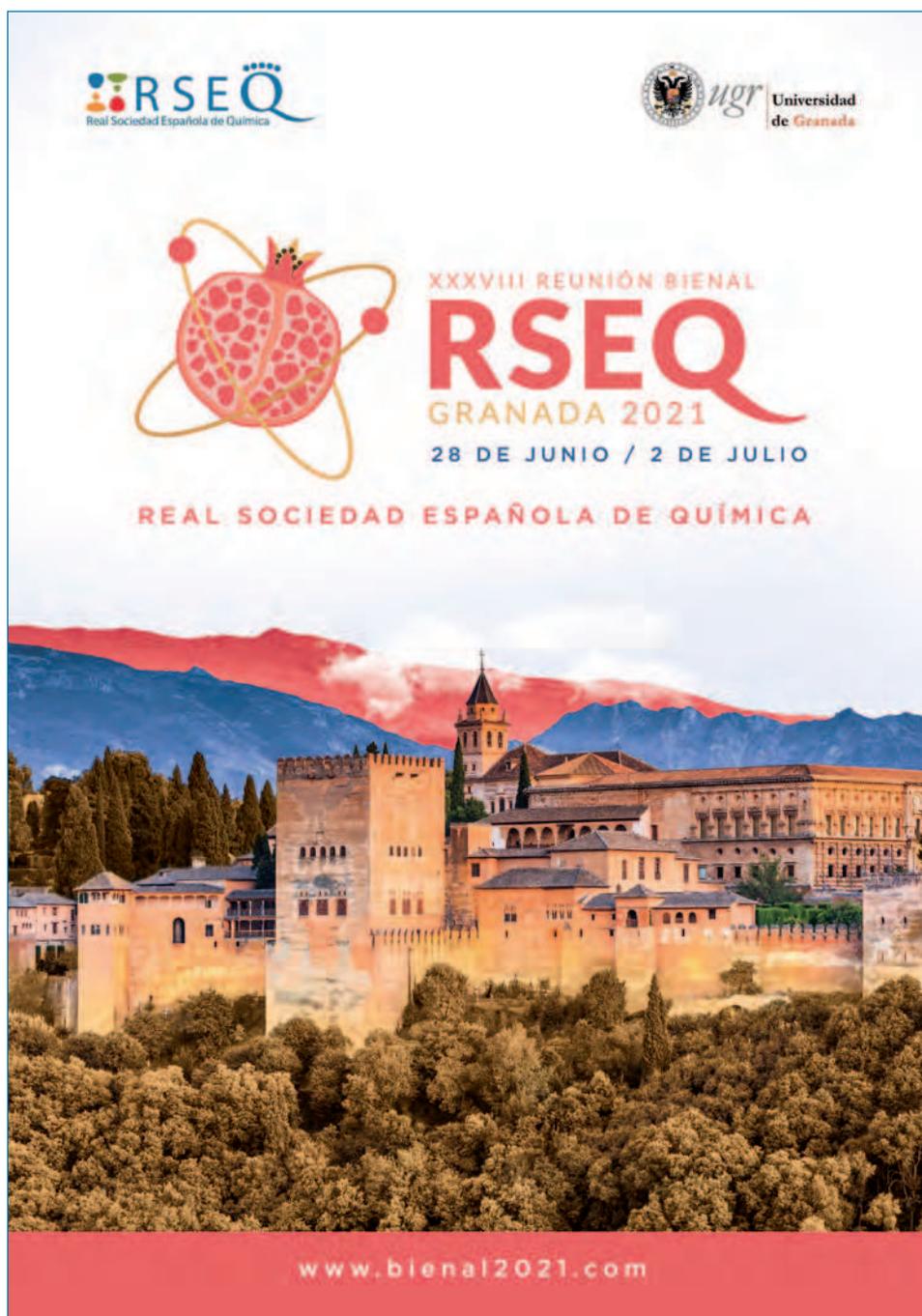


J. de Mendoza

Catedrático jubilado de Química Orgánica
(Universidad Autónoma de Madrid).
Profesor Emérito, Instituto Catalán de Investigación Química
(ICIQ, Tarragona).
C-e: jmendoza@icIQ.es

reordenación, según países e incluso regiones, y todas se refieren al término inglés *rearrangement*. Los orbitales (o bien orbitales, así lo he leído en algún libro de texto latinoamericano) se pueden solapar, recubrir, o hibridar. Parece que desde que se rompió la torre de Babel, estamos condenados a comunicarnos en muchos idiomas (¡qué entrañable resulta la historia de la humanidad vista por la Biblia!), y eso obliga a traducir o al menos a conocer los más importantes. Y si traducir textos científicos resulta a menudo complicado, no

digamos ya las traducciones literarias o los doblajes cinematográficos. Mi gran admiración por todas las buenas, aunque nada iguala el placer de leer los textos en su idioma original, cuando éste se conoce. En mi caso, el reto de *traduttore traditore* lo viví sólo una vez, hace muchos años, con mi amigo Miquel Pericás, actualmente director del ICIQ en Tarragona, con un libro de texto de Química Orgánica. Vaya verano nos tocó pasar, una extraña mezcla de playita y máquina de escribir, y ¡sin ordenadores!

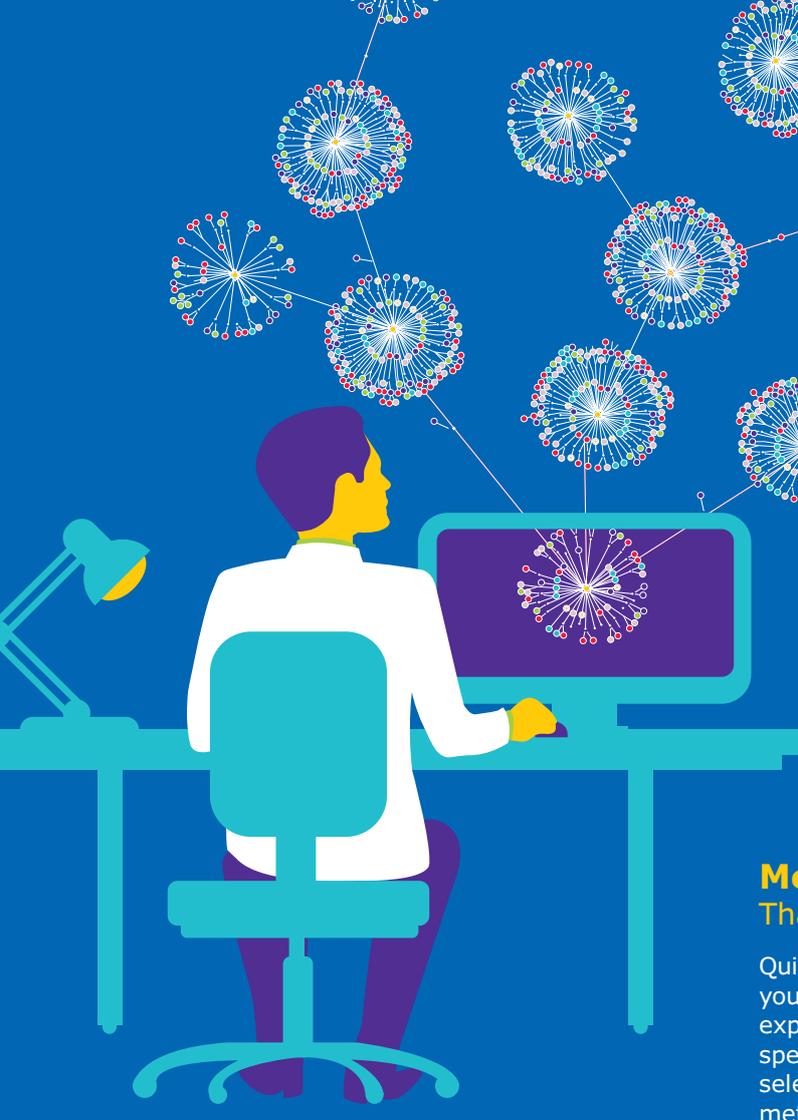


XXXVIII REUNIÓN BIENAL
RSEQ
GRANADA 2021
28 DE JUNIO / 2 DE JULIO
REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE QUÍMICA

www.bienal2021.com



MERCK

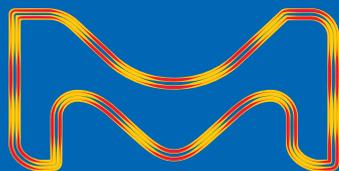


THE FUTURE OF RETRO

Meet Synthia™. Retrosynthesis Software
That Augments Your Expertise.

Quickly analyze billions of known and novel pathways against your search criteria. With highly nuanced algorithms and an expertly coded reaction database, Synthia goes beyond specific interactions to factor in potential conflict and selectivity issues, as well as stereo- and regiochemical methods. Or, guide your search by drawing from millions of chemical substances and reactions documented in the chemical literature. Now, you can quickly go from imagining what's possible to testing what's probable.

Design With Synthia™
SigmaAldrich.com/Synthia



The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the U.S. and Canada.

Copyright © 2018 Merck KGaA, Darmstadt, Germany and/or its affiliates. All Rights Reserved. Merck, the vibrant M, Synthia, and Sigma-Aldrich are trademarks of Merck KGaA, Darmstadt, Germany or its affiliates. All other trademarks are the property of their respective owners.

Sigma-Aldrich®
Lab Materials & Supplies