

Redes Metal-Orgánicas: Tipos, síntesis, modificaciones y materiales compuestos,
P. Salcedo-Abraira y P. Horcajada

La universidad española a la luz de la pandemia COVID-19, A. López de Munain

Aproximación histórica a momentos clave en el desarrollo de la química.

Oportunidades para su enseñanza, J. Quílez

Mujeres y laboratorios. Su invisibilización en la construcción de la tabla periódica
y el ejemplo de la química del flúor en España, I. Suay-Matallana



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 y DIPC San Sebastián-Donostia

José Manuel Costa

Universidad de Oviedo

Óscar Millet

CICbioGUNE, Derio, Bizkaia

Gabriel Pinto

Universidad Politécnica de Madrid

M.^a Carmen Redondo

Colegio Estudio, Madrid

Elena Sáez

Universidad Complutense de Madrid

Miquel Solà

Institut de Química Computacional i Catàlisi, Universitat de Girona

Rolando A. Spanevello

Universidad Nacional de Rosario, Argentina

Joaquín Tamariz

Instituto Politécnico Nacional, México

Alejandro Toro-Labbé

Pontificia Universidad Católica de Chile

María C. de la Torre

Instituto de Química Orgánica General, CSIC, Madrid

Otilia Val-Castillo

IES Luís Simarro Lacabra, Xàtiva, Valencia

Secretaría Editorial

Patricia Yáñez-Sedeño

Real Sociedad Española de Química

www.rseq.org

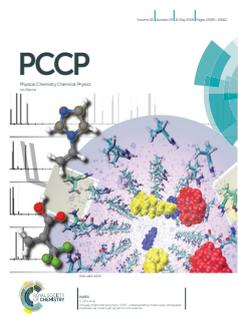
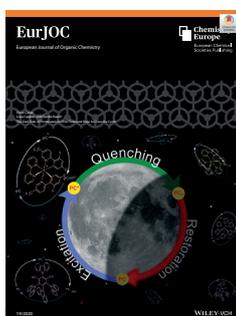
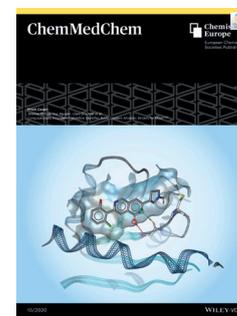
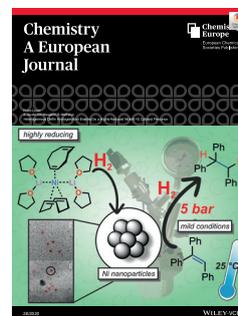
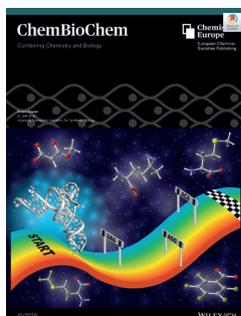
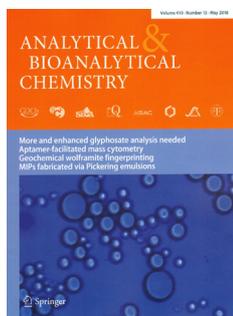
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense Ciudad Universitaria.

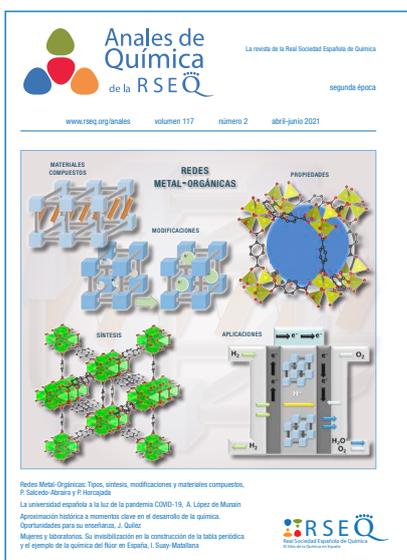
28040 Madrid

Tel (+34) 913 944 356



Revistas patrocinadas por la Real Sociedad Española de Química





Composición y producción:

Moisés Fernández
 Edinova Taller Editorial

Editorial	82
<i>Sonsoles Martín Santamaría</i>	
Carta del Presidente	83
<i>Antonio M. Echavarren</i>	
Información	
CRUE y CSIC alcanzan acuerdos con editoriales para financiar los gastos de publicaciones en Acceso Abierto. Los costes de publicación estarán cubiertos para un número de artículos en cada institución	84
<i>Pedro J. Pérez</i>	
Las acreditaciones internacionales ECTN en el ámbito de la Química gestionadas por ANECA (2018-2021)	86
<i>Ana Isabel Bonilla Calero y María Ángeles Serrano García</i>	
Ensayo	
La universidad española a la luz de la pandemia COVID-19	89
<i>Adolfo López de Munain</i>	
Investigación Química	
Redes Metal-Orgánicas. Tipos, síntesis, modificaciones y materiales compuestos	92
<i>Pablo Salcedo-Abraira y Patricia Horcajada</i>	
Historia de la Química	
En el Bicentenario de la fundación del Museo Nacional del Prado (II). Aspectos químicos de algunas pinturas relacionadas con la Historia de la Química	100
<i>José Pastor Villegas y Jesús Francisco Pastor Valle</i>	
Aproximación histórica a momentos clave en el desarrollo de la química. Oportunidades para su enseñanza	109
<i>Juan Quílez Pardo</i>	
Mujeres y laboratorios. Su invisibilización en la construcción de la tabla periódica y el ejemplo de la química del flúor en España	122
<i>Ignacio Suay-Matallana</i>	
Dorotea Barnés González (1904-2003). Una química española en la encrucijada de la espectroscopía y el estudio de los aminoácidos	127
<i>Álvaro Martínez del Pozo</i>	
Enseñanza de la Química	
La química contra la transmisión de la COVID-19. Un recurso eficaz y didáctico	132
<i>Fernando I. Prada Pérez de Azpeitia</i>	
Figura manipulativa para la didáctica de la Tabla Periódica y sus grupos	144
<i>Pablo Cassinello</i>	
La enseñanza de la física y la química en tiempos de pandemia	150
<i>Antonio Pérez Vicente</i>	
Propuesta didáctica para la obtención de una curva de calibración. Determinación de ácido acético con hidrogenocarbonato de sodio, lavavajillas y un agitador magnético	156
<i>Otilia Val-Castillo</i>	
Los aceites esenciales y su actividad biológica. Una propuesta didáctica	165
<i>Juan Antonio Llorens-Molina</i>	
Noticias	171
Artículos reseñables	187
Radicales (muy) libres	
Pureza	188
<i>Javier de Mendoza</i>	
Obituario	190



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

Sonsoles Martín Santamaría

Queridos colegas y amigos de la RSEQ.

Cuando este Equipo de Gobierno, presidido por el profesor Echavarren, cumple casi tres años y medio, me asomo a esta tribuna para recopilar de forma sencilla algunas de las tareas que hemos acometido. Recogimos el guante de gobernar una de las sociedades científicas más importantes de España (alguien podría decir que las más importante, desde luego por número de socios) que, sin embargo, seguía funcionando como “antaño”. Esto quiere decir que, aunque el funcionamiento era bueno, el volumen de la Sociedad era ya de tales dimensiones, que se imponía emprender una serie de reformas para mutar a un sistema más profesional y moderno. No fue, en realidad, un plan que diseñáramos en el primer día, sino que lo fuimos desarrollando paulatinamente.

Una de las reformas más importantes ha sido la que ha afectado a la contabilidad. Por un lado, la gestión interna y, por otro, la gestión de las contabilidades de los Grupos y de las Secciones Territoriales, estableciéndose protocolos homogéneos para la gestión contable y un nuevo flujo de trabajo para poder rendir cuentas ante Hacienda en los plazos establecidos. No hay que olvidar que somos una única sociedad y, aunque cada grupo o sección maneje su presupuesto, todas las cuentas son cuentas de la RSEQ, es decir de todos sus socios. Se ha implementado también un sistema de contabilidad en la nube que nos permite conectarnos directamente con las entidades bancarias, así como llevar a cabo la facturación de la Sociedad. Todo este proceso ha sido tremendamente laborioso por parte de la Secretaría Técnica. Es digno de mención que, por primera vez en la historia reciente, la RSEQ haya cerrado la contabilidad en el primer trimestre del año 2021. También merece la pena destacar que el personal de la Secretaría Técnica ha recibido formación específica en Contabilidad para Entidades sin ánimo de lucro.

Otra reforma muy importante, esta más visible, ha sido el cambio a un sistema en línea para la gestión de los miembros de la RSEQ, para lo que os hemos pedido vuestra colaboración a la hora de actualizar la base de datos. Esto ha supuesto, por ejemplo, poder automatizar el proceso de cobro de las cuotas, lo que facilitará enormemente el trabajo de la Secretaría Técnica. También se han configurado cuentas institucionales para la comunicación de los grupos y las secciones territoriales con sus miembros, y se ha llevado a cabo la actualización de la página web de la RSEQ integrando, no de forma completa aun cuando escribo estas líneas, las páginas webs de los grupos y de las secciones dentro del dominio



RSEQ. Esto forma parte de la modernización y profesionalización de nuestra Sociedad. Nuestra visibilidad en las redes sociales es grande, siendo canal de difusión de muchas noticias, incluidas las de *EuChemS* y *Chemistry Europe*. En este mismo proceso de profesionalización se encuadra la adaptación de la RSEQ a la Ley de Protección de Datos.

Me dejo fuera muchas cosas: la reforma de la revista *Anales de la Real Sociedad Española de Química* que ya conocéis de primera mano por parte del Director de Publicaciones, la gestión de las Olimpiadas de Química, la gestión de actividades científicas en tiempos de pandemia, nuestra presencia en otros foros, nuevos patrocinios...

Me ha parecido importante compartir con vosotros este listado general de reformas técnicas que aglutina decenas de tareas individuales y muchísimo trabajo. Nada se hubiera podido realizar sin un equipo de personas entusiastas y muy dedicadas, a las que agradezco enormemente desde aquí: las que forman la Secretaría Técnica (Patricia Yáñez-Sedeño y Coral Bastos, con Ivett Aportela a la cabeza), la coordinadora de la página web y comunicaciones (Ruth Pérez) y el Tesorero (Óscar Rodríguez Montoro).

Un saludo muy cordial para todos, deseándoos lo mejor para vosotros y vuestras familias,

SONSOLES MARTÍN SANTAMARÍA
Secretaria General de la Real Sociedad Española de Química

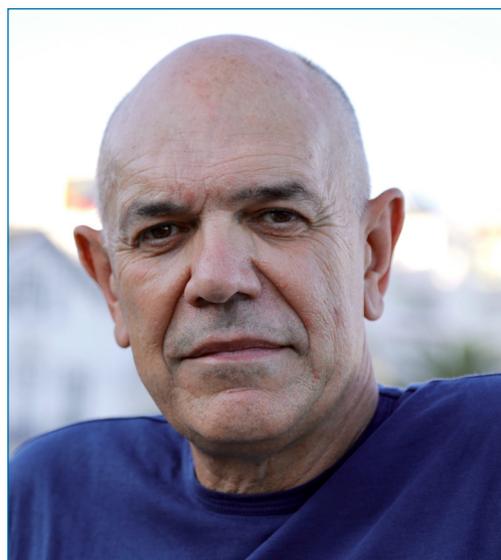
Antonio M. Echavarren

La Confederación Española de Sociedades Científicas (COSCE) presentó al Ministerio de Ciencia e Innovación el pasado 12 de abril el “Informe de urgencia ante una inmediata propuesta de reforma de la Ley de la Ciencia”, un documento elaborado por una comisión de expertos que recoge “las propuestas de la comunidad científica española ante una próxima modificación legal de la Ley de la Ciencia”, que se aprobó en 2011 por una amplia mayoría parlamentaria.

Mi intención con esta carta no es insistir en los argumentos del “informe de urgencia” presentado por a COSCE al que, desde el Equipo de Gobierno, dimos la máxima publicidad en la web de la RSEQ, como hacemos con todos los comunicados de la COSCE, sino el reflexionar en uno de los aspectos que ha suscitado mayor recelo.

Mientras que tanto en el documento de la COSCE como en otros foros profesionales se daba por hecho la desaparición del programa Ramón y Cajal y su sustitución por otros tipos de contratos, Rafael Rodrigo, Secretario General de Investigación, reprochaba en la prensa a las sociedades científicas el tener una “opinión muy equivocada”, afirmando que en ese documento se vertía “una opinión sesgada sobre la endogamia del nuevo sistema”, cuando, según Rodrigo, “la endogamia se ataca en su posible raíz” con la reforma propuesta. Así, el Secretario General puntualizaba que la reforma contempla que el concurso de acceso al nuevo tipo de contrato se haría de forma externa, a través de la Agencia Estatal de Investigación, evitando de esa manera caer en el pecado de endogamia. Sí, la famosa “endogamia” de la que nadie parece ser culpable. La selección de los “nuestros” frente a los “de fuera”, independientemente de los méritos de cada uno, y que le confiere carácter de maldición bíblica.

El exigir que esa selección de los nuevos contratados tenga lugar “de forma externa”, da por supuesto que, en caso contrario, serían seleccionados los candidatos “de la casa”, con menores méritos, como si la endogamia fuera un fenómeno natural, consustancial a la naturaleza humana. De ser así, habría que matizar que esa naturaleza humana se debe referir a su versión española, porque en la mayor parte de los países avanzados son los departamentos los que elijen a los nuevos profesores e investigadores, directamente o mediante comisiones delegadas, cuidándose mucho de seleccionar a los candidatos con



mayor talento, capaces de incorporar nuevas ideas y recursos a esos departamentos.

Si fuese cierto, como afirma el Secretario General, que esa reforma de la Ley de la Ciencia “ataca en su posible raíz” a la endogamia (universitaria y de otros organismos públicos de investigación), este Ministerio de Ciencia e Innovación sería recordado por haber conseguido algo revolucionario en el ámbito de la investigación española.

Sin embargo, en mi opinión, esa “diferencia española” (y de otros países del sur de Europa) tiene raíces más profundas, en las que se entremezclan la organización de nuestros departamentos, institutos y universidades, con la tradicional financiación de la investigación de forma preferente a “grupos” o “líneas de investigación”, que a veces se llegan a heredar, en vez de a “ideas/proyectos” que son, salvo casos excepcionales, el fruto de la elaboración intelectual de individuos concretos. El que este problema sea complejo, no quiere decir que su solución no resulte urgente y, aunque sea bastante escéptico, si esa reforma de la ley contribuyese en alguna medida a ello, bienvenida sea.

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

CRUE y CSIC alcanzan acuerdos con editoriales para financiar los gastos de publicaciones en Acceso Abierto

Los costes de publicación estarán cubiertos para un número de artículos en cada institución

Pedro J. Pérez

La Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas (CRUE) y el CSIC han alcanzado una serie de acuerdos transformativos con diversas editoriales que publican revistas del ámbito químico para proporcionar una cierta cobertura económica a los autores que decidan exponer sus artículos en acceso abierto. De momento, estas editoriales son Elsevier, Springer, American Chemical Society y Wiley, siendo la duración de los acuerdos de cuatro años para las tres primeras y de un año, con visos de prórroga, para la última¹. Cambridge University Press cuenta ya también con acuerdos con la mayoría de Universidades españolas, si bien estos se han realizado fuera del conjunto CRUE-CSIC. Las revistas a las que se aplican estos acuerdos son las denominadas híbridas, que aceptan la publicación de artículos para ser leídos tanto mediante

suscripción como en acceso abierto. Por el contrario, esta política de financiación de costes no es aplicable a los artículos publicados en revistas que sólo operan en acceso abierto.

Estos acuerdos transformativos alcanzados suponen, de manera general, que una buena parte de la financiación que Universidades y CSIC empleaban hasta ahora para cubrir suscripciones se dedicará al pago de los costes de procesado de artículos, o APCs (del inglés, Article Processing Charges), y que permite su publicación en acceso abierto. Esta redistribución de crédito no afecta en absoluto a la disponibilidad de los fondos bibliográficos que cada institución tiene suscritos, y que deben mantenerse inalterados. De hecho, la denominación de los acuerdos como “Leer y Publicar” (Read + Publish) asegura ambas cosas. Además, la negociación CRUE-CSIC con las editoriales ha supuesto un cierto descuento de los APCs respecto de la cuantía que habría que pagar si se realizaran fuera de este contexto.

En estos momentos, cada Universidad dispone de crédito para financiar un número de APCs anuales en cada una de las editoriales antes mencionadas. La asignación de los mismos se realiza bajo unos criterios generales que pueden ser modificados por cada institución, y que pueden diferir de una a otra².

El modo de funcionamiento es muy simple. Desde hace años, en numerosas editoriales cuando un artículo

¹ Sitios web de las editoriales específicos de los acuerdos con España:
Elsevier: <https://www.elsevier.com/open-access/agreements/spain>
Wiley: <https://authorservices.wiley.com/author-resources/Journal-Authors/open-access/affiliation-policies-payments/crue-csic-agreement.html>
Springer: <https://group.springernature.com/gp/group/media/press-releases/springer-nature-leads-drive-for-oa-spain/19134258>
(aún sin página propia para España).
ACS: <https://axial.acs.org/2020/02/20/acs-read-and-publish-agreements/>
(aún sin página propia para España).
CambridgeUniversityPress: <https://www.cambridge.org/core/services/open-access-policies/read-and-publish-agreements/spain>



P. J. Pérez

Centro de Investigación en Química Sostenible (CIQSO) y Departamento de Química
Edificio R. H. Grubbs
Campus de El Carmen s/n
Universidad de Huelva
C-e: perez@ciqso.uhu.es

Recibido: 27/05/2021. Aceptado: 31/05/2021.

² Sitios webs de bibliotecas universitarias con información sobre estos acuerdos:

Universidad Complutense: <https://biblioguias.ucm.es/publicar-en-acceso-abierto/acuerdos-transformativos>

Universidad de Sevilla:

https://bib.us.es/estudia_e_investiga/investigacion/publicar/descuentos

Universitat de Barcelona: <https://crai.ub.edu/es/que-ofrece-el-crai/derechos-de-autor-y-propiedad-intelectual-y-acceso-abierto/acceso-abierto-UB/publicar-ayudas/acuerdos-editores>

Universidad de Zaragoza:

<https://biblioteca.unizar.es/acceso-abierto/publicar-en-abierto-apcs>

ha sido aceptado se pregunta al autor si quiere publicarlo en acceso abierto. Ahora, en el caso de las editoriales sujetas a estos acuerdos, al realizar esa pregunta se detallan las instituciones españolas que están acogidas a los mismos. Si el autor desea publicar en acceso abierto, sólo hay que marcar dicha opción. Ello hace que la editorial comunique a la Universidad/CSIC dicha petición, y que éstos contesten a la editorial de manera afirmativa o negativa, respuesta que la editorial transmite automáticamente al autor. Todo este proceso ocurre de manera paralela al procesado del artículo hacia las pruebas de imprenta, por lo que no genera ningún retraso.

En resumen, se están dando los primeros pasos para que la ciencia que se genera en el sistema público de I+D alcance el nivel de diseminación que requieren las convocatorias públicas de financiación, pero que no se acompañan con los fondos suficientes que se precisan para tal fin. Si bien es cierto que, de momento, la proporción de artículos que puedan alcanzar el acceso abierto mediante estos acuerdos es baja en relación a la producción total, es indudable que sin estas medidas la participación española en esta modalidad seguiría bajo mínimos durante años.



Las acreditaciones internacionales ECTN en el ámbito de la Química gestionadas por ANECA (2018-2021)

Ana Isabel Bonilla Calero y María Ángeles Serrano García

Resumen: Este trabajo tiene como objetivo analizar cómo se desarrollan las acreditaciones internacionales de programas universitarios de Química, gestionadas por la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA), en colaboración con la Real Sociedad Española de Química (RSEQ), dentro del Programa de Sellos Internacionales de Calidad (SIC), en las que se concede un sello internacional de Química, a aquellos programas que demuestran el cumplimiento de los criterios de evaluación establecidos por la *European Chemistry Thematic Network Association* (ECTN), basados en resultados de aprendizaje seleccionados por académicos/as y profesionales de diferentes países en el ámbito de la Química. Los datos utilizados en este estudio se han obtenido de las evaluaciones realizadas por ANECA entre enero del 2018 y abril del 2021. 9 universidades han obtenido el sello de Euro-label® para sus programas educativos de Química en el período analizado.

Palabras clave: sellos internacionales, calidad, acreditación, Química, ANECA, ECTN.

Abstract: The aim of this work is to analyze how international accreditations of university programs in Chemistry are developed, managed by the National Agency for Quality Assessment and Accreditation (ANECA), in collaboration with the Royal Spanish Society of Chemistry (RSEQ), within the International Quality Labels Program (SIC), in which an international Chemistry label is awarded, to those programs that show compliance with the criteria of evaluation established by the European Chemistry Thematic Network Association (ECTN), based on learning outcomes selected by academics and professionals from different countries in the field of Chemistry. The data used in this study has been obtained from the evaluations carried out by ANECA between January 2018 and April 2021. 9 universities have obtained the Euro-label® label for their Chemistry educational programs in the period analyzed.

Keywords: international labels, quality, accreditation, Chemistry, ANECA, ECTN.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es presentar los reconocimientos internacionales (sellos) obtenidos por programas universitarios oficiales de Química, desde el 2018 hasta abril del 2021, en un proceso de acreditación gestionado por la Agencia Nacional de Evaluación de la

Calidad y Acreditación (ANECA), que tiene firmado un convenio de colaboración con la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) para incorporar en los equipos de evaluación de este sello la participación de evaluadores/as del sector empresarial.

Los programas que se presentan a estas evaluaciones optan a dos sellos europeos: Euro-Bachelor® para Grados o Euro-Master® para títulos de Máster, según una serie de estándares definidos de acuerdo con los principios de calidad, relevancia, transparencia, reconocimiento y movilidad, específicos para títulos de Química y establecidos por la *European Chemistry Thematic Network Association* (ECTN) y, así como otros generales para todos los ámbitos del conocimiento, fijados por la *European Association for Quality Assurance in Higher Education* (ENQA) para programas oficiales y alienados con los de otros sellos que, también, son llevados a cabo por ANECA, como por ejemplo, los establecidos por la *European Network for Accreditation of Engineering Education* (ENAE) para el sello EUR-ACE® de Ingeniería y por la *European Quality Assurance Network for Informatics Education* (EQANIE) para el sello EUR-INF de Informática (ANECA, 2021a).



A. I. Bonilla Calero¹ M. Á. Serrano García²

¹ Jefa del Programa de Sellos Internacionales de Calidad de ANECA

² Directora de la División de Enseñanzas e Instituciones de ANECA

C-e: abonilla@aneca.es mserrano@aneca.es

Recibido: 29/04/2021. Aceptado: 06/05/2021.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANECA desde el 2018 (proyecto piloto) abre una convocatoria anual de evaluación (todos los meses de noviembre), a la que se pueden presentar todos los programas españoles y extranjeros, que hayan superado recientemente una acreditación nacional o un proceso similar.

En el momento en que el que se registra la solicitud de evaluación por la Agencia en noviembre, la universidad dispone de un tiempo para cumplimentar y presentar electrónicamente a ANECA (previsiblemente mes de mayo) un informe de autoevaluación y evidencias, mediante los que se justifica el cumplimiento de los criterios establecidos en estas acreditaciones internacionales por los programas formativos a evaluar.

Durante todo el proceso de preparación de esta documentación, la universidad cuenta con el acompañamiento de la Agencia en todo momento, resolviendo todas las dudas que les surjan a las personas implicadas en este proceso de evaluación por correo, teléfono y reuniones virtuales. Entre dos o tres meses después de la presentación de esta documentación a través de la Icloud de ANECA por la universidad, se realiza una visita (desde el 2020 virtual¹) al centro en el que se imparte el programa formativo por un panel de expertos/a compuesto por: un/a presidente/a, un/a vocal académico/a, un/a vocal profesional, un/a vocal estudiante y un secretario/a) nombrados/as por ANECA Cuyo control de trabajo y evaluación de desempeño se realiza por la Agencia. Estas personas evaluadoras son las encargadas de redactar, en colaboración, un informe basado en la información

obtenida del análisis documental del informe de autoevaluación y evidencias facilitadas por la universidad previamente a la visita y durante la misma, en la que se realizan entrevistas a los agentes implicados en el programa formativo, como: equipo directivo, profesores/as, estudiantes, egresados/as y empleadores/as.

El informe de evaluación redactado por dicho panel de expertos/as es enviado a la Comisión de Acreditación del Sello, que es la encargada de emitir una evaluación final, una vez analizadas las posibles alegaciones que pueda presentar la universidad al informe derivado de la evaluación provisional.

Esta Comisión está compuesta por: 6 académicos/as y 6 profesionales del ámbito de la Química, uno/a de ellos/as ejerce de presidente. Los/as profesionales son propuestos/as por la RSEQ. Esta Comisión, también, cuenta con un séptimo/a académico/a o técnico/a de calidad, que ejerce como secretario/a, que puede ser de un ámbito diferente al de la Química, al no tener un rol de evaluador/a. Él/ella es el/a encargado/a de garantizar que la evaluación cumpla toda la normativa establecida por ANECA, previamente al inicio de ésta. Los/as evaluadores/as de esta Comisión cuentan con amplia experiencia internacional o pueden estar desempeñando su labor profesional en un país diferente a España, en el momento de su participación en dicha Comisión, dada la importancia de aportar a estas evaluaciones una perspectiva internacional en el ámbito de Química. ANECA ha gestionado la evaluación del sello de Química de ECTN de **9 programas**, 8 de nivel de Grado y 1 de Máster, en el período analizado (véase Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de acreditaciones internacionales distribuidas por universidades

Convocatoria	Universidades	Programa formativo con sello ECTN
Piloto (2018)	Universidad Autónoma de Madrid	Graduado/a en Química
	Universitat de València	Graduado/a en Química
2019	Universidad de Castilla-La Mancha	Graduado/a en Química
	Universidad de Córdoba	Graduado/a en Química
	Universidad Complutense de Madrid	Graduado/a en Química
2020	Universidad de la Laguna	Graduado/a en Química
	Universidad de Alicante	Graduado/a en Química
	Universidad de Islas Baleares	Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química
	Universidad de Murcia	Graduado/a en Química

Fuente: (ANECA, 2021b) y (ECTN, 2021).

¹ Bonilla-Calero, A. I. y Serrano-García, M. A. (2021). "Auditorías virtuales en el Programa de Sellos Internacionales de Calidad (SIC) de ANECA en tiempos de pandemia", *RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*.

<http://revistas.uned.es/index.php/ried/article/view/29092>

El 100% de las solicitudes presentadas durante el período analizado han superado con éxito el proceso de evaluación (véase Tabla 2).

Tabla 2. Resultados finales positivos (obtención y obtención con prescripciones) *versus* negativos (denegación)

Tipo de resultado ¹	Número de evaluaciones	Porcentaje
Obtención	4	44,44%
Obtención con prescripciones ²	5	55,56%
Denegación	0	0%
Total	9	–

¹ Obtención: concesión del sello durante 6 años para los programas de nivel de Grado y durante 4 años para los programas de nivel de Máster.

² Obtención con prescripciones: concesión del sello durante 3 años para el nivel de Grado y durante 2 años para los programas de nivel de Máster. Para ampliar este período a 3 años más en Grado y 2 en Máster, se debe demostrar previamente a la finalización del período de obtención el cumplimiento de los aspectos de mejora (prescripciones) emitidas en el informe de evaluación final.

Las ventajas de obtener este sello para los agentes implicados en este proceso son muchos. Algunos de ellos son: obtener un reconocimiento a nivel mundial, que se convierta en un incentivo para cursar estos programas formativos por potenciales estudiantes y para aumentar las oportunidades de contratación a sus egresados/as por las empresas de diferentes países, así como aumentar la movilidad nacional e internacional de los/as estudiantes y la calidad, la visibilidad y los recursos de los centros que los imparten.

En el mes de diciembre de 2020 se realizó desde ANECA un sondeo a las universidades que habían conseguido alguno de los sellos gestionados por la misma (entre los que se encuentra Química) para preguntarles a sus gestores/as, profesores/as, estudiantes, egresados/as y empleadores/as, por los beneficios que habían experimentado desde la obtención de alguno de estos sellos y se recibieron 116 testimonios distribuidos entre 19 universidades españolas, 3 mexicanas y 1 argentina. Todos ellos están publicados en la Sección SIC² de la página web de ANECA³.

CONCLUSIONES

- ANECA ha gestionado la evaluación del sello de Química de ECTN de los programas formativos de 9 universidades, 8 de nivel de Grado y 1 de Máster, durante el período analizado.
- Todos los programas que se han presentado a las evaluaciones del sello de ECTN desarrolladas por la Agencia han superado el proceso de evaluación con resultado favorable de obtención u obtención de prescripciones. Estos últimos tendrán que demostrar el cumplimiento de los aspectos

de mejora identificados en el proceso de evaluación en un plazo inferior a 3 años, en el caso de Grado, y de 2 en el caso de Máster, a contar desde el momento en el que recibieron el informe de evaluación final del sello.

- Son muchos los beneficios que aportan estos sellos a los agentes implicados en los programas con estos reconocimientos, como, por ejemplo, incentivar a potenciales estudiantes a elegir estos programas formativos con sello y a empresarios/as de diferentes países a contratar a egresados/as con sello, así como incrementar la movilidad nacional e internacional entre sus egresados/as y la calidad, la visibilidad y los recursos de los centros que los imparten.

BIBLIOGRAFÍA

- ANECA (2021a). *Criterios de evaluación de los Sellos Internacionales de Calidad*. Disponible en: <http://www.aneca.es/Programas-de-evaluacion/Evaluacion-de-titulos/SIC>
- ANECA (2021b) *Listado de títulos universitarios con Sello Euro-labels®*. Disponible en: <http://www.aneca.es/Programas-de-evaluacion/Evaluacion-de-titulos/SIC/Programas-formativos-con-Sello>
- Bonilla-Calero, A. I. y Serrano-García, M. A. (2021). “Auditorías virtuales en el Programa de Sellos Internacionales de Calidad (SIC) de ANECA en tiempos de pandemia”, *RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*. <http://revistas.uned.es/index.php/ried/article/view/29092>
- ECTN (2021) *Listado de títulos Euro-bachelor® y Euro-master® evaluados por todas las agencias autorizadas por ECTN*. Disponible en: <http://www.aneca.es/Programas-de-evaluacion/Evaluacion-de-titulos/SIC/Programas-formativos-con-Sello>

² SIC (Sellos Internacionales de Calidad).

³ <http://www.aneca.es/Programas-de-evaluacion/Evaluacion-de-titulos/SIC>

La universidad española a la luz de la pandemia COVID-19

Adolfo López de Munain

La pandemia del COVID-19 ha reactivado, ya veremos por cuanto tiempo, la urgencia de que la política científica española experimente profundas reformas comenzando por la inversión, pero también en sus estructuras, si no quiere verse a merced de los descubrimientos y desarrollos hechos en otros lares. La debilidad financiera y el escaso tamaño de la industria biotecnológica española, ligados a las dificultades para la traslación de los descubrimientos desde la investigación académica, junto con nuestra insolvencia económica, nos deben hacer reflexionar sobre las causas de esta disfunción crónica que lastra nuestras posibilidades de desarrollo desde hace demasiado tiempo.

Hace unos meses, el rector de la Universidad Autónoma de Madrid, Rafael Garesse afirmaba que, gracias a la pandemia la sociedad española había vuelto la mirada hacia la investigación y lanzaba una llamada para aprovechar la ocasión y hacer las reformas necesarias que nos ayuden a converger con otros países.^[1] Suscribo íntegramente los deseos del rector, pero su apreciación sobre el cambio de mentalidad española se me antoja demasiado optimista. Al igual que los aplausos al sector sanitario desde los balcones en el confinamiento, dejaron paso a los botellones y a conductas incívicas que nos han traído hasta las puertas de la cuarta ola de la epidemia, la socie-

dad española olvida sistemáticamente los incumplimientos de los políticos con la ciencia y la Universidad. Probablemente el problema de fondo es el desprecio secular de los valores del conocimiento y la cultura por parte de esta sociedad.

No obstante, sería injusto no reconocer la existencia de una pléyade de universitarios, que, a título individual o colectivo, han tratado desde hace décadas de plasmar sus inquietudes sobre la Universidad en informes, artículos, libros, blogs, que desgranar casi todos los problemas que esa deseada reforma debería resolver. Sin embargo, la escasa capacidad de impacto que estos trabajos han tenido de cara a materializar las reformas propuestas, se debe en parte, a que la Universidad ha esperado pasivamente a que el poder político, generalmente asesorado por *lobbies* educativos fuertemente ideologizados, tome la iniciativa, lo que explica el sempiterno mecanismo pendular de reformas en el que llevamos instalados desde hace décadas.

Hay múltiples evidencias que sustentan la idea de que la Universidad española está instalada en una crisis estructural, que aunque no le impide lograr determinados éxitos, lastra sus posibilidades de contribuir de forma más notable a mejorar las perspectivas socioeconómicas del país. Algunas, como el hecho de sólo haya una universidad española, la de Barcelona, entre las 200 mejores del mundo, según el ranking elaborado por la Universidad Jiao Tong de Shanghai,^[2] o que la tasa de abandono (20%) o de cambio de los estudios universitarios (10%), sea de las más altas del mundo,^[3] son evidencias objetivas e incontestables, mientras otras son más discutibles o dependen del cristal ideológico con que se miren. Sin restar valor a los índices globales, hay que señalar también en algunos índices sectoriales, como por ejemplo en Veterinaria donde la Universidad Autónoma de Barcelona ocupa el 5.º lugar y la Complutense de Madrid el 14.º y varias más (Murcia, Córdoba, Castilla-La Mancha, León, Santiago, Zaragoza) entre las 100 primeras.^[4] En otras



A. López de
Munain

Recibido: 22/03/2021. Aceptado: 26/05/2021.

Doctor en Medicina. Licenciado en Historia
Profesor de Neurología
Departamento de Neurociencias
Universidad del País Vasco
Director del Área de Neurociencias
Instituto Sanitario Biodonostia.
Director Científico de CIBERNED (Instituto Carlos III)
C-e: adolfo.lopezdemunainarregui@osakidetza.eus

disciplinas como la Medicina Clínica, la Universidad de Barcelona se sitúa en el puesto 48 y varias más entre las 300 primeras (Valencia, Autónoma de Barcelona, Autónoma de Madrid, Pompeu Fabra y Navarra).^[5]

Se ha señalado por muchos universitarios que los problemas de la Universidad española se podrían resumir en una triada formada por *el localismo, la endogamia y una deficiente gobernanza*, siendo probablemente esta última, junto con la deficiente financiación, las causas últimas que engendran los otros dos.^[6,7] Para otros, como el ex-rector de la Universidad del País Vasco y presidente de JAKIUNDE, Juan Ignacio Pérez Iglesias, los 7 pecados capitales de la Universidad serían la *autocomplacencia, la impostura, el localismo, el igualitarismo, la irresponsabilidad, la burocracia y la uniformidad*.^[8]

Aunque todos estos problemas son bastante reales, ya que, por ejemplo, si hablamos de endogamia, el 73% de los docentes impartían sus enseñanzas en la universidad donde se doctoraron en 2013,^[9] según veremos, existen otros muchos problemas y no menores, que contribuyen de manera significativa al malestar dentro de la comunidad universitaria. Las diferentes fuerzas políticas ponen el acento en un tipo de problemas u otros. Así, las fuerzas políticas de derecha y centro-derecha, ponen un mayor acento en la rigidez funcional de la universidad, las dificultades para hacer prevalecer el mérito sobre la mediocridad y las dificultades que tiene la universidad para crear y transferir un conocimiento que dé soporte a un nuevo modelo económico que España lleva buscando sin éxito desde la anterior crisis. Para la izquierda, los problemas de la universidad se arreglarían con un mayor número de profesores, un mayor número y cuantía de las becas, con las que combatir desigualdades, y un mayor presupuesto para investigación, es decir con una mayor inversión del estado, pero sin llegar a plantear ninguna reforma estructural de calado.

A estos problemas generales, cuya cronificación deriva de la incapacidad de los políticos españoles actuales de suscitar consensos en cuestiones básicas, algo propio de un país con poco rodaje democrático, se añaden otros derivados de la imperfecta aplicación del modelo de Bolonia que, a causa de la crisis de 2008, no se acompañó del incremento de inversión correspondiente como hubiese sido necesario. La construcción del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES)^[10] pretendía organizar la educación europea según los principios de calidad, movilidad, diversidad y competitividad con varios retos: *la reforma curricular que permitiese la movilidad de docentes, profesores y el reconocimiento mutuo de las titulaciones y la renovación metodológica*. Esta formidable revolución se puso en marcha coincidiendo con la crisis de 2008, cuyas consecuencias en España fueron mucho más graves y duraderas que en otros países de Europa, lo que ha lastrado enormemente su puesta en marcha en nuestro país.

De hecho, en los últimos 10 años la Universidad española está instalada en un presupuesto cercano a la base cero (congelación de la promoción del profesorado, recorte en los fondos de investigación, etc.), que si

bien ha gestionado aceptablemente, puesto que se han mantenido e incluso mejorado, algunos *ratios*, es manifiestamente insuficiente para acometer las reformas de calado que exigía el EEES. En este sentido, la última década puede ser considerada como una década perdida para la reforma de la Universidad. A estos problemas que se verán agudizados por la presente crisis ligada a la pandemia COVID-19, se añaden otros mucho más antiguos que contribuyen cada uno a agravar la situación de la Universidad.

En este escenario general, se han sucedido los cambios legislativos promovidos por los gobiernos autonómicos con propuestas locales de mejora en el ámbito de la investigación (como por ejemplo, programa de Institutos IMDEA de la Comunidad de Madrid, los programas de recursos humanos como el ICREA catalán, o el IKERBASQUE del País Vasco, o los centros de excelencia como los Centros de Investigación Cooperativa de Euskadi, entre otros), que en general son apéndices de excelencia que no han conseguido permear en profundidad el sistema universitario español, y que por el contrario, han servido a veces para poner de manifiesto la existencia de corrientes inmovilistas de fondo, que subyacen en una buena parte del *establishment* universitario español. La insistencia en legislar estas cuestiones desde el centro del estado de una manera uniforme para todas las universidades, sin explorar las posibilidades al respecto del sistema autonómico español ha hurtado la posibilidad de intentar otros enfoques para resolver el problema.

En España hay actualmente 82 universidades de las que 50 son universidades públicas (47 presenciales, 1 no presencial y 2 universidades especiales: la-UIMP y UNIA-) y 32 universidades privadas (28 presenciales y 4 no presenciales). Hay que destacar el crecimiento muy importante de las universidades privadas (que han pasado de 3 a 32 en menos de 20 años), donde se han materializado con éxito algunas de las propuestas de reforma, pero que tienen el grave hándicap para su desarrollo y extensión el que sus costes no pueden ser asumidos por una mayoría de estudiantes, a pesar de lo cual, el número de alumnos universitarios en universidades privadas tanto en grados como sobre todo en másteres, no ha dejado de crecer en la última década. Según datos de ACADE, El número de alumnos matriculados en universidades privadas creció un 48,3% en el periodo comprendido entre el curso 2010-2011 y el 2017.^[11]

El debate político sobre la educación en el último decenio ha estado dominado por el debate de la educación preuniversitaria con la llamada Ley Wert promulgada en 2013 y que reformó dos leyes previas, la LOGSE y la LOE promulgadas por gobiernos socialistas y cuya derogación ya está en marcha. Entretanto, la Universidad española está pendiente del devenir de la propuesta del ministro Manuel Castells, que presentó un borrador de Real Decreto durante el primer estado de alarma que está actualmente en fase de consulta pública. El texto conocido ha sido ya criticado por sectores de la izquierda, con el argumento ciertamente

simplista de que recoge algunos puntos propuestos por el anterior ministro de Educación, Iñigo Méndez de Vigo, como son la *acreditación institucional*, la *creación de títulos conjuntos con otros países europeos*, la *posibilidad de escoger carreras a la carta o acercar la empresa a la universidad para que haya grados y másteres con mención dual*, donde los alumnos trabajan con contrato laboral desde el primer día. Este tipo de críticas *ex-ante*, indica el nivel de sectarismo en el que viven instalados algunos estamentos docentes y que refuerza mi convicción de que el debate ha de ser previamente interno para consensuar primero e impulsar después una reforma de abajo arriba para que tenga éxito.

Las urgencias de la pandemia y la debilidad del gobierno auguran una muy incierta tramitación parlamentaria de este proyecto, salvo que la gravedad de la situación genere un ambiente favorecedor de consensos razonables, como el que estuvo a punto de lograr hace 10 años el ministro Ángel Gabilondo. El objetivo no debe ser otro que el realizar avances graduales que nos acerquen a un modelo de universidad pública que, si bien no contente a todos, contente lo suficiente a una mayoría social. La esperada llegada de los fondos de recuperación de la UE puede ser una gran oportunidad si se acompañan de las necesarias reformas estructurales que el sistema precisa.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores José Félix Martí Massó, Juanito Etxeberria, Jose Antonio Riancho, José Berciano, Juan Jose Zarranz, José María Estrela, Joaquín Gadea, Miguel Angel Sierra, Pedro Miguel Echenique, Félix Goñi, Juan Ignacio Pérez Iglesias, Federico Gutiérrez Solana, Fernando

Cossío, Paco Marín, Iñaki Ortego y José Manuel Echaniz, que como personas comprometidas con la sociedad desde sus respectivas responsabilidades en instituciones docentes y servicios públicos, amablemente me dieron su opinión sobre un texto más amplio del que este artículo es una parte.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://elpais.com/opinion/2020-09-04/coronavirus-ciencia-y-universidades.html> visitada el 22/03/2021.
- [2] <http://www.shanghairanking.com/> visitada el 22/03/2021.
- [3] <https://www.crue.org/> visitada el 22/03/2021.
- [4] <http://www.shanghairanking.com/shanghairanking-subject-rankings/veterinary-sciences.html> visitada el 22/03/2021.
- [5] <http://www.shanghairanking.com/shanghairanking-subject-rankings/clinical-medicine.html> visitada el 22/03/2021.
- [6] J. M. Sanz Serna, Medio siglo de reformas en la Universidad ¿Hemos acabado?, en *Propuestas para la reforma de la Universidad española*, Peña D., ed. Fundación Alternativas, 2010.
- [7] Peña D., Conclusiones, en *Propuestas para la Reforma de la Universidad Española*. Peña D., ed. Fundación Alternativas, Madrid, 2010, 121-138.
- [8] <https://blogs.deia.eus/untalpez> recogidos en su conjunto en <https://naukas.com/2015/04/05/los-7-pecados-capitales-de-la-universidad-espanola/> visitada el 22/03/2021.
- [9] https://elpais.com/politica/2014/11/28/actualidad/1417196515_775495.html visitada el 22/03/2021.
- [10] http://www.educacion.gob.es/boloniaensecundaria/img/Declaracion_Bolonia.pdf visitada el 22/03/2021.
- [11] https://www.abc.es/sociedad/abci-alumnos-universidades-privadas-crecieron-483-por-ciento-ultimos-siete-anos-201906150107_noticia.html visitada el 22/03/2021.

Redes Metal-Orgánicas

Tipos, síntesis, modificaciones y materiales compuestos

Pablo Salcedo-Abraira y Patricia Horcajada

Resumen: Los polímeros de coordinación o Redes Metal-Orgánicas (MOFs por sus siglas en inglés Metal-Organic Frameworks) son un tipo de sólido poroso cristalino formado por ligandos polidentados y centros inorgánicos con numerosas aplicaciones potenciales (p. ej., separación, catálisis o biomedicina, entre otras). Esta revisión describe la gran versatilidad química y estructural de estos materiales multifuncionales, citando ejemplos tipo. Además, se detallan los métodos sintéticos generalmente utilizados, así como distintas estrategias para la mejora de sus propiedades mediante su modificación composicional (p. ej., funcionalización, materiales compuestos).

Palabras clave: Redes Metal-Orgánicas, métodos sintéticos, material compuesto.

Abstract: Metal-Organic Frameworks (MOFs) are a type of crystalline porous solid, built up from polydentate linkers and inorganic centers, with important potential applications (e.g., separation, catalysis or biomedicine, among others). This review describes the huge chemical and structural versatility of these multifunctional materials, referring to type-examples. In addition, the generally used synthetic methods are described, together with the different strategies applied to enhance their properties via their compositional modification (e.g., functionalization, composite materials).

Keywords: Metal-Organic Frameworks, synthetic methods, MOF composites.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo de nuevos materiales multifuncionales ha ido ganando gran importancia debido a la relevancia socioeconómica de sus aplicaciones. De entre la gran variedad de materiales propuestos, los polímeros de coordinación o redes metal-orgánicas (también conocidos como MOFs debido a sus siglas en inglés Metal-Organic Frameworks) han surgido como uno de los más prometedores. Aunque puede considerarse que este tipo de materiales ya fueron descritos hace más de 100 años (p. ej., Azul de Prusia), su investigación no se tornó exhaustiva hasta

hace unos 30 años.^[1] Estos materiales híbridos están formados por nodos inorgánicos (iones, clústeres, cadenas, etc.) unidos a ligandos orgánicos polidentados, creando estructuras cristalinas que presentan una elevada porosidad bien definida (volumen de poro hasta 5 cm³·g⁻¹; área superficial Brunauer-Emmett-Teller (BET) hasta 7800 m²·g⁻¹, diámetro de poro (D_p) = 3-98 Å).^[2-5] Gracias a su riqueza estructural y versatilidad química, se ha propuesto a los MOFs en una gran variedad de aplicaciones (separación y almacenamiento de fluidos, catálisis heterogénea, detección, biomedicina, energía y medioambiente, entre otras).^[6-10]



P. Salcedo-Abraira



P. Horcajada

Unidad de Materiales Porosos Avanzados (UMPA)
IMDEA Energía
Avda. Ramón de la Sagra n.º 3
28935 Móstoles, España

C-e: patricia.horcajada@imdea.org

Recibido: 18/11/2020. Aceptado: 09/03/2021.

TIPOS DE ESTRUCTURAS EN MOFs

La variedad topológica de los MOFs se debe a las múltiples combinaciones posibles entre los nodos metálicos y los distintos tipos de ligandos. Existen distintas formas de definir la dimensionalidad de estos materiales. Por ejemplo, Férey los definió en función exclusivamente de la dimensionalidad de las subunidades inorgánicas.^[11] Sin embargo, la clasificación más utilizada actualmente se basa en la dimensionalidad de la red híbrida resultante de la coordinación entre el catión y el ligando, creando así estructuras monodimensionales (1D, cadenas), bidimensionales (2D, láminas) y tridimensionales (3D, redes), como puede observarse en la Figura 1. Estas

estructuras, a su vez, pueden establecer interacciones débiles entre las cadenas 1D o planos 2D, generando motivos 3D.

Existen ciertos elementos que pueden favorecer un tipo de estructura sobre otro. Podemos mencionar por ejemplo que el uso de metales de transición con configuración electrónica d^8 y ligandos planos con grupos funcionales sin giro libre (como los catecoles o las diaminas) tienden a formar materiales 2D.^[12] Sin embargo, sin duda, uno de los factores más determinantes es el control de las condiciones de síntesis (precursores metálicos, temperatura, tiempo, disolvente, aditivos como ácidos, bases o moduladores, etc.).

Un claro ejemplo del efecto de la temperatura son las fases basadas en Zr(IV) y el ligando tereftalato (UiO-66 y MIL-140A), siendo la fase cinética UiO-66 (cúbica $Fm\bar{3}m$; $S_{BET} = 1140 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; $D_p = 4 \text{ \AA}$) aquella obtenida a menor temperatura ($150 \text{ }^\circ\text{C}$) y la fase termodinámica MIL-140A (monoclónica $C2/c$; $S_{BET} = 420 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; $D_p = 3.2 \text{ \AA}$) a temperatura superior ($220 \text{ }^\circ\text{C}$).^[13]

El efecto del disolvente queda también bien representado en un trabajo reciente de Arenas-Vivo *et al.*, Se pueden obtener tres diferentes estructuras de aminotereftalatos de hierro(III) (p. ej., MIL-53-NH₂, MIL-88B-NH₂ y MIL-101-NH₂) en función de la naturaleza del disolvente (agua, etanol o DMF, respectivamente).^[14] En ambos trabajos, la diferente naturaleza y conectividad de las subunidades inorgánicas es distinta (p. ej., trímeros *vs.* cadenas de hierro(III), o hexaclústeres *vs.* cadenas dobles de Zr(IV)), lo que da lugar a estructuras 3D con diferente porosidad (canales 1D en el caso del MIL-140 y del MIL-53-NH₂, o porosidad 3D interconectada en las estructuras UiO-66, MIL-88B-NH₂ y del MIL-101-NH₂).

Por otro lado, la presencia de aditivos en la reacción también favorece la cristalización de diferentes fases. La dimensionalidad de los materiales MIL-167 (3D), MIL-168 (1D) y MIL-169 (2D), basados en el ligando 2,5-dihidroxitereftalato y Ti(IV), depende en gran medida de la adición de metanol (MIL-167) o de un catecol (MIL-168) a la síntesis. El material 2D MIL-169 se forma utilizando además un clúster preformado como precursor metálico.^[15]

Otro de los factores determinantes en el tipo de estructura obtenida es el pH del medio de reacción, sobre todo en el caso de metales con un diagrama de Pourbaix complejo, como pueden ser el aluminio o el vanadio. Podemos citar los trimesatos de Al(III) MIL-96, MIL-100 y MIL-110, donde en función del pH se obtiene una u otra fase de manera no reversible. A un $\text{pH} \approx 0$, se favorece la formación del sólido MIL-110,^[16] mientras que el MIL-100 se obtiene a $\text{pH} = 0.57$ ^[17] y el MIL-96 a $\text{pH} = 1$.^[18]

NATURALEZA DE LOS LIGANDOS

Los distintos tipos de ligandos polidentados utilizados en la síntesis de MOFs se pueden clasificar en función del

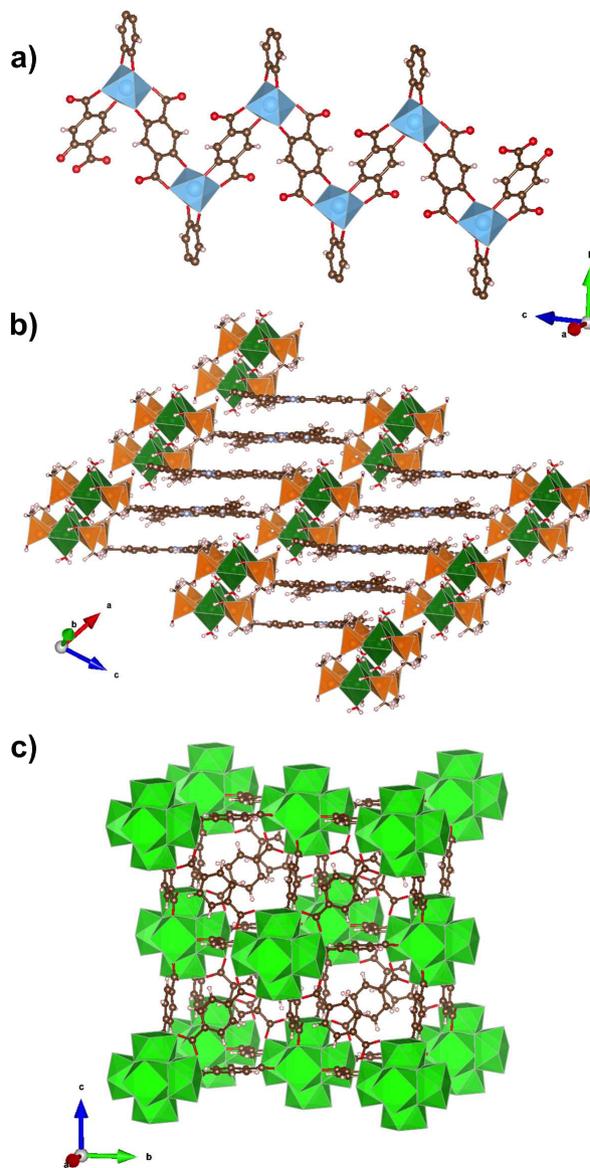


Figura 1. Estructura 1D del MIL-168 (a), 2D del IEF-13 (b) y 3D del UiO-66 (c)

átomo dador. Los más comunes son los ligandos O-dadores y los N-dadores, mientras que existen menos MOFs basados en ligandos S-dadores. En particular, 1 de cada 5 MOFs corresponde a ligandos carboxilatos (según Web of Science, octubre de 2020), y esto es debido principalmente a que su reactividad química es ampliamente conocida. Asimismo, de entre los ligandos N-dadores (1 de cada 12, de acuerdo con la base de datos WoS), destacan los imidazolatos, que han dado origen a un tipo de MOFs muy relevantes conocidos como ZIFs (de las siglas en inglés Zeolitic Imidazolate Frameworks).^[19] Por otro lado, existe un menor número de MOFs basados en los ligandos O-dadores de tipo fosfonato (ratio 1:12 comparado con los ligandos carboxilato, según WoS) debido a su sín-

tesis y elucidación estructural más compleja. Sin embargo, debido a una mayor fuerza de enlace, éstos presentan claras ventajas frente a los MOFs basados en carboxilatos y ligandos N-dadores (mayor estabilidad térmica, química y mecánica).^[20,21] Finalmente, aunque históricamente menos utilizados en la síntesis de MOFs, los ligandos de tipo catecol o tiol están actualmente cobrando gran interés debido a sus propiedades optoelectrónicas.^[22-24]

CATIONES

En lo relativo a los cationes utilizados en la síntesis de MOFs, se puede decir que hay ejemplos de estructuras con especies pertenecientes a todos los grupos de metales (alcalinos, alcalinotérreos, metales de transición, semimetales y tierras raras).^[21,25-31] Por norma general, la naturaleza del catión determinará i) el grado y dimensionalidad de coordinación de los ligandos (p. ej., metales más grandes y con más orbitales disponibles tienden a tener un mayor número de coordinación) y ii) la estabilidad tanto química como térmica de los materiales resultantes (p. ej., en general, iones metálicos con menor carga formal tienden a dar estructuras menos estables que iones con mayor carga). Aunque es frecuente que se utilice un solo metal a la hora de sintetizar el material, en los últimos años han aparecido ejemplos crecientes de MOFs basados en distintos metales.^[32,33] Esta combinación permite obtener efectos sinérgicos de ambos metales, como puede ser la estabilidad de un metal con alta carga formal y las propiedades catalíticas de otro metal con menor carga, tal y como describen Castells-Gil *et al.*, mediante el trimesato de Mn(II) y Ti(IV) denominado MUV-10.^[34] Este ejemplo demuestra que las propiedades catalíticas provienen del Mn(II), ya que éstas desaparecen al sustituirlo completamente por Ca(II).

MODIFICACIONES

Además de su versatilidad estructural, una de las grandes ventajas de los MOFs es su amplia riqueza composicional, utilizando *a priori* cualquier catión de la tabla periódica, numerosos ligandos y la combinación de ellos. Por otro lado, existe también la posibilidad de realizar modificaciones en las estructuras ya conocidas, ya sea durante el proceso de síntesis del MOF (*in situ*) o sobre el MOF preformado (post-sintéticas) como puede observarse esquemáticamente en la Figura 2.

Modificaciones *in situ*

La sustitución de los centros metálicos puede lograrse reemplazando el precursor inorgánico por otro de propiedades similares (carga formal, tamaño) y adaptando las condiciones sintéticas. Como ejemplo, la estructura

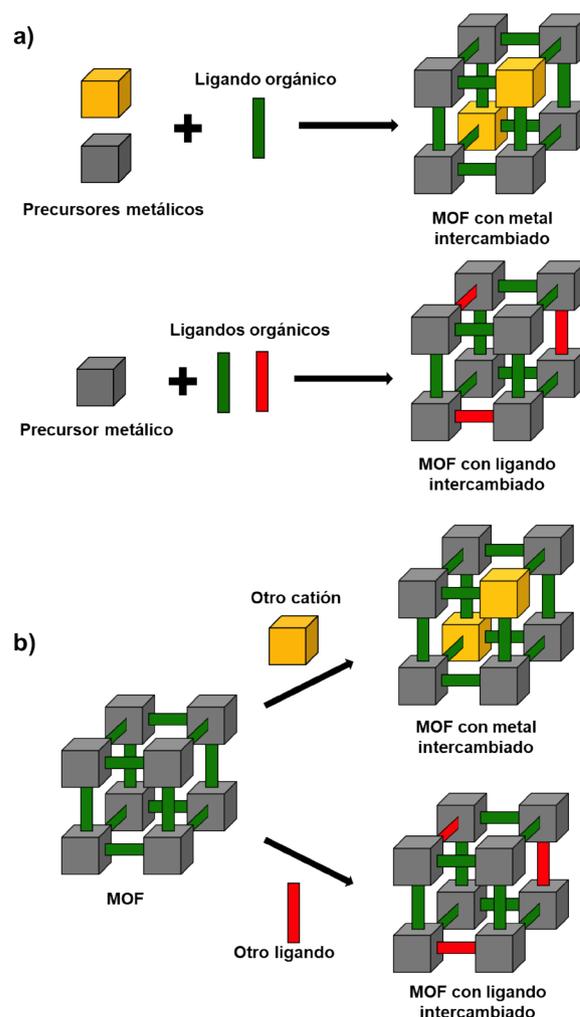


Figura 2. Tipos de modificaciones *in situ* (a) y post-sintéticas (b)

MIL-100 esta descrita con distintos cationes con estado de oxidación III (p. ej., Fe, Al, Cr, V, Sc, Ti).^[35-37] El hecho de tener uno u otro metal va a afectar en las propiedades finales del material, como puede observarse en el trabajo realizado por Palomino *et al.*, donde se evalúa y compara las propiedades catalíticas de dos series de MOFs (MOF-74 y MIL-100) con distintos metales.^[36] No sólo se puede pensar en sustituir totalmente el catión, sino también parcialmente, introduciendo diferentes proporciones de metales, dando lugar a los conocidos como MOF metálicos mixtos. Nouar *et al.*, fueron capaces de sustituir un 5% del Zr del material UiO-66 por Ce (en una relación 1:4 de Ce(III) y Ce(IV)), generando defectos de ligando en la red y mejorando la adsorción disociativa de metanol.^[38] Otro ejemplo de dopaje es el reportado por Pendashteh *et al.*, para el imidazolato de Co(II) ZIF-9. En este caso, el dopaje se realizó exitosamente con Fe(II), logrando reemplazar hasta $\frac{1}{4}$ del Co^{2+} . Tras la pirólisis de estos materiales, obtuvieron carbones nanoestructurados dopados con

interesantes resultados en baterías de Zn-aire.^[39] Otro trabajo remarkable que aplica esta metodología es el desarrollado por Syzgantseva *et al.*, en el que se sustituye el Ti o el Zr en los aminotereftalatos MIL-125-NH₂ o UiO-66-NH₂, respectivamente.^[40] Hasta un 25% de Ti(IV) del MIL-125-NH₂ se reemplazó por V(IV); y un 50% del Zr(IV) del UiO-66-NH₂ por Nb(IV). El efecto de estas sustituciones sobre los diagramas de bandas de los materiales (y por ende, en su band gap) se predijo mediante cálculos teóricos (utilizando el método de la teoría funcional de densidad o DFT por sus siglas en inglés), los cuales se validaron más tarde experimentalmente

Otro tipo de modificación *in situ* consiste en sustituir la parte orgánica. Así, es frecuente que, manteniendo la estructura del ligando y sustituyendo uno o varios protones por diversos grupos funcionales (p. ej., -NH₂, -OH, -SO₃H, -CF₃, etc.), se puedan modificar las propiedades fisicoquímicas del MOF resultante (texturales, band gap o estabilidad química, entre otras) y/o introducir nuevos puntos reactivos. Uno de los ligandos con los que más se ha trabajado utilizando este método es el ácido tereftálico, el cual ha sido sustituido tanto de manera parcial como total por sus versiones funcionalizadas.^[41-48] Además, con el avance de los años y el descubrimiento de nuevas estructuras, se ha logrado establecer una relación entre la geometría y rigidez del ligando y la estructura final.^[49,50] De esta forma, la búsqueda de nuevas fases isoestructurales resulta más sencilla, de manera que en principio, con simplemente aumentar el tamaño o longitud de un ligando pueden obtenerse fases isoreticulares con mayor tamaño de celda, y por tanto, mayor porosidad.^[44,51]

Modificaciones post-sintéticas

Al igual que en el caso anterior, las modificaciones post-sintéticas se pueden realizar tanto sobre la parte inorgánica como la orgánica. Se pueden sustituir parcialmente los metales, poniendo en contacto soluciones de cationes con tamaño y características similares que, debido a la labilidad de la unión metal-ligando, reemplazarán el metal inicial. Esta estrategia es muy útil ya que la síntesis directa sustituyendo el metal puede resultar complicada debido a la diferente reactividad o aparición de nuevas fases. Este es el caso de la sustitución de Zn(II) por Co(II) en el IRMOF-9, solo posible mediante modificación postsintética.^[52] Sin embargo, esta estrategia está asociada generalmente a una mayor heterogeneidad en la distribución de los metales en la estructura.

En el caso de los ligandos, las modificaciones *a posteriori* suelen ser más variadas ya que se pueden sustituir los ligandos por otros o se pueden llevar a cabo reacciones de funcionalización sobre ellos en el caso de que posean grupos reactivos. Al igual que en el caso anterior, los materiales más estudiados y modificados son aquellos que basados en el ligando tereftalato y sus variantes

funcionalizadas.^[47,53-59] Un ejemplo un tanto particular es el descrito por Kim *et al.*, en el que la sustitución se lleva a cabo entre los ligandos de dos MOFs.^[59] En concreto, el ligando amino-tereftalato del UiO-66-NH₂ y el bromo tereftalato del UiO-66-Br se intercambian al poner en contacto en solución ambos materiales, dando lugar al UiO-66 mixto con ambos grupos funcionales. Sin embargo, de nuevo, la distribución del ligando en la estructura final podría no ser tan homogénea como utilizando el método *in situ*. Otro ejemplo de modificación post-sintética es el caso de un bifenilocarboxilato de Hf(IV) que, sin activación tras su síntesis, libera ligando en condiciones ambientales dando lugar a una nueva estructura. Es interesante mencionar que, tanto esta nueva estructura como la original se pueden someter a molienda o ultrasonidos para dar lugar a una tercera estructura.^[60]

MÉTODOS DE SÍNTESIS

Los MOFs se pueden sintetizar utilizando una gran variedad de métodos de química suave.^[61] En este sentido, podemos citar la formación del dihidroxitereftalato de Cu MOF-74^[62] o el imidazolato de Zn ZIF-8 a temperatura ambiente.^[63] Sin embargo, por norma general la formación de los MOFs es un proceso endotérmico que requiere energía (aportada en forma de calor, microondas, mecánica o ultrasonidos, entre otras). Uno de los métodos sintéticos más comunes es la síntesis en fase líquida con temperatura (bajo o sobre el punto de ebullición del disolvente) en presencia o no de agitación. La síntesis estática, en ausencia de agitación, suele conllevar una heterogeneidad mayor tanto en cristalinidad como en tamaño de partícula, favoreciendo la obtención de cristales de mayor tamaño. Este método suele ser el más utilizado cuando se requiere preparar una gran cantidad de material, ya que el escalado suele ser más sencillo, económico y seguro. Este método también permite controlar fácilmente el tamaño de partícula. Vilela *et al.*, describieron la síntesis de nanopartículas del MIL-125-NH₂ utilizando este una mezcla de dimetilformamida, metanol y agua a reflujo.^[64] Otro método ampliamente utilizado es el hidro/solvotermal, trabajando a presiones elevadas utilizando sistemas de reacción cerrados a temperaturas superiores al punto de ebullición.^[65] Aunque existen reactores que permiten su agitación durante la reacción, es común trabajar en modo estático. Además de resultar frecuentemente en tamaños de partícula mayores y/o con dominios cristalinos más grandes, permite alcanzar condiciones de temperatura y presión más elevadas (ya que se puede trabajar por encima del punto de ebullición de los disolventes). Estas condiciones más agresivas son necesarias en ciertas ocasiones para poder obtener algunas fases. Este es el caso de fases basadas en cromo, las cuales necesitan de temperaturas mayores que sus análogos isoestructurales

basados en distintos metales. Las familias MIL-53, MIL-100 o MIL-101, donde las temperaturas para obtener las estructuras con Cr^{3+} (200-220°C)^[66,67] son mayores que las necesarias para su obtención con Fe (180, 150 y 100 °C, respectivamente).^[44,65,68] Una variante de este método, desarrollada por el grupo del Prof. Stock es la síntesis solvotermal combinatoria, basado en la miniaturización y paralelización del sistema solvotermal tradicional. La síntesis combinatoria surge con el fin de acelerar el descubrimiento de nuevas fases de MOFs y de optimizar las condiciones de síntesis (minimizando tiempo y recursos: ligando, metal, disolventes, etc.), pudiendo describir diagramas de fases precisos entre fases topológicas.^[69]

Además, se puede sustituir el calor por convección (generalmente en una estufa) por una fuente microondas o ultrasonidos, mucho más homogéneas y donde los tiempos de reacción son excepcionalmente cortos (pasando típicamente de días/horas a minutos).^[70] En particular, la síntesis hidro/solvotermal asistida por microondas permite un control preciso de la cristalización. Por un lado, la rápida velocidad de calentamiento con presencia de puntos altamente energéticos distribuidos de manera muy homogénea, permiten acceder a nuevas fases y a un control preciso del tamaño y distribución de partícula. García Marquez *et al.*, sintetizaron los trimesatos metálicos(III) mesoporosos MIL-100 (cación = Fe(III), Al(III) y Cr(III)), obteniendo rendimientos elevados con tamaños nanométricos monodispersos en tan solo unos minutos.^[35] El utilizar ultrasonidos permite, además, reducir la temperatura de síntesis.^[70] Como ejemplo, Alavi y Morsali prepararon por primera vez el MOF $[\text{Cu}_2(\text{BDC})_2(\text{dabco})] \cdot 2\text{DMF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sonicando durante 90 minutos para su utilización como precursor de un óxido de cobre nanoparticulado.^[71] Otra manera de infundir la energía necesaria para que la reacción se lleve a cabo es mediante transferencia de energía mecánica. Algunos ejemplos de mecanosíntesis de MOFs son los carboxilatos de Zr(IV) UiO-66 y NU-901,^[72] distintos imidazolatos de Zn(II) o Co(II) y el trimesato de Cu(II) HKUST-1.^[73] Incluso, se puede realizar la síntesis de MOFs aplicando una diferencia de potencial en las condiciones adecuadas.^[74] Este método es útil no sólo para crecer los materiales depositados sobre los electrodos, sino también para la síntesis de MOFs a gran escala (BASF emplea este método para la preparación de ciertos MOFs comercializados).^[75] Por último, otro método de síntesis de MOFs es el de difusión en fase gas donde, a diferencia de los métodos descritos anteriormente, no es necesaria la presencia de ningún disolvente. Los precursores se calientan generalmente en tubo cerrado a vacío, de manera que pasan a la fase gas, donde reaccionan entre ellos y se depositan dentro del mismo tubo. Utilizando este método de síntesis, López-Cabrelles *et al.*, fueron capaces de sintetizar, entre otros, el imidazolato de Fe(II), is estructural al ZIF-8, denominado MUV-3.^[76] Este material

no ha podido ser sintetizado hasta la fecha mediante ningún otro método.

MATERIALES COMPUESTOS

Debido a la gran porosidad que presentan estos materiales y a la variedad de interacciones que pueden formarse a través de sus distintos grupos funcionales, los MOFs resultan idóneos para asociarlos con otras especies y dar lugar así a materiales compuestos con propiedades mejoradas. Sin embargo, en numerosas ocasiones el disolvente del medio de reacción queda atrapado en los poros, requiriendo de su eliminación previamente a la asociación de otras especies. Su eliminación puede ser tan simple como un tratamiento térmico (a presión atmosférica o a vacío),^[77] o necesitar de un intercambio previo con otros disolventes para evitar el colapso de la red.^[78] La naturaleza híbrida de estos materiales favorece su asociación tanto con especies orgánicas como inorgánicas. Por norma general, las especies orgánicas suelen presentar más interacciones que las inorgánicas. Esto es debido a que las especies orgánicas presentan una mayor cantidad y variedad de grupos funcionales capaces de interactuar tanto con la parte inorgánica como con la orgánica de los MOFs; mientras que las inorgánicas, con menor variedad, suelen interactuar principalmente con algunos de los grupos funcionales presentes en la estructura de los MOFs.

En relación con la asociación de especies inorgánicas, se han desarrollado composites de MOFs con óxidos metálicos, clústeres o nanopartículas metálicas o compuestos de coordinación.^[79] Los polioxometalatos (POMs) son un tipo de clústeres aniónicos formados por metales y oxígeno, los cuales se han asociado a distintos MOFs. Estos materiales compuestos se han propuesto ampliamente en distintas reacciones catalíticas (p. ej., oxidación, condensación, esterificación).^[80] Arenas-Vivo *et al.*, asociaron nanopartículas de Ag metálica al material MIL-125-NH₂ exclusivamente mediante los grupos amino del ligando, con además un efecto antiadherente y antimicrobiano útil en la lucha contra la formación de biofilms.^[81] Otro ejemplo de asociación de nanopartículas metálicas (en esta caso nanoestrellas de Au) con un MOF (ZIF-8) es el reportado por el grupo del Dr. del Pino en el que el material compuesto se asocia también a moléculas activas que son liberadas posteriormente en el interior celular mediante un estímulo termoplasmónico.^[82] Sene *et al.*, asociaron nanopartículas de óxido de hierro (maghemita, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) con el MIL-100(Fe) para su uso en terapia guiada por imagen.^[83] También en el área de la biomedicina, donde los MOFs han sido ampliamente explorados como vectores de fármacos,^[9] se podría considerar como un composite la inserción de fármacos en su porosidad. Citemos aquí por ejemplo, la adsorción del fármaco antituberculosis, isoniazida, en el nanomaterial MIL-100(Fe) para su liberación por

vía pulmonar.^[84] En el campo de la energía también se aplica esta estrategia para mejorar las propiedades de distintos materiales. Como ejemplo, se insertó el aminoácido lisina en la porosidad del fosfonato de Zr(IV) UPG-1, permitiendo mejorar la ciclabilidad como conductor protónico del material compuesto con respecto al inicial, permitiendo su posterior utilización en pilas de combustible.^[85] En este sentido, también se pueden incorporar especies macromoleculares (p. ej., polímeros, proteínas, ácidos ribonucleicos). Por ejemplo, se ha realizado la inserción del monómero 3,4-ethylenedioxythiophene (EDOT) en la porosidad del material MIL-100(Fe) y su posterior polimerización (PEDOT). La polimerización *in situ* dentro de la porosidad del MOF conduce a la nanoestructuración del polímero, mejorando tanto su conductividad electrónica como sus propiedades electrocrómicas tanto respecto al MOF como al polímero sin nanoestructurar.^[86] Igualmente, es posible encapsular enzimas dentro de la porosidad de ciertos MOFs con tamaño de poro adecuado, como pueden ser los carboxilatos de Al(III) y Tb(III) (PCN-333 y Tb-mesoMOF, respectivamente), donde se encapsularon las enzimas *microperoxidasa-11*, *citocromo c* o *peroxidasa de rábano*, observándose una mejora en la catálisis enzimática en comparación con la enzima libre (ya sea una mejor estabilidad, eficiencia o conversión).^[87] Finalmente, Hidalgo *et al.*, asociaron ácido ribonucleótidos (ARN) en el interior de la porosidad de los nanomateriales MIL-100(Fe) y MIL-101(Fe)-NH₂ para su utilización como vectores medicamentosos.^[88]

CONCLUSIONES

Como queda reflejado en esta revisión, los MOFs son una nueva clase de materiales híbridos porosos multifuncionales que ofrecen una amplia versatilidad. Las combinaciones entre cationes y ligandos para dar lugar a MOFs son prácticamente infinitas, lo cual abre las puertas de propiedades variadas (ópticas, magnéticas, biológicas, etc.) con impacto en numerosas áreas. Asimismo, la gran variedad de métodos sintéticos deberían asegurar un escalado eficiente de cara a su producción. Por otro lado, su funcionalización o asociación con otras especies, hace posible que los MOFs presenten propiedades aún más diversas, con fuerte impacto en una gran variedad de campos de gran relevancia social e industrial (almacenamiento y separación de fluidos, catálisis, almacenamiento y/o generación de energía o biomedicina, entre otras). Sin embargo, de la gran variedad de MOFs reportados, tan sólo unos pocos se producen y comercializan en la actualidad. De hecho, aún queda un largo camino por recorrer para que sean utilizados comercialmente. Es frecuente que su inestabilidad en ciertas condiciones de trabajo limite su aplicación real. En este sentido, la comunidad científica trabaja arduamente en la síntesis de materiales más robustos tanto química, térmica y/o mecánicamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos H+MOF de la fundación Ramón Areces, Retos Investigación MOF-SEIDON (PID2019-104228RB-I00, MICIU-AEI/FEDER, UE), BATPORO-2020 de la Fundación Iberdrola, M-ERA.NET C-MOF.cell, H2020-MSCA-ITN-2019 HeatN-Mof (ref. 860942). Patricia Horcajada agradece al programa Ramón y Cajal (2014-15039).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. F. Hoskins y R. Robson, *J. Am. Chem. Soc.*, **1989**, *111*, 5962-5964.
- [2] G. Férey, *Science*, **2005**, *309*, 2040-2042.
- [3] H. Furukawa, N. Ko, Y. B. Go, N. Aratani, S. B. Choi, E. Choi, A. O. Yazaydin, R. Q. Snurr, M. O'Keeffe, J. Kim y O. M. Yaghi, *Science*, **2010**, *329*, 424-428.
- [4] O. K. Farha, I. Eryazici, N. C. Jeong, B. G. Hauser, C. E. Wilmer, A. A. Sarjeant, R. Q. Snurr, S. T. Nguyen, A. Ö. Yazaydin y J. T. Hupp, *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*, 15016-15021.
- [5] I. M. Hönicke, I. Senkowska, V. Bon, I. A. Baburin, N. Bönisch, S. Raschke, J. D. Evans y S. Kaskel, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, 13780-13783.
- [6] *Chem. Soc. Rev.*, **2009**, 1201; *Chem. Rev.*, **2012**, 112; *Chem. Soc. Rev.*, **2014**, 5415.
- [7] M. P. Suh, H. J. Park, T. K. Prasad y D.-W. Lim, *Chem. Rev.*, **2011**, *112*, 782-835.
- [8] M. R. Ryder y J.-C. Tan, *Mater. Sci. Technol.*, **2014**, *30*, 1598-1612.
- [9] S. Rojas, A. Arenas-Vivo y P. Horcajada, *Coord. Chem. Rev.*, **2019**, *388*, 202-226.
- [10] S. Rojas y P. Horcajada, *Chem. Rev.*, **2020**.
- [11] G. Férey, *Chem. Soc. Rev.*, **2008**, *37*, 191-214.
- [12] H. Jia, Y. Yao, J. Zhao, Y. Gao, Z. Luo y P. Du, *J. Mater. Chem. A*, **2018**, *6*, 1188-1195.
- [13] V. Guillermin, F. Ragon, M. Dan-Hardi, T. Devic, M. Vishnuvarthan, B. Campo, A. Vimont, G. Clet, Q. Yang, G. Maurin, G. Férey, A. Vittadini, S. Gross y C. Serre, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2012**, *51*, 9401-9405.
- [14] A. Arenas-Vivo, D. Avila y P. Horcajada, *Materials*, **2020**, *13*, 1469.
- [15] H. Assi, L. C. Pardo Pérez, G. Mouchaham, F. Ragon, M. Nasalevich, N. Guillou, C. Martineau, H. Chevreau, F. Kapteijn, J. Gascon, P. Fertey, E. Elkaim, C. Serre y T. Devic, *Inorg. Chem.*, **2016**, *55*, 7192-7199.
- [16] C. Volkringer, D. Popov, T. Loiseau, N. Guillou, G. Férey, M. Haouas, F. Taulelle, C. Mellot-Draznieks, M. Burghammer y C. Riekel, *Nat. Mater.*, **2007**, *6*, 760-764.
- [17] C. Volkringer, D. Popov, T. Loiseau, G. Férey, M. Burghammer, C. Riekel, M. Haouas y F. Taulelle, *Chem. Mater.*, **2009**, *21*, 5695-5697.
- [18] T. Loiseau, L. Lecroq, C. Volkringer, J. Marrot, G. Férey, M. Haouas, F. Taulelle, S. Bourrelly, P. L. Llewellyn y M. Latroche, *J. Am. Chem. Soc.*, **2006**, *128*, 10223-10230.
- [19] B. Chen, Z. Yang, Y. Zhu y Y. Xia, *J. Mater. Chem. A*, **2014**, *2*, 16811-16831.

- [20] K. J. Gagnon, H. P. Perry y A. Clearfield, *Chem. Rev.*, **2012**, *112*, 1034-1054.
- [21] P. Salcedo-Abraira, S. M. F. Vilela, A. A. Babaryk, M. Cabrero-Antonino, P. Gregorio, F. Salles, S. Navalón, H. García y P. Horcajada, *Nano Res.*, **2021**, *14*, 450-457.
- [22] A. Mähringer, A. C. Jakowetz, J. M. Rotter, B. J. Bohn, J. K. Stolarczyk, J. Feldmann, T. Bein y D. D. Medina, *ACS Nano*, **2019**, *13*, 6711-6719.
- [23] J. Liu, Y. Zhou, Z. Xie, Y. Li, Y. Liu, J. Sun, Y. Ma, O. Terasaki y L. Chen, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, *59*, 1081-1086.
- [24] S. K. Bhardwaj, N. Bhardwaj, R. Kaur, J. Mehta, A. L. Sharma, K.-H. Kim y A. Deep, *J. Mater. Chem. A*, **2018**, *6*, 14992-15009.
- [25] S. Quaresma, V. André, A. M. M. Antunes, S. M. F. Vilela, G. Amarici, A. Arenas-Vivo, R. Rosal, P. Horcajada y M. T. Duarte, *Cryst. Growth Des.*, **2020**, *20*, 370-382.
- [26] S. M. F. Vilela, A. A. Babaryk, R. Jaballi, F. Salles, M. E. G. Mosquera, Z. Elaoud, S. Van Cleuvenbergen, T. Verbiest y P. Horcajada, *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2018**, *2018*, 2437-2443.
- [27] S. M. F. Vilela, T. Devic, A. Várez, F. Salles y P. Horcajada, *Dalt. Trans.*, **2019**, *48*, 11181-11185.
- [28] A. A. Babaryk, O. R. Contreras Almengor, M. Cabrero-Antonino, S. Navalón, H. García y P. Horcajada, *Inorg. Chem.*, **2020**, *59*, 3406-3416.
- [29] T. Devic y C. Serre, *Chem. Soc. Rev.*, **2014**, *43*, 6097-6115.
- [30] S. Yuan, J. S. Qin, C. T. Lollar y H. C. Zhou, *ACS Cent. Sci.*, **2018**, *4*, 440-450.
- [31] S. Fordham, X. Wang, M. Bosch y H. C. Zhou, *Struct. Bond.*, **2015**, *163*, 1-28.
- [32] C. Castillo-Blas, N. López-Salas, M. C. Gutiérrez, I. Puente-Orench, E. Gutiérrez-Puebla, M. L. Ferrer, M. Á. Monge y F. Gándara, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, 1766-1774.
- [33] A. M. Rice, G. A. Leith, O. A. Ejegbawwo, E. A. Dolgoplova y N. B. Shustova, *ACS Energy Lett.*, **2019**, *4*, 1938-1946.
- [34] J. Castells-Gil, N. M. Padial, N. Almora-Barrios, J. Albero, A. R. Ruiz-Salvador, J. González-Platas, H. García y C. Martí-Gastaldo, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2018**, *57*, 8453-8457.
- [35] A. García Márquez, A. Demessence, A. E. Platero-Prats, D. Heurtaux, P. Horcajada, C. Serre, J. S. Chang, G. Férey, V. A. De La Peña-O'Shea, C. Boissière, D. Grosso y C. Sanchez, *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2012**, *100*, 5165-5174.
- [36] C. Palomino Cabello, G. Gómez-Pozuelo, M. Opanasenko, P. Nachtigall y J. Čejka, *ChemPlusChem*, **2016**, *81*, 828-835.
- [37] J. Castells-Gil, N. M. Padial, N. Almora-Barrios, I. Da Silva, D. Mateo, J. Albero, H. García y C. Martí-Gastaldo, *Chem. Sci.*, **2019**, *10*, 4313-4321.
- [38] F. Nouar, M. I. Breeze, B. C. Campo, A. Vimont, G. Clet, M. Daturi, T. Devic, R. I. Walton y C. Serre, *Chem. Commun.*, **2015**, *51*, 14458-14461.
- [39] A. Pendashteh, S. M. F. Vilela, I. Krivtsov, D. Ávila-Brandé, J. Palma, P. Horcajada y R. Marcilla, *J. Power Sources*, **2019**, *427*, 299-308.
- [40] M. A. Syzgantseva, C. P. Ireland, F. M. Ebrahim, B. Smit y O. A. Syzgantseva, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, 6271-6278.
- [41] S. Marx, W. Kleist, J. Huang, M. Maciejewski y A. Baiker, *Dalt. Trans.*, **2010**, *39*, 3795-3798.
- [42] C. Zlotea, D. Phanon, M. Mazaj, D. Heurtaux, V. Guillerme, C. Serre, P. Horcajada, T. Devic, E. Magnier, F. Cuevas, G. Férey, P. L. Llewellyn y M. Latroche, *Dalt. Trans.*, **2011**, *40*, 4879.
- [43] A. M. Rasero-Almansa, A. Corma, M. Iglesias y F. Sánchez, *ChemCatChem*, **2014**, *6*, 3426-3433.
- [44] P. Horcajada, H. Chevreau, D. Heurtaux, F. Benyettou, F. Salles, T. Devic, A. Garcia-Marquez, C. Yu, H. Lavrard, C. L. Dutson, E. Magnier, G. Maurin, E. Elkaïm y C. Serre, *Chem. Commun.*, **2014**, *50*, 6872-6874.
- [45] J. F. Kurisingal, Y. Rachuri, Y. Gu, Y. Choe y D. W. Park, *Chem. Eng. J.*, **2020**, *386*, 121700.
- [46] M. Lin Foo, S. Horike, T. Fukushima, Y. Hijikata, Y. Kubota, M. Takata y S. Kitagawa, *Dalt. Trans.*, **2012**, *41*, 13791-13794.
- [47] M. Kim y S. M. Cohen, *CrystEngComm*, **2012**, *14*, 4096-4104.
- [48] C. H. Hendon, D. Tiana, M. Fontecave, C. Sanchez, L. D'Arras, C. Sassoie, L. Rozes, C. Mellot-Draznieks y A. Walsh, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, *135*, 10942-10945.
- [49] S. Bureekaew, V. Balwani, S. Amirjalayer y R. Schmid, *CrystEngComm*, **2015**, *17*, 344-352.
- [50] J. P. Darby, M. Arhangelskis, A. D. Katsenis, J. M. Marrett, T. Friščić y A. J. Morris, *Chem. Mater.*, **2020**, *32*, 5835-5844.
- [51] W. Lu, Z. Wei, Z. Y. Gu, T. F. Liu, J. Park, J. Park, J. Tian, M. Zhang, Q. Zhang, T. Gentle, M. Bosch y H. C. Zhou, *Chem. Soc. Rev.*, **2014**, *43*, 5561-5593.
- [52] S. Canossa, L. Fornasari, N. Demitri, M. Mattarozzi, D. Chokesillo-Lazarte, P. Pelagatti y A. Bacchi, *CrystEngComm*, **2019**, *21*, 827-834.
- [53] M. A. Nasalevich, M. G. Goesten, T. J. Savenije, F. Kapteijn y J. Gascon, *Chem. Commun.*, **2013**, *49*, 10575-10577.
- [54] H. J. Park, Y. E. Cheon y M. P. Suh, *Chem. - A Eur. J.*, **2010**, *16*, 11662-11669.
- [55] B. Liu, S. Jie, Z. Bu y B. G. Li, *RSC Adv.*, **2014**, *4*, 62343-62346.
- [56] Z. Yin, S. Wan, J. Yang, M. Kurmoo y M. H. Zeng, *Coord. Chem. Rev.*, **2019**, *378*, 500-512.
- [57] C. Yildiz, K. Kutonova, S. Obwald, A. Titze-Alonso, J. Bitzer, S. Bräse y W. Kleist, *ChemCatChem*, **2020**, *12*, 1134-1142.
- [58] H. Amer Hamzah, T. S. Crickmore, D. Rixson y A. D. Burrows, *Dalt. Trans.*, **2018**, *47*, 14491-14496.
- [59] M. Kim, J. F. Cahill, Y. Su, K. A. Prather y S. M. Cohen, *Chem. Sci.*, **2012**, *3*, 126-130.
- [60] M. J. Cliffe, E. Castillo-Martínez, Y. Wu, J. Lee, A. C. Forse, F. C. N. Firth, P. Z. Moghadam, D. Fairen-Jimenez, M. W. Gaultois, J. A. Hill, O. V. Magdysyuk, B. Slater, A. L. Goodwin y C. P. Grey, *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 5397-5404.
- [61] C. N. R. Rao y K. Biswas, in *Essentials of Inorganic Materials Synthesis*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, **2015**, 57-95.
- [62] J. G. Flores, E. Sánchez-González, A. Gutiérrez-Alejandre, J. Aguilar-Pliego, A. Martínez, T. Jurado-Vázquez, E. Lima, E. González-Zamora, M. Díaz-García, M. Sánchez-Sánchez y I. A. Ibarra, *Dalt. Trans.*, **2018**, *47*, 4639-4645.
- [63] M. Zhu, S. R. Venna, J. B. Jasinski y M. A. Carreon, *Chem. Mater.*, **2011**, *23*, 3590-3592.
- [64] S. Vilela, P. Salcedo-Abraira, I. Colinet, F. Salles, M. de Koning, M. Joosen, C. Serre y P. Horcajada, *Nanomaterials*, **2017**, *7*, 321.
- [65] P. Horcajada, S. Surblé, C. Serre, D.-Y. Hong, Y.-K. Seo, J.-S. Chang, J.-M. Grenèche, I. Margiolaki y G. Férey, *Chem. Commun.*, **2007**, *100*, 2820-2822.
- [66] C. Serre, F. Millange, C. Thouvenot, M. Noguès, G. Marsolier, D. Louër y G. Férey, *J. Am. Chem. Soc.*, **2002**, *124*, 13519-13526.
- [67] M.-L. Chen, S.-Y. Zhou, Z. Xu, L. Ding y Y.-H. Cheng, *Molecules*, **2019**, *24*, 3718.

- [68] T. R. Whitfield, X. Wang, L. Liu y A. J. Jacobson, *Solid State Sci.*, **2005**, *7*, 1096-1103.
- [69] N. Stock, *Microporous Mesoporous Mater.*, **2010**, *129*, 287-295.
- [70] N. A. Khan y S. H. Jhung, *Coord. Chem. Rev.*, **2015**, *285*, 11-23.
- [71] M. A. Alavi y A. Morsali, *Ultrason. Sonochem.*, **2014**, *21*, 674-680.
- [72] A. M. Fidelli, B. Karadeniz, A. J. Howarth, I. Huskić, L. S. Germann, I. Halasz, M. Etter, S. Y. Moon, R. E. Dinnebier, V. Stilinović, O. K. Farha, T. Friščić y K. Užarević, *Chem. Commun.*, **2018**, *54*, 6999-7002.
- [73] H. M. Titi, J. L. Do, A. J. Howarth, K. Nagapudi y T. Friščić, *Chem. Sci.*, **2020**, *11*, 7578-7584.
- [74] V. M. V. y G. Nageswaran, *J. Electrochem. Soc.*, **2020**, *167*, 155527.
- [75] H. Al-Kutubi, J. Gascon, E. J. R. Sudhölter y L. Rassaei, *ChemElectroChem*, **2015**, *2*, 462-474.
- [76] J. López-Cabrelles, J. Romero, G. Abellán, M. Giménez-Marqués, M. Palomino, S. Valencia, F. Rey y G. Mínguez Espallargas, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, *141*, 7173-7180.
- [77] M. Dan-Hardi, C. Serre, T. Frot, L. Rozes, G. Maurin, C. Sanchez y G. Férey, *J. Am. Chem. Soc.*, **2009**, *131*, 10857-10859.
- [78] B. Wang, A. P. Côté, H. Furukawa, M. O'Keeffe y O. M. Yaghi, *Nature*, **2008**, *453*, 207-211.
- [79] L. Chen, R. Luque y Y. Li, *Chem. Soc. Rev.*, **2017**, *46*, 4614-4630.
- [80] J. Sun, S. Abednatanzi, P. Van Der Voort, Y.-Y. Liu y K. Leus, *Catalysts*, **2020**, *10*, 578.
- [81] A. Arenas-Vivo, G. Amarici, S. Aguado, R. Rosal y P. Horcajada, *Acta Biomater.*, **2019**, *97*, 490-500.
- [82] C. Carrillo-Carrión, R. Martínez, M. F. Navarro Poupard, B. Pelaz, E. Polo, A. Arenas-Vivo, A. Olgati, P. Taboada, M. G. Soliman, Ú. Catalán, S. Fernández-Castillejo, R. Solà, W. J. Parak, P. Horcajada, R. A. Alvarez-Puebla y P. del Pino, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, *58*, 7078-7082.
- [83] S. Sene, M. T. Marcos-Almaraz, N. Menguy, J. Scola, J. Volatron, R. Rouland, J.-M. Grenèche, S. Miraux, C. Menet, N. Guillou, F. Gazeau, C. Serre, P. Horcajada y N. Steunou, *Chem*, **2017**, *3*, 303-322.
- [84] C. Fernández-Paz, S. Rojas, P. Salcedo-Abraira, T. Simón-Yarza, C. Remuñán-López y P. Horcajada, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2020**, *12*, 25676-25682.
- [85] S. M. F. Vilela, P. Salcedo-Abraira, A. Gómez-Peña, P. Trens, A. Várez, F. Salles y P. Horcajada, *Molecules*, **2020**, *25*, 3519.
- [86] P. Salcedo-Abraira, A. Santiago-Portillo, P. Atienzar, P. Bordet, F. Salles, N. Guillou, E. Elkaim, H. Garcia, S. Navalon y P. Horcajada, *Dalt. Trans.*, **2019**, *48*, 9807-9817.
- [87] X. Lian, Y. Fang, E. Joseph, Q. Wang, J. Li, S. Banerjee, C. Lollar, X. Wang y H.-C. Zhou, *Chem. Soc. Rev.*, **2017**, *46*, 3386-3401.
- [88] T. Hidalgo, M. Alonso-Nocelo, B. L. Bouzo, S. Reimondez-Troitiño, C. Abuin-Redondo, M. de la Fuente y P. Horcajada, *Nanoscale*, **2020**, *12*, 4839-4845.

En el Bicentenario de la fundación del Museo Nacional del Prado (II)

Aspectos químicos de algunas pinturas relacionadas con la Historia de la Química

José Pastor Villegas y Jesús Francisco Pastor Valle

Resumen: El Bicentenario de la fundación del Museo Nacional del Prado de Madrid se ha celebrado en 2019. En este trabajo, como una continuación de otro previo, tratamos las aportaciones de la Química a la Pintura. Asimismo, comentamos algunas de las pinturas de la colección del mundialmente famoso museo relacionadas con la Historia de la Química.

Palabras clave: Museo Nacional del Prado, Química pictórica, Historia de la Química.

Abstract: The Bicentennial of the founding of the Museo Nacional del Prado in Madrid was celebrated in 2019. In this work, as a continuation of a previous one, we deal with the contributions of Chemistry to Painting. We also comment on some of the paintings in the collection of the world-famous museum related to the History of Chemistry.

Keywords: Museo Nacional del Prado, Pictorial Chemistry, History of Chemistry.

INTRODUCCIÓN

Tras la Guerra de la Independencia (1808-1814), el rey Fernando VII, (San Lorenzo de El Escorial, 1784 – Madrid, 1833),^[1] decidió el 2 de marzo de 1819 reparar el magnífico edificio de la *non nata* Real Academia de Ciencias Naturales de Madrid, siendo los costes de su cargo, para reunir en él las Ciencias y las Artes.^[2] El 19 de noviembre de 1819 se inauguró el Real Museo de Pinturas,^[3] sin reunir Ciencias experimentales y Artes; el rey asistió con la reina María Josefa Amalia de Sajonia (Dresde, Alemania, 1803 – Aranjuez, Madrid, 1829),^[4] su tercera esposa, llegada poco antes. En el bello edificio (Figura 1), se pudieron observar cada miércoles las 311 pinturas de la Colección Real en tres salones (154 en el primero, 136 en el segundo y 21 en el tercero), todas de autores españoles.^[5]

La denominación oficial actual Museo Nacional del Prado (MNP) data de 1920, formado por las obras procedentes de los antiguos Museos del Prado y de la Trinidad y las adquisiciones hechas hasta entonces, así como las que en adelante se adquiriesen legalmente.^[6]

Corriendo el siglo XXI, la Química sigue siendo “la ciencia central” por favorecer los avances en otras áreas científicas.^[7] José Elguero Bertolini, presidente del Foro Permanente Química y Sociedad en 2009, recordó la importancia de la Química.^[8]

La química es quizá la ciencia que más ha hecho por la humanidad, la que más avances ha contribuido al bienestar y la calidad de vida que disfrutamos, pero en general, no se es consciente de ello. Y esto es así porque muchas veces las investigaciones químicas posibilitan el desarrollo, pero del producto final, que es lo que llega a la sociedad, se encargan otros sectores como la medicina, la ingeniería y otros. Y sin embargo, lo cierto es que el esfuerzo de los químicos en su conjunto (científicos, investigadores, docentes, empresarios y trabajadores) ha permitido los avances logrados en áreas de vital importancia como la salud, la alimentación, la higiene, el transporte, el vestido, la cultura o las nuevas tecnologías.

En 2011 fue conmemorado el Año Internacional de la Química declarado por la UNESCO, en el que se insistió que tiene la consideración de ciencia central y que su ámbito es universal.^[9]

Concerniente a la cultura, la contribución de la Química a las Bellas Artes se enfatizó con una triple faceta en un curso sobre Historia de la Química:



J. Pastor Villegas¹



J. F. Pastor Valle²

Avda. de España 22, bl.1 3A, 10001 Cáceres

¹ C-e: josepastorvillegas@gmail.com

² C-e: jesusfpv@hotmail.com

Recibido: 13/12/2020. Aceptado: 20/02/2021.



Figura 1. Vistas de las fachadas norte (hoy, de Goya) y principal (hoy, oeste o de Velázquez) del edificio del MNP de Madrid (hoy, edificio Villanueva). Fuente: “Vista del Museo del Prado”, de Carlos de Vargas Machuca, dibujo (papel agarbanzado sobre cartulina, tinta y aguada gris), 1824. Madrid, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, A-5415

- Material y métodos.
- Ayuda al estudio de obras de arte antiguas.
- Resolución de problemas relacionados con la “patología” y con la conservación y restauración.^[10]

En el siglo en curso, se ha organizado el Área de Restauración del MNP con los ya existentes servicios (Taller de Restauración y Gabinete de Documentación Técnica) y el incorporado Laboratorio Químico; los servicios segundo y tercero han aportado información a conservadores y restauradores al evaluar los daños de las obras, conocer los materiales originales y los añadidos, examinar las técnicas artísticas, documentar restauraciones anteriores para optar por el mejor tratamiento, y aportar información en estudios históricos y documentales.^[11]

En 2019 se ha celebrado el bicentenario de la fundación del MNP, al que pertenecen miles de pinturas. La importancia de una pintura reside en el contenido expresivo que transmite. Menos conocido es el aspecto material de cada pintura desde la elaboración hasta la conservación y restauración.

Pues bien, el presente trabajo, como una continuación de la primera parte, tiene un carácter interdisciplinar. Comentamos las aportaciones de la Química a la materia pictórica y algunas pinturas del MNP relacionadas con la Historia de la Química.

LA PINTURA COMO SISTEMA MATERIAL

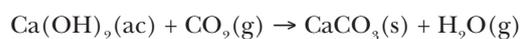
Pedro Gutiérrez Bueno en su discurso de apertura del Real Laboratorio de Química de Madrid señaló en 1788 que “Ella [La Química] dio al Pintor los materiales con que la superficie de una tabla o de un lienzo abulta los seres, emula los milagros de la naturaleza, y retrata sus obras, tal vez mejorándolas”.^[12]

Hoy, desde la Química, se puede decir que una pintura es un sistema material heterogéneo formado por un soporte sólido blanco o coloreado (preparación); por capas pictóricas muy finas compuestas esencialmente de un

colorante disuelto o pulverizado (pigmento) que se aplicó disperso en un líquido transparente y homogéneo (aglutinante); y por películas protectoras que en la mayoría de los casos son resinas transparentes (barnices). Los pigmentos determinan principalmente el color porque aglutinantes y barnices son transparentes y casi incoloros (no absorben selectivamente las radiaciones de la luz blanca).^[13]

Los pigmentos se clasifican en blancos, violetas, azules, verdes, amarillos, rojos y naranjas, pardos, negros y metales. En cada clase son numerosos: elementos químicos, compuestos químicos y mezclas.

Dependiendo del aglutinante, se distinguen tradicionalmente diferentes técnicas pictóricas: temple, óleo, mixta o de transición, y técnica con aglutinantes poliméricos sintéticos. A diferencia de las técnicas que utilizan un aglutinante para vehicular el pigmento y fijarlo al soporte, en la pintura mural al fresco los pigmentos se aplican en una suspensión de agua pura y son aglutinados o fijados por la reacción química de carbonatación del hidróxido de calcio del enlucido ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, cal apagada) con el dióxido de carbono atmosférico (CO_2), es decir, por el carbonato de calcio formado (CaCO_3):



Dichas estas generalidades, añadimos que la durabilidad de una pintura o de una obra de arte en general es asunto complejo porque como sistema material heterogéneo no aislado que es (intercambia materia y energía con el exterior) dependerá de los materiales que la componen y del medio ambiente.

A título de ejemplo, se comenta brevemente la composición y estructura de la *Fragua de Vulcano*, óleo sobre lienzo de Diego Rodríguez de Silva y Velázquez (Sevilla, 1599 – Madrid, 1660),^[14] conocido como Velázquez, pintura muy famosa del MNP. Nos dice la *Guía del Prado* más reciente que la pintura (Figura 2) fue realizada en el primer viaje del pintor a Italia (1629-1630), mostrando



Figura 2. *La Fragua de Vulcano*, óleo sobre lienzo (Alto: 223 cm; Ancho: 290 cm), de Velázquez, 1630. Fuente: MNP, núm. catálogo P1171, Sala 011; fotografía para uso personal

el lienzo una escena compleja en un escenario de gran verosimilitud, en la que Apolo (dios romano de la poesía y de la música, con corona de laurel y túnica anaranjada) visita la fragua de Vulcano (dios romano del fuego y protector de los herreros) para contarle que su esposa Venus (diosa romana de la belleza) le ha engañado con Marte (dios romano de la guerra), noticia que produce en quienes la escuchan incredulidad y sorpresa. Y que no faltan los materiales de trabajo de las fraguas, como son la armadura, las herramientas y el hierro al rojo sobre el yunque calentado antes en el hogar.^[15]

Las fraguas, además de haber sido talleres del Viejo Mundo donde se elaboraban los utensilios metálicos domésticos (braseros, calderos, etcétera), aperos de labranza (rejas de arado, palas, etcétera), fueron también un lugar de reunión frecuente de los hombres en donde hablaban de asuntos diversos, principalmente de asuntos cotidianos. Varios artistas han pintado fraguas que se conservan en el MNP. Sin embargo, la Figura 2 ilustra una escena síntesis de lo humano y de lo divino en el tratamiento térmico del hierro: elaboración de piezas metálicas y mitología.

La *Fragua de Vulcano* ha sido estudiada aplicando, entre otras, técnicas químicas.^[16] Mediante una radiografía general del cuadro se han mostrado cambios, siendo el más significativo de ellos la figura de Vulcano; todos debidos a la mano del pintor al elaborar el cuadro. El soporte se compone de cuatro trozos de lienzo: rectángulo central de aproximadamente 223 x 257 cm, dos tiras delgadas verticales a la izquierda (de 9,5 a 10,5 cm y de 12 a 14 cm) y una tira delgada en el lado derecho (en la parte baja entre 11 y 13 cm, y en la parte alta de 8 a 13 cm); todo el cuadro está reentelado. Concerniente a los pigmentos, los autores del estudio nos dicen que fueron aplicados por lo general en una sola capa de espesor 50-250 µm sobre la preparación, y que hay una, dos y hasta tres capas de barnices resinosos en superficie.

Los pigmentos de la pintura de Velázquez identificados están relacionados en la Tabla 1. Según los autores de la investigación, fue un bermellón relativamente puro (sulfuro de mercurio, HgS) el pigmento utilizado para expresar el estado radiante de la placa metálica rojo-anaranjada que Vulcano sostiene con tenazas. Añadimos que tal placa se calentó primero a mayor temperatura, por lo cual el pigmento utilizado para expresar tal luminosidad del hogar es diferente.

Tabla 1. Pigmentos de la *Fragua de Vulcano*, de Velázquez

Pigmentos identificados (referencia 16)	Comentarios químicos (consultando referencia 13 y nuestros)
Blancos:	
Blanco de plomo	Carbonato básico de plomo, $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$; origen sintético.
Calcita	Carbonato de calcio, CaCO_3 ; natural mineral y sintético.
Amarillos:	
Amarillo de plomo y estaño	Posiblemente, estannato de plomo, Pb_2SnO_4 ; origen natural mineral y fundamentalmente artificial. Colorante orgánico; origen natural vegetal.
Laca orgánica amarilla Óxido de hierro	Óxidos de hierro hidratados de origen mineral natural; el más importante es $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$.
Azules:	
Ultramarino de lapislázuli	Mezcla natural mineral: azurita natural, $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{S}$; silicato de sodio y aluminio más sulfuros; calcita, trazas de piritas y otras impurezas.
Azurita	Carbonato básico de cobre, $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$; origen mineral natural.
Esmalte	Silicato de potasio, K_2SiO_3 , coloreado con óxido de cobalto(II), (CoO); sintético.
Verdes:	
Tierra verde	Mezcla de silicoaluminatos de Fe(II), Mg y K; origen mineral.
Verde compuesto de azurita y laca orgánica amarilla	La azurita es carbonato básico de cobre de origen natural mineral. La laca orgánica amarilla es un colorante vegetal natural.
Rojos y naranjas:	
Bermellón	Sulfuro de mercurio, HgS; origen mineral o sintético.
Laca orgánica roja	Colorante orgánico cuyo principal componente es la alizarina (1,2-dihidroxi-antraquinona); origen natural.
Óxido de hierro	Fe_2O_3 , si es puro; origen natural mineral.
Negros:	
Negro orgánico de carbón	Carbón vegetal (sólido resultante de la transformación térmica de un material lignocelulósico).
Negro orgánico de huesos	Mezcla de carbón y cantidades notables de fosfato de calcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) y carbonato de calcio (CaCO_3) (sólidos resultantes del tratamiento térmico de huesos).
Pardos: Sombra	
	Mezcla de óxido de hierro (Fe_2O_3), arcillas y dióxido de manganeso (MnO_2); origen natural mineral.

Fuente: Elaboración propia con datos de las referencias 13 y 16.

ALGUNAS PINTURAS RELACIONADAS CON LA PREALQUIMIA Y LA ALQUIMIA

Las pinturas del MNP tituladas *El Agua*, *El Aire*, *El Fuego* y *La Tierra* son alegorías relativas a los cuatro elementos agua, aire, fuego y tierra de la Prealquimia (etapa de la Química anterior al siglo IV a. C.). Estas pinturas (Figura 3) anónimas del último cuarto del siglo XVII están ex-

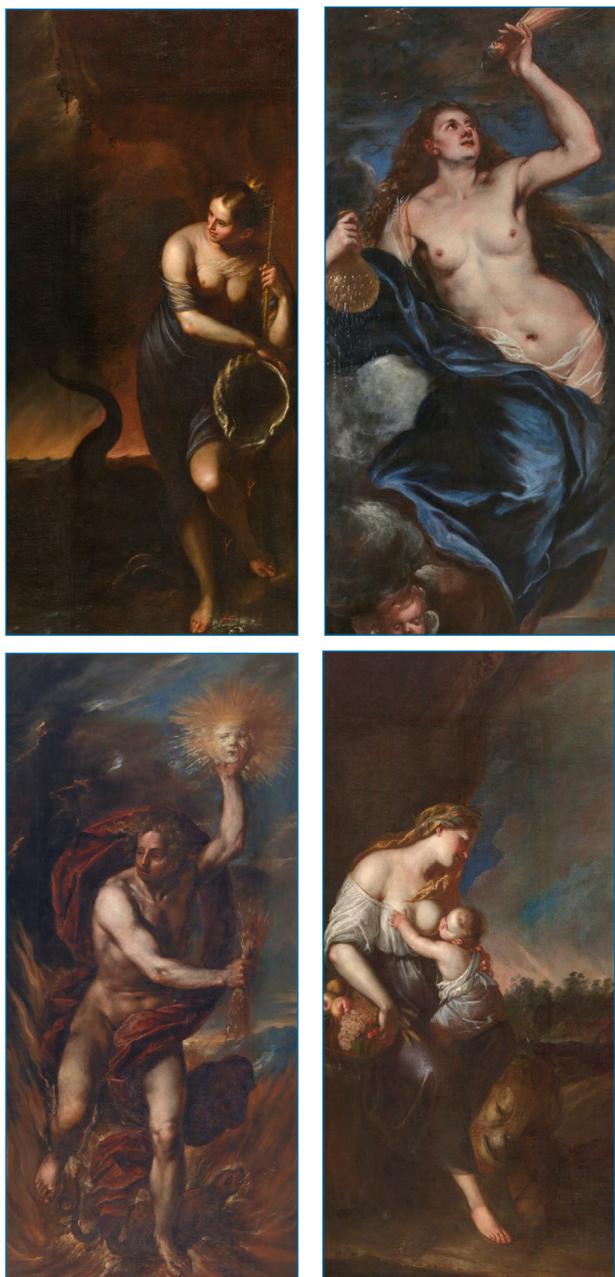


Figura 3. *El Agua*, *El Aire*, *El Fuego* y *La Tierra* (de izquierda a derecha y de arriba a abajo), óleos sobre lienzo (Alto: 245 cm; Ancho: 105,5 cm / Alto: 196,5 cm; Ancho: 78 cm / Alto: 246 cm; Ancho: 106 cm / Alto: 245 cm; Ancho: 106 cm), Anónimos, fecha 1675-1700. Fuente: MNP, núms. catálogos P003197, P000191, P003198 y P003196, ubicación en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid; fotografías para uso personal

puestas en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Recordemos que el agua, el aire, el fuego y la tierra fueron las materias originarias del universo según creían los filósofos griegos Tales (Mileto, h. 624-546 a. C.), Anaxímenes (Mileto, h. 588-524 a. C.), Heráclito (Éfeso, h. 540- 480 a. C.) y Empédocles (Agrigento, Sicilia, h. 490 a. C. – Peloponeso, h. 430 a. C.).^[17]

En estas pinturas se pueden apreciar imágenes relacionadas con la mitología y los razonamientos de los filósofos. A título de ejemplo, en la primera de ellas hay un delfín, una caracola, conchas y caracoles que aluden al medio marítimo.

Concerniente a la Alquimia (etapa de la Química del siglo IV a. C. al 1500, aproximadamente), en la pintura titulada *El Alquimista* (Figura 4), de David Teniers (hijo) representa en primer plano la escena del alquimista insuflando aire con un fuelle para avivar la combustión del carbón en el horno o fogón, teniendo a su izquierda una alquitara (alambique). En segundo plano figuran tres personas, dos de ellas parecen ser visitantes y la tercera un ayudante del alquimista mostrando un producto contenido en un recipiente de vidrio. La luz de las ventanas indica que es de día.



Figura 4. *El Alquimista*, óleo sobre tabla (Alto: 32 cm; Ancho: 25 cm), de David Teniers (Amberes, 1610 – Bruselas, 1690), fecha 1631-1640. Fuente: MNP, núm. catálogo P001804, Sala 077; fotografía para uso personal

PINTURAS DE INTERÉS SIDERÚRGICO POSTERIORES A LA ALQUIMIA

El hierro es un metal de gran importancia desde tiempos muy remotos; de hecho, se denomina “Edad del Hierro” el tiempo comprendido entre 1200 y 550 a. C.,^[18] de conocimiento posterior al cobre y bronce por su alto punto de fusión (1538 °C). En el Nuevo Mundo no se producía todavía el hierro cuando la expedición de Hernán Cortés (1519-1521) descubrió y conquistó el Imperio mexicana.^[19]

Con el transcurso del tiempo, se conocieron tres productos siderúrgicos: el hierro de forja (funde a temperaturas superiores a las que se podían alcanzar en la época), forjable y soldable en caliente, y dúctil en frío; el acero (temperatura de fusión menor), forjable al rojo, relativamente blando al ser enfriado lentamente pero extraordinariamente duro una vez templado (enfriamiento rápido por inmersión en agua y otros líquidos); el hierro fundido o colado (funde con facilidad), relativamente blando y mecanizable fácilmente. Todos estos productos contienen más del 95% de hierro y sus diferencias dependen principalmente de los tipos de horno y de los métodos seguidos que afectan a la cantidad de carbono tomado del combustible y reductor (el hierro dulce no contiene carbono; 0,25-1,25% en los aceros y 2,5-3,25% en el hierro de fundición), pero las diferentes cantidades de carbono en su composición fueron ignoradas hasta finales del siglo XVIII.^[20]

El uso del carbón vegetal como combustible y reductor metalúrgico es antiquísima. En la siderurgia, se utilizó primero carbón vegetal para reducir los óxidos minerales, y después coque. Ambos materiales de carbono se han definido por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, en sus siglas en inglés).^[21] Concerniente al carbón vegetal, hemos clasificado su producción en sistemas artesanales (discontinuos), parcialmente artesanales (discontinuos) e industriales (continuos).^[22]

Con el transcurso del tiempo, los sistemas productivos siderúrgicos han sido los hornos bajos (hornos primitivos y ferrerías) y los hornos altos. En los hornos bajos el método es directo (no se consigue hierro fundido y el producto tiene una composición final dependiente de la calidad del mineral de hierro y de la habilidad del operario) y en los altos el método es indirecto (se consigue hierro fundido, llamado arrabio o hierro colado, susceptible de cambiar su composición química en una segunda etapa).

La producción de hierro a partir de sus óxidos minerales se llevó a cabo en rudimentarios hornos primitivos, en los que se alternaban capas de mineral de hierro con otras de carbón vegetal, insuflándose aire mediante tiro natural o fuelles accionados con las manos o con los pies. En la colección del MNP no hay pinturas sobre hornos primitivos.

Las ferrerías, conocidas también como ferrerías o herrerías, son sistemas de producción de hierro más complejos que los hornos primitivos. Las ferrerías son de origen medieval y funcionaron hasta finales del siglo XIX,

con mayor importancia del siglo XVI al XIX debido al perfeccionamiento del sistema hidráulico exterior del que formaban parte las ruedas hidráulicas verticales para accionar los barquines (grandes fuelles) y el mazo.^[23] En particular, en el actual País Vasco había ya 270 ferrerías y 44 martinets en 1752, superando las cifras productivas del siglo XVI.^[24]

En resumen, al edificio de la ferrería llegaban los minerales de hierro (hematita, magnetita, limonita o goethita) previamente calcinados con leña, cuyos óxidos eran reducidos con carbón vegetal a altas temperaturas (menores que la temperatura de fusión del hierro) en el horno troncopiramidal, relativamente pequeño; no se producía hierro fundido y las escorias e impurezas eran muchas. En el mismo edificio, cerca del horno de reducción, estaba almacenado el carbón vegetal que se había preparado en el bosque cercano mediante carboneras, y mediante los barquines se suministraba el aire que se insuflaba por una tobera al horno de reducción para la combustión del carbón vegetal. La esponja resultante se forjaba frecuentemente en el mismo edificio o en otros edificios con mazos, machucos o martinets para la eliminación de escorias e impurezas, la modificación de la estructura para mejorar sus propiedades y preparación para usos posteriores; la operación consistía en el calentamiento en hogares para ablandamiento del hierro producido y la subsiguiente percusión violenta mediante el mazo, es decir, mediante un martillo pilón de grandes dimensiones que golpeaba rítmicamente el hierro ablandado sobre un yunque clavado en el suelo.

La pintura titulada *Paisaje con ferrerías* (Figura 5), de autor belga, es una vista general de ferrerías; fue pintada en 1595, es decir, en un tiempo de conocimientos mineros y metalúrgicos mucho más próximo al final de la Alquimia que a la época de Lavoisier. En la tabla pictórica se puede observar un pozo y la actividad laboral característica de extracción y transporte del mineral de hierro en carretillas, el sistema hidráulico y el conjunto



Figura 5. *Paisaje con ferrerías*, óleo sobre tabla (Alto: 41 cm; Ancho: 64 cm), de Lucas van Valckenborch (Lovaina, 1535 – Fráncfort, 1597), 1595. Fuente: MNP, núm. catálogo P0011854; fotografía para uso personal

arquitectónico del que formaba parte el edificio de reducción de las menas de hierro; hay también herramientas diversas para los trabajos a realizar, cuya fabricación y reparación se realizaba en otro edificio denominado fragua de la ferrería (forja pequeña).

En relación con la metalurgia en general y la siderurgia en particular, las fraguas, llamadas también forjas, eran edificios donde el maestro y aprendices trabajaron artesanalmente desde tiempo inmemorial los metales de uso en la vida cotidiana, principalmente el hierro. Había fraguas próximas a las ferrerías y martinets, pero lo frecuente era la ubicación en poblaciones por no necesitar los sistemas hidráulicos de las ferrerías. En ellas, los materiales metálicos se calentaban en un hogar o fogón, generalmente, con carbón vegetal de alto poder calorífico (por ejemplo, carbón de brezo) que ardía con el aire suministrado mediante un fuelle movido a mano. Suficientemente calientes, los materiales metálicos se retiraban del fogón y sujetos con las herramientas adecuadas se golpeaban manualmente sobre un yunque para conformar piezas pequeñas.

La producción de hierro posterior a las ferrerías fue mediante sistemas más avanzados denominados altos hornos, influyendo en ello la disminución de las zonas forestales por la expansión de la ganadería y otras explotaciones. Como es conocido, los altos hornos son sistemas de producción continuos en los que se utiliza coque como combustible y reductor de los óxidos de los minerales hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), limonita ($\text{FeO}(\text{OH})$) y siderita (FeCO_3), aunque en algunos sitios en que abunda la madera se usa carbón vegetal. El hierro está completamente reducido antes de iniciarse la formación de escoria en la región media del horno y finalmente resulta fundido y separado de ella.

La pintura titulada *Las doce en los Altos Hornos* (Figura 6) fue realizada en 1895, corriendo la última década del convulso siglo XIX español, tras décadas de industrialización tardía y desigual en la España decimonónica. Ese año es muy posterior al inicio de la Revolución Industrial en Inglaterra o Primera Revolución Industrial (29 de abril de 1769, fecha de la primera patente



Figura 6. *Las doce en los Altos Hornos*, óleo sobre lienzo (Alto: 43 cm; Ancho: 84 cm), de Manuel Villegas Brieva (Lérida, 1871 – Madrid, 1923), 1895. Fuente: MNP, núm. catálogo P007812, depositado en la Universidad de Córdoba, Córdoba; fotografía para uso personal

de la primera máquina de vapor del ingeniero civil escocés James Watt).^[25] En la pintura, además de mostrar la complejidad de una nave industrial y de reflejar la alta temperatura en la misma, se muestra el realismo social de algunos obreros almorzando sentados en el suelo de la misma nave junto a sus mujeres, que les han llevado el almuerzo.

PINTURAS DE INTERÉS AEROSTÁTICO

Consideramos que es de interés comentar pinturas del MNP correspondientes a los comienzos de la aerostación en las décadas de 1780 y 1790, es decir, cuando la Revolución Industrial y la Revolución Química comenzaban a florecer al final de la Ilustración. Los fundamentos aerostáticos son físicos y químicos.

Los franceses Joseph Michel Étienne Montgolfier (Vidalon-les-Annonay, Francia 1740 – Balaruc-les-Bains, Francia, 1810) y su hermano Jacques Étienne Montgolfier (Vidalon-les-Annonay, Francia, 1745 – en ruta entre Lyon y Annonay, Francia, 1799) inventaron los globos aerostáticos de aire caliente, conocidos como montgolfieres.^[26] Tras observaciones y experimentos previos, la primera demostración pública la hicieron en la villa de Annonay (Vivarais), el 5 de junio de 1783, descrita en diferentes publicaciones. Aunque hay tentativas anteriores del ser humano para liberarse de la atracción terrestre, esa fecha se suele considerar el comienzo de la Historia de la Aerostación; hizo recordar a Cristóbal Colón, casi trescientos años después del Descubrimiento de América o Encuentro de los mundos viejo (europeo) y nuevo (indígena).

Algunos años antes de la invención de los hermanos Montgolfier, el físico y químico Henry Cavendish (Niza, 1731 – Londres, 1810) había descubierto en 1766 y estudiado las propiedades de un gas al que llamó *aire inflamable*, producto de la reacción de un ácido fuerte (por ejemplo, ácido vitriólico, es decir, ácido sulfúrico) con ciertos metales (por ejemplo, cinc o hierro),^[27] que sería denominado hidrógeno dos décadas después por Antoine Laurent Lavoisier.^[28] Dicho gas, mucho menos denso que el aire, fue sugerido por el físico francés Jacques Alexandre César Charles (Beaugency, 1746 – París, 1823) para propulsar los globos aerostáticos en vez de aire caliente, contribuyendo a su perfección.^[29] El 27 de agosto de 1783, a las cinco de la tarde, se inició el experimento de elevar el primer aerostato de hidrógeno en el campo de Marte, tras cuatro días de preparación; 500 kg de hierro y 250 kg de ácido sulfúrico fueron necesarios para llenar un globo hasta sus dos tercios; el globo se hizo de fajas de seda barnizadas con caucho para que no se escapase el gas por los poros. Este segundo experimento, como el anterior y otros que siguieron en Francia se han descrito detalladamente.^[30]

A los globos llenos con hidrógeno se unía una barquilla (cesta), en la que embarcaban los aeronautas y cuanto llevaban para observar y experimentar. En cambio, en los

globos tipo montgolfier había una galería perimetral por encima de la boca del globo.

En España, las noticias sobre los acontecimientos aerostáticos franceses con globos montgolfier y globos de hidrógeno se conocieron inmediatamente, principalmente a través de las publicaciones periódicas *Gaceta de Madrid* y *Mercurio histórico y político*, y la experimentación fue inmediata. Es posible que la primera ascensión no tripulada en España sea la de 29 de noviembre de 1783; fue un globo que ascendió en el Escorial construido bajo la dirección del ingeniero civil Agustín de Betancourt y Molina (Puerto de la Cruz, Tenerife, 1758 - San Petersburgo, 1824), meses antes de pasar a Francia como pensionado; el experimento fue presenciado por el rey y otras personas cortesanas.^[31]

José Viera y Clavijo (Realejo Alto, Tenerife, 1731 – Las Palmas, 1813) era conocedor de los nuevos gases descubiertos y realizó también diversos ensayos en el gabinete experimental del palacio del marqués de Santa Cruz de Madrid desde algunos años antes, concurriendo público diverso; destacó a Pedro Gutiérrez Bueno como “mi primer discípulo de aires fijos y gases”.^[32] Pocos días después de la ascensión del globo construido por Betancourt y Molina, el 15 de diciembre de 1783 ascendieron dos globos desde el jardín del Marqués de Santa Cruz.^[33] En su publicación *Los ayres fijos* menciona los primeros experimentos franceses de globos aerostáticos.^[34]

La actividad aerostática española continuó en 1784. Se conserva en el MNP la pintura *Ascensión de un globo Montgolfier en Aranjuez* (Figura 7), de autor español. En tierra, se puede observar numeroso público en una gran explanada, con una gran arboleda detrás, y una plataforma de madera octogonal en cuyo centro se encuentra la fuente de calor generadora de aire caliente (más ligero que el aire atmosférico exterior) para llenar el globo y causar la ascensión; los mástiles servían para colgar el globo antes de iniciar su llenado con el aire caliente. Y si se observa el globo, de arriba a abajo se pueden apreciar sobre la tela los signos del zodiaco alrededor y soles como decoración, cuatro astas de las que cuelgan dos banderas blancas y dos banderas rojizas, y al menos un tripulante con un banderín en el corredorcillo perimetral por encima de la boca del globo; el sentido de las llamas no nos parece correcto porque la fuente de calor transportada proporcionaría llamas y aire caliente hacia el interior del globo. Según la *Guía del Prado*,^[35] la pintura corresponde a la ascensión de un vuelo tripulado en presencia de los reyes y toda la corte de Carlos III en Aranjuez. Tal acontecimiento pudo haber ocurrido en ese real sitio porque el rey permaneció allí entre el 23 de abril y parte de junio de ese año, según consta en la *Gaceta de Madrid*.

En España, hubo ascensiones tripuladas en aerostatos de hidrógeno en el reinado de Carlos IV. La primera fue la del capitán italiano Vizenzo Lunardi en Madrid, el domingo 12 de agosto de 1792 y la segunda el martes 8 de enero de 1793, que fueron presenciadas por la Familia Real, Godoy y Álvarez de Faria, y numeroso público que dejó beneficios económicos al Hospital General de



Figura 7. *Ascensión de un globo Montgolfier en Aranjuez*, óleo sobre lienzo (Alto: 169 cm; Ancho: 279,5 cm), de Antonio Carnicero Mancio (Salamanca, 1748 – Madrid, 1814), hacia 1784. Fuente: MNP, núm. catálogo P641, Sala 089; fotografía para uso personal

Madrid. Los globos se llenaron con hidrógeno generado *in situ* en los lugares de partida (Jardín del Buen Retiro y Plaza de la Armería del Palacio Real, respectivamente) mediante reacción química de cinc con ácido sulfúrico diluido, y a bordo iban instrumentos científicos (brújula, barómetro, termómetro, etcétera) y botellas llenas de agua. Tiene también interés señalar que finalizado el segundo viaje, el aeronauta entregó al duque de la Roca una botella llena de aire tomada a la mayor elevación conseguida; el aire fue analizado por los comisionados Francisco Hicedo y Francisco Gómez, Boticarios primero y segundo de los Reales Hospitales General y Pasión de la Corte, análisis que se realizó en el Real Laboratorio de Química de la calle de Alcalá, facilitando el catedrático Pedro Gutiérrez Bueno todo el material necesario. El resultado del análisis del aire recibido fue “que cada cien partes de este aire, contenía veinte y siete del gas oxígeno, y setenta y tres del gas azoótico”, es decir 27% de oxígeno y 73% de nitrógeno, resultados que comparados con el análisis del aire de la calle de Alcalá les “hizo conocer que las partes del aire analizado, eran casi iguales a las de este último”, y aseguraron que el aire recibido para su análisis “solo se diferencia del que nos rodea en estar más enrarecido, o bien sea por el menor peso que gravita sobre él, o por la variación de su temperatura”. Este análisis fue hecho público el 18 de enero de 1793.^[36]

No se conservan en el MNP imágenes referentes a las ascensiones en aerostatos de hidrógeno realizadas en España por Vizenzo Lunardi. Sin embargo, sí se conserva la pintura titulada *Los tres viajeros aéreos favoritos* (Figura 8); representa el segundo vuelo londinense que organizó en 1785 en un aerostato de hidrógeno, despegando de St. George’s Fields, en el sur de Londres; Lunardi saluda y le acompañan su ayudante George Biggin y la actriz Letitia Anne Sage.^[37]

Es destacable señalar que entre las ascensiones de Vizenzo Lunardi en España se realizó experimentación militar con aerostatos de hidrógeno en Segovia, en donde ejercía el conocido Louis Joseph Proust desde su vuelta a España en 1786 contratado como catedrático de Química de la Real Escuela de Artillería. Oficiales y



Figura 8. *Los tres viajeros favoritos*, óleo sobre lámina de cobre (Alto: 50,5 cm; Ancho: 36,5 cm), de John-Francis Rigaud (Turín, 1742 – Packington Hall, 1810), hacia 1785. Fuente: MNP, núm. catálogo P002598, Sala 089; fotografía para uso personal

alumnos del Real Colegio de Artillería de Segovia, asesorados por él, construyeron un aerostato de 45 m de diámetro y 93 m de largo. Tras experimentación previa, ascendió con éxito los días 3, 5 y 7 de noviembre de 1792. A petición de la Familia Real, se realizó una demostración con éxito en San Lorenzo de El Escorial el 14 de noviembre de ese año, acto en el que intervino el capitán Proust; el conde de Aranda fue testigo y escribió un informe laudatorio.^[38]

CONCLUSIONES

1. Reinando Fernando VII, el 19 de noviembre de 1819 fue inaugurado el Real Museo de Pinturas en el edificio neoclásico reparado (hoy, Edificio Villanueva) que se construyó en los reinados de Carlos III y Carlos IV para ser la sede de la Real Academia de Ciencias Naturales de Madrid, y de otras dependencias científicas y tecnológicas conexas. La denominación Museo Nacional del Prado data de 1920. En 2019, reinando Felipe VI, se ha celebrado el bicentenario de la fundación del mundialmente famoso museo español.
2. Tiene mucha “química” acumulada pues cada pintura de su numerosa colección es un sistema material heterogéneo desde su elaboración, que hay que conservar y restaurar con el paso del tiempo. Tal consideración material permite estudiar sus pinturas aplicando diferentes técnicas, contribuyendo a ello la Química significativamente desde el siglo en curso.
3. Entre sus numerosas pinturas, hay algunas relacionadas con la Historia de la Química, de potencial interés didáctico. Hay pinturas de interés prealquímico y alquímico, pinturas de interés siderúrgico y pinturas de interés aerostático.

AGRADECIMIENTOS

Al MNP y a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid por sus atenciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. La Parra López, Fernando VII, Real Academia de la Historia, <https://bit.ly/3k5NKwM> (visitada el 14/02/2021).
- [2] *Gaceta de Madrid*, **1818**, 27(3/3/1818), 227.
- [3] *Gaceta de Madrid*, **1819**, 142(18/11/1819), 1178-1179.
- [4] M. P. Queralt del Hierro, Sajonia, María Josefa Amalia, Real Academia de la Historia, <https://bit.ly/3qzZS33> (visitada el 10/12/2020).
- [5] *Catálogo de los cuadros de Escuela Española que existen en el Museo del Prado*, Madrid, Imprenta Real, 1819.
- [6] *Gaceta de Madrid*, **1920**, 137(16/05/1920), 642-647.
- [7] Comité Científico Organizador, *Chemistry: Science at the Frontier/Química, Ciencia en la frontera*, 13.º Simposio Científico, Madrid, Fundación Lilly, 2008, págs. 5-6.
- [8] C. Roca, [Entrevista a José Elguero, presidente del Foro Permanente Química y Sociedad], *Quím. ind.*, **2009**, 582(abril-mayo), 12-15.
- [9] L. A. Oro, La Química española en el año internacional de la Química, *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*, **2011**, CLXXXVII(Extra), 169-172.
- [10] J. M. Cabrera Garrido, Contribución de la Química a las Bellas Artes, F. Calvo Calvo (org.) *Curso de Conferencias sobre Historia de la Química*, Madrid, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Realigraf, 1982, págs. 261-284.
- [11] M. A. Moreno Cifuentes, P. Sedano, Investigación en los laboratorios de restauración de museos históricos, *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*, **2006**, CLXXXII(717), 87-97.
- [12] *Memorial Literario Instructivo y Curioso de la Corte de Madrid*, **1788**, febrero, 302-309.
- [13] M. Matteini, A. Moles (traducción de Emiliano Bruno y Giuliana Lain), *La Química en la restauración. Los materiales del arte pictórico*, Guipúzcoa: Nerea, Sevilla: Junta de Andalucía: Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, 2001, págs. 25-140.
- [14] A. E. Pérez Sánchez, Rodríguez de Silva y Velázquez, Diego, Real Academia de la Historia, <https://bit.ly/2NkSORQ> (visitada el 10/12/2020).
- [15] M. D. Jiménez Blanco (ed.), *La Guía del Prado* (7.ª ed., re.), Madrid, Museo Nacional del Prado, 2019, págs. 108-109.
- [16] M. C. Garrido Pérez, J. M. Cabrera, G. Mckim-Smith, R. M. Newman, La Fragua de Vulcano. Estudio técnico y algunas consideraciones sobre los materiales y métodos, *Boletín del Museo del Prado*, **1983**, 4(11), 79-95.
- [17] M. Alfonseca, *Grandes científicos de la humanidad*, Madrid, Espasa Calpe, 1998, vol. 2, pág. 205; vol. 1, págs. 6, 66 y 97.

- [18] A. Company Casadevall, Z = 86, hierro, Fe, *An. Quí.* 115(2), **2019**, 88.
- [19] J. Pastor Villegas, J. F. Pastor Valle, Después del Imperio Mexica: aspectos científicos y tecnológicos prehispánicos aportados por Hernán Cortés, novohispanos e hispanomexicanos, *Actas del Congreso Internacional Hernán Cortés en el siglo XXI. V Centenario de la llegada de Hernán Cortés a México*, Medellín y Trujillo, 4-6 de abril de 2019, págs. 73-74 (publicación más extensa en prensa).
- [20] C. S. Smith, La metalurgia en los siglos XVII y XVIII, M. Kranzberg, C. W. Pursell, Jr. (eds.), *Historia de la Tecnología: La técnica en Occidente de la Prehistoria a 1900*, Barcelona, Gustavo Gili, 1981, vol. 1, págs. 162-188.
- [21] E. Fitzer, H. H. Köchling, H. P. Bohem, H. Marsh, Recommended terminology for the description of carbon as a solid (Recommendations 1995), *Pure Appl. Chem.* **1995**, 67, 473.
- [22] J. Pastor Valle, J. F. Pastor Valle, J. M. Meneses Rodríguez, M. García García, Study of comercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents, *J. An. Appl. Pyrolysis*, **2006**, 76, 103-108.
- [23] J. A. Balboa de Paz, *La siderurgia tradicional en el noroeste de España (siglos XVI-XIX)*, Tesis doctoral, Universidad de León, Departamento de Historia, 2014.
- [24] O. Puche Riart, J. F. Ayala Carcedo, Notas sobre la minería y metalurgia españolas en la época del Imperio, *Bol. Geol. Min.*, **1995**, 196(2), 186-198.
- [25] M. Alfonseca, Watt, James, *Grandes científicos de la humanidad*, Madrid, Espasa Calpe, 1998, vol. 2, pág. 220.
- [26] I. Asimov, *Enciclopedia biográfica de ciencia y tecnología* (versión española de C. Varela Ortega y F. Díaz Calero), Madrid, Alianza Editorial, 1982, pág. 191.
- [27] I. Asimov, *Enciclopedia biográfica de ciencia y tecnología* (versión española de C. Varela Ortega y F. Díaz Calero), Madrid, Alianza Editorial, 1982, págs. 160-161.
- [28] I. Asimov, *Enciclopedia biográfica de ciencia y tecnología* (versión española de C. Varela Ortega y F. Díaz Calero), Madrid, Alianza Editorial, 1982, págs. 178-182.
- [29] I. Asimov, *Enciclopedia biográfica de ciencia y tecnología* (versión española de C. Varela Ortega y F. Díaz Calero), Madrid, Alianza Editorial, 1982, págs. 190-191.
- [30] F. Marion (versión española E. Cazorla), *Los Globos y los viajes aéreos*, Madrid, Gaspar Editores, 1883.
- [31] A. Rumeu de Armas, *Ciencia y Tecnología en la España Ilustrada. La Escuela de Caminos*, Madrid, Ediciones Turner, 1980, p. 38.
- [32] T. F. Glick, Viera y Clavijo, José de, *Diccionario histórico de la ciencia moderna en España*, Barcelona, Ediciones Península, 1983, vol. 2, págs. 412-413.
- [33] P. A. de Salanova y Guilarte, *Estática del ayre y náutica de la atmósfera, o disertación...*, Madrid, Imprenta de Sancha, 1792, págs. 15-16.
- [34] J. de Viera y Clavijo, *Los ayres fixos*, Las Palmas, Imprenta de Francisco Martín González, 1876, págs. 40-49.
- [35] M. D. Jiménez Blanco (ed.), *La Guía del Prado* (7.ª ed. re.) Madrid, Museo Nacional del Prado, 2019, pág. 164.
- [36] F. Hicedo, J. Gomez, Analisis quimico del ayre obtenido en una botella, por el Capitan Don Vicente Lunardi, en la mayor altura de su ultimo viage aerostático, *Diario de Madrid*, **1793**, 18 (viernes 18 de enero), 73-75.
- [37] P. A. de Salanova y Guilarte, *Estática del ayre y náutica de la atmósfera, o disertación...*, Madrid, Imprenta de Sancha, 1792, págs. 16-19.
- [38] C. Lázaro Ávila, A. Pérez Heras, *La aerostación militar en España*, Madrid, Ministerio de Defensa, Secretaría General Técnica, Industrias Gráficas Caro, 1995, págs. 11-14.

Aproximación histórica a momentos clave en el desarrollo de la química

Oportunidades para su enseñanza

Juan Quílez Pardo

Resumen: Se realiza un breve análisis histórico de la química desde sus orígenes hasta principios del siglo xx. El objetivo de este estudio supone proporcionar al profesorado de niveles preuniversitarios elementos de interés que le posibiliten introducir la historia de la química en sus clases para facilitar su aprendizaje. Esta aproximación histórica se ha dividido en tres epígrafes: 1) los orígenes de la química moderna; 2) inicios de la teoría atómica y el desarrollo de la química orgánica; 3) diálogos de la química con la física: química física y química cuántica.

Palabras clave: historia de la química; enseñanza de la química; química preuniversitaria.

Abstract: A brief historical analysis of chemistry is carried out from its origins to the beginning of the 20th century. The aim of this study is to provide pre-university level chemistry teachers with elements of interest that may allow them to introduce the history of chemistry in their classes to facilitate its learning. This historical approach consists of three main sections: 1) the origins of modern chemistry; 2) the beginning of the atomic theory and the development of organic chemistry; 3) conversations of chemistry with physics: physical chemistry and quantum chemistry.

Keywords: history of chemistry; teaching chemistry; preuniversity chemistry.

INTRODUCCIÓN

La enseñanza y el aprendizaje de la ciencia, en general,^[1-3] y de la química,^[4-8] en particular, se pueden beneficiar mediante el conocimiento de su historia. Este estudio histórico permite proporcionar a los profesores de química las bases ontológicas y epistemológicas de los conceptos químicos que cimentan esta disciplina científica. Estos fundamentos los pueden utilizar para introducir en sus clases aspectos básicos acerca de cómo se ha ido construyendo el conocimiento químico, lo que posibilita reflexionar con los estudiantes sobre cómo hemos llegado a saber lo que sabemos en

la actualidad^[9] de las sustancias químicas y de sus reacciones. Este análisis ayuda a presentar los distintos intentos de modelizar el estudio de aspectos concretos de la realidad desde diferentes presupuestos teóricos. El examen de la evolución histórica de estas conceptualizaciones permite, entre otros aspectos:

- Comprender el significado otorgado a un término científico en un contexto particular.
- Estudiar la evolución del significado de los conceptos químicos, encontrando de esta forma casos que ejemplifiquen el carácter provisional de los conocimientos científicos.
- Conocer las distintas conexiones establecidas entre las distintas ideas, su organización y jerarquía.
- Enjuiciar las controversias producidas.
- Apreciar tanto las limitaciones como los éxitos producidos.
- Valorar el avance científico como producto de un esfuerzo colectivo de científicos que utilizan un conocimiento que, por ser público, se encuentra sometido al juicio crítico de los demás.
- Entender la necesidad de construir otros conceptos nuevos.



J. Quílez Pardo

Departamento de Física y Química
IES Lluís Vives. Valencia
C-e: jquilez@uji.es

Recibido: 06/04/2021. Aceptado: 20/05/2021.

En el intento de describir, explicar, predecir y controlar las propiedades químicas de la materia. Estas discusiones de clase posibilitan que los alumnos eviten o superen errores conceptuales, así como que construyan los conocimientos químicos desde una base sólida.^[10-11]

A pesar de estos beneficios pedagógicos de inclusión de los aspectos históricos que fundamentan el desarrollo del conocimiento científico, numerosos trabajos señalan que la química se suele presentar a los alumnos desde una perspectiva empirista, dando, por tanto, una imagen pobre de lo que representa la química como disciplina científica.^[12] Además, una presentación muy extendida es la que enfatiza el aprendizaje memorístico de los productos finales de esta ciencia, sin considerar los procesos de construcción de este conocimiento.^[13] Esta visión estática de la química proporciona una imagen simple de esta disciplina e impide conocer los factores que han propiciado los distintos cambios producidos, así como el proceso dinámico de construcción realizado en cada caso concreto.^[1]

En el contexto español, un análisis de los libros de Física y Química de ESO y de bachillerato^[14] reveló que la historia de la química presente en estos materiales contribuye a generar una imagen individualista, aproblemática, empirista y velada de la química como actividad humana. Particularmente, otros estudios han analizado las deficiencias epistemológicas y ontológicas que manifiestan estos libros de texto en su presentación de los modelos atómicos^[15] y en la discusión de ideas asociadas al concepto de equilibrio químico.^[16]

Por otro lado, algunos autores^[17] señalan la escasa preparación inicial del profesorado de química que le pueda permitir usar adecuadamente la historia de la química en sus clases. Además, en estrecha relación con la presentación que suelen realizar muchos libros de texto,^[13] los profesores evitan, en general, el empleo de la historia de la ciencia y, por tanto, no analizan los procesos de construcción de los conocimientos científicos.^[18]

ESTRUCTURA Y OBJETIVO

Tomando como referencia los análisis realizados por Jensen^[19] y Chamizo,^[20] en la síntesis histórica que sigue sobre momentos clave tanto en el origen como en el desarrollo de la química hasta los primeros años del siglo xx, se han realizado agrupaciones y clasificaciones que faciliten la exposición. Es evidente que ello ha implicado una selección en lo que respecta a la evolución de ideas que se presentan, los hechos asociados y sus protagonistas. En consecuencia, han quedado sin tratar las contribuciones de muchos otros científicos; tampoco ha podido tener el espacio que se merece el análisis de otros campos importantes de estudio. Además, cuando esto último sí que se ha hecho, necesariamente la presentación realizada no ha tenido el grado de profundidad que posibilite la comprensión completa de todos los elementos conceptuales

y metodológicos asociados. Sin embargo, esta agrupación permite, desde una perspectiva básica, proporcionar una visión general, ordenada y sistemática de la evolución de esta rama de la ciencia desde su nacimiento hasta los primeros años del siglo xx. Se ha intentado, en consecuencia, evitar transmitir simplificaciones que distorsionen procesos de construcción complejos que requerirían mucho más espacio para su análisis profundo. En este sentido, se debe mencionar que algunos de los puntos tratados en este trabajo ya han sido analizados con mayor detalle en otros estudios previos.^[21-25] También se debe señalar que la inclusión de pequeñas lecturas de la historia de la química^[26] de algunos aspectos examinados en este artículo se ha empleado previamente como recurso didáctico en la introducción de conceptos y procesos para alumnos de Bachillerato.^[27-28] En concreto, la estructura de este trabajo se corresponde con los siguientes epígrafes:

1. Los orígenes de la química moderna.
2. Inicios de la teoría atómica y desarrollo de la química orgánica.
3. Diálogos de la química con la física: química-física y química cuántica.

La bibliografía que acompaña a este trabajo puede servir de base para un estudio posterior en profundidad pausado y amplio. De esta forma, con este breve examen histórico y el material que lo soporta se ha pretendido realizar un aporte para el profesorado de química de niveles preuniversitarios que le posibilite encontrar elementos de interés que le animen a profundizar en su conocimiento histórico de la química. Estos aspectos básicos pueden ayudarle a encontrar la necesidad y a valorar la utilidad de introducir la historia de la química en sus clases con la intención de apoyar y de guiar a su alumna-do en la construcción de los conocimientos que se estén trabajando en clase.^[29]

LOS ORÍGENES DE LA QUÍMICA MODERNA

Los pilares de la química moderna

El “nacimiento” de la química moderna fue posible gracias a la gran cantidad de conocimiento empírico acumulado previamente. Podemos mencionar como ejemplos la utilización de pigmentos y de tintes para las prendas de vestir, la fabricación de jabón y de explosivos, la obtención de perfumes y cosméticos, la construcción de nuevos aparatos y el desarrollo de técnicas experimentales relacionadas con la cerámica y la obtención y tratamiento de metales. Todo este conocimiento previo provenía básicamente de las contribuciones realizadas por la alquimia, la metalurgia, y la medicina y la farmacia^[30-32] (Figura 1).



Figura 1. Los pilares de la química moderna^[30]

Alquimia

El interés de los alquimistas se centraba en la transmutación de los metales en plata y oro y en encontrar el “elixir de la vida”. Sus diferentes tradiciones (china, hindú, griega, egipcia) desarrollaron todo un saber práctico en forma de procedimientos (destilación, sublimación, disolución, filtración, calcinación, etc.), así como otros más específicos como el de las aleaciones metálicas (las famosas espadas de Toledo) o el tratamiento del vidrio. También progresaron en el conocimiento de técnicas acerca de la obtención y el comportamiento de sustancias: álcalis (hidróxido de potasio y de calcio), ácidos (acético), alcohol, etcétera. A partir del siglo XIV los alquimistas medievales aprendieron a preparar ácidos fuertes (ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico) y desarrollaron técnicas de autenticación del oro (agua regia).

La alquimia árabe se encuentra compilada en los escritos del siglo X atribuidos a Jabir ibn Hayyan (Geber en la tradición cristiana). Estos conocimientos encontraron continuidad en el mundo cristiano gracias a las traducciones del *corpus* árabe realizadas a partir del siglo XII. Geber defendió las ideas aristotélicas de los cuatro elementos y sus correspondientes cualidades. Este marco teórico fue un importante obstáculo que limitó el desarrollo de la alquimia.^[33] Otro impedimento que tuvo que superar la química moderna está relacionado con el lenguaje empleado por la alquimia, ya que utilizó la alegoría y la analogía como formas de expresión, desarrollando un vocabulario arcano y secreto para impedir la entrada de intrusos y ocultar información a los no iniciados.^[34]

Metalurgia

Por su parte, los metalúrgicos, a diferencia de los alquimistas, eran personas incultas, preocupadas fundamentalmente por el desarrollo de las artes prácticas

relacionadas con el tratamiento de los metales y de sus minerales. Eran artesanos interesados en el desarrollo de unas técnicas, sin que ello supusiera la existencia de ningún marco filosófico o conceptual que guiase su trabajo.

En el siglo XVI las operaciones relacionadas con la minería y la fundición alcanzaron una gran importancia. Entre los metalúrgicos se generó la necesidad de registrar los detalles técnicos de su oficio, lo que posibilitó un conocimiento práctico con el que instruir a los demás. Ello originó la publicación de los primeros manuales acerca de los procesos asociados a la obtención y tratamiento de los metales. Vanoccio Biringuccio (1480-1539) desarrolló un conocimiento práctico de la fundición de metales, que recogió en su *De la pirotechnia* (1540). En esta publicación ridiculizó las ideas alquimistas de producción de oro a partir de otros metales y describió las principales operaciones metalúrgicas (ensayo, refinado, aleación y fundición), para las que registró los detalles técnicos de la química aplicada en este campo. Por su parte, del médico Georgius Agricola (1494-1555), gracias a su conocimiento generado en su estrecho contacto entre mineros publicó el libro *De re metallica* (1556) en el que describía los ensayos de análisis de minerales y de refinado de los metales.

Medicina, farmacia y primeros pasos de la química como disciplina autónoma

El principal interés de los médicos y de los boticarios se centraba en el tratamiento de la enfermedad. Los orígenes de la química moderna relacionados con la medicina se conocen con el nombre de *iatroquímica*. El máximo representante de esta tradición es Paracelso (1493-1541). Este médico y sus seguidores son los que otorgan a la química un papel importante en la preparación de medicinas. Paracelso conmina a los médicos a que aprendan química; anuncia remedios milagrosos como la sal de mercurio con la que trata con éxito la sífilis y diagnostica el origen externo de ciertas enfermedades, como la “enfermedad de los mineros”, la silicosis.

El médico Jean-Baptiste van Helmont (1577-1640), es considerado como un representante destacado de la transición de la alquimia a la química.^[35] En su revisión cuidadosa de los escritos de Paracelso encontró muchos errores. Sus prácticas tenían un marcado carácter cuantitativo, empleando para ello la balanza, interesándose además por el estudio y caracterización de los gases. Esta práctica experimental sería origen de nuevos problemas y de nuevas técnicas: el equipamiento de los laboratorios empezó a enriquecerse con “campanas” destinadas a recoger e identificar los gases formados en las reacciones químicas.

Robert Boyle (1627-1691), influenciado por van Helmont, es otro de los autores impulsores del experimentalismo en la química. Sus rigurosos procedimientos experimentales, su interés por la química como campo de conocimiento autónomo, más allá de su relación con la

medicina, así como su definición de elemento químico, superando con ello las ideas aristotélicas, han supuesto considerar a Boyle como uno de los más destacados fundadores de la química moderna.^[35] En su libro *The Sceptical Chymist* (1661) presenta una imagen del químico escéptico, que pide demostraciones, en su objetivo de convertir a la química en ciencia respetable, basada en determinaciones cuantitativas y reproducibles. Como aspecto destacable resultó su clasificación experimental de las disoluciones ácidas, alcalinas y neutras, así como el desarrollo de indicadores. El estudio de las sales obtenidas por reacción de ácidos y bases marcaría una importante área de estudio de la química en el siglo XVIII.^[36]

La necesidad de transmitir el conocimiento de química generado por el interés que despertaron el reconocimiento y la preparación de sustancias propició la publicación de distintos manuales de química con fines pedagógicos, contribuyendo de esta forma a consolidar la química como disciplina.^[37] En el año 1597, Andreas Libavius (1540-1616) publicó el libro *Alchemia*, que es considerado el primer manual de química, en el que destaca su voluntad de enseñar distintos procesos experimentales. Si bien Libavius todavía creía en la idea de trasmutación, su libro es relevante por contener diferentes técnicas analíticas y métodos de laboratorio de preparación de medicamentos. Esa voluntad didáctica de enseñanza de la química la continuó unos años más tarde Jean Beguin (1550-1620) mediante la publicación en 1610 de su libro *Tyrocinium Chymicum (Química para principiantes)*. Nuevos autores contribuyeron durante el siglo XVII a la formación de médicos y boticarios mediante la publicación de sus propios textos de enseñanza de la química. Esta tarea se desarrolló fundamentalmente en el *Jardin du Roi* de París, en el que existían profesores encargados de impartir enseñanzas químicas. Christopher Glaser publicó *Traité de chymie* (1663) y Nicholas Lemery consiguió un gran éxito con su *Curs de Chymie* (1675), que alcanzó un total de treinta ediciones, traducándose al latín, inglés, alemán, italiano y español.

Estos esfuerzos iniciales de institucionalización de la química, materializada a través de los textos publicados para su enseñanza, fueron cristalizando en los siglos XVIII y XIX con la publicación de destacados manuales pensados para la formación de los químicos. Entre los autores más sobresalientes de este tipo de publicaciones que se mencionan en este trabajo se encuentran Lavoisier, Dalton, Berthollet, Mendeléiev, van't Hoff y Pauling.

Clasificación de las sustancias atendiendo a su reactividad relativa en torno al concepto de afinidad

La química de la primera mitad del siglo XVIII se centró fundamentalmente en el estudio experimental de dos tipos de reacciones:^[36,38]

- a) La formación de sales por reacción de ácidos y bases.

- b) Las reacciones de desplazamiento entre metales (que hoy clasificaríamos como redox).

El conocimiento empírico de las reacciones químicas desarrollado con anterioridad al siglo XVIII tuvo un intento de explicación teórica por parte de Isaac Newton. En el año 1704 publicó su libro *Optics*.^[39] En su cuestión 31 propuso que los procesos químicos de desplazamiento se debían a un cierto tipo de fuerzas de atracción de corto alcance, similares a las gravitacionales.

Por otro lado, el intento de sistematización de estas reacciones supuso el desarrollo de las denominadas tablas de afinidad química. Estas primeras ordenaciones son un claro ejemplo del papel esencial que a lo largo de la historia de la química han desempeñado para el desarrollo de su conocimiento (tanto desde el punto de vista pedagógico como del teórico) los distintos esfuerzos de organización de sustancias y de sus reacciones. La primera de estas taxonomías de reactividad relativa fue la tabla elaborada en 1718 por el científico francés E. F. Geoffroy (1772-1844)^[40] como guía de la práctica de laboratorio^[41] al tratar de sistematizar y ordenar el conocimiento existente sobre los cambios químicos, actuando de esta forma como un intento de compilación visual de todo el conocimiento experimental que se poseía acerca de las reacciones químicas, según los dos grupos de reacción señalados previamente. Esta visión empírica de la química como ciencia del laboratorio se encontraba muy arraigada en la época.

Si bien esta primera tabla tuvo escasa continuidad durante unos cincuenta años, a partir de 1775 la publicación de la tabla del químico sueco T. Bergman (1735-1784) dio un nuevo impulso a este tipo de clasificaciones de afinidades electivas. Esta tabla, así como varias de las que siguieron, tomó como marco teórico el intento de extender a la química el paradigma newtoniano. Como objetivo último se pretendía medir esas fuerzas de atracción que se ponían de manifiesto a corto alcance. La determinación de las distintas afinidades permitiría que la química pasase a ser una disciplina rigurosa equiparable a la mecánica.^[42] Entre otros, destacaron en este intento Wenzel, Elliot, Kirwan y Guyton de Morveau. Pero ese sueño newtoniano de medición de las afinidades químicas (cuantificar sus valores mediante ecuaciones matemáticas) no produjo los resultados esperados.^[33] A pesar de ello, la idea de fuerza newtoniana siguió dando soporte teórico a la explicación de las reacciones químicas hasta pasada la segunda mitad del siglo XIX, lo que impidió, como se verá más adelante, el avance del concepto de equilibrio químico en un primer momento hasta que nuevos elementos teóricos se pudieron ir incorporando.

La interpretación de las tablas de afinidad implicaba que todas las reacciones eran completas, estando teóricamente prohibido el proceso inverso de la reacción predicha en estas tablas. Como veremos, estas ideas se cuestionaron a partir de principios del siglo XIX con los trabajos de C. L. Berthollet (1748-1822), desarrollados

en muchos casos a gran escala^[43] e incorporados en su programa de enseñanza en la *École Normale*,^[44] lo que representó la base que inició la introducción de los conceptos relacionados con el equilibrio químico (reacciones incompletas y reversibles), expuestos, entre otros, en su libro *Essai de Statique Chimique* (1803).

Un origen para la química moderna. Hacia un marco teórico unificador y el empleo de un lenguaje preciso sobre sustancias elementales y compuestos

A principios del siglo XVIII el “aire” era considerado como un medio en el que tenían lugar las reacciones químicas. Los químicos de la época no se habían preocupado ni por establecer su composición ni por pesarlo.^[45] La situación cambió a partir de la construcción por S. Hales (1677-1761) del primer aparato diseñado para el manejo de gases. Hales conminó a los químicos al estudio de estas sustancias. Cincuenta años después de su invención, este instrumento se convirtió en una pieza corriente del laboratorio de química. La capacidad de medir cantidades de gas y de establecer su composición introdujo un elemento esencial para el desarrollo del pensamiento químico.

Aunque puede resultar algo simplificador, podemos situar el inicio de la química moderna a mediados del siglo XVIII a partir de las investigaciones fundamentales llevadas a cabo, entre otros, por J. Black (1728-1799), H. Cavendish (1731-1810), J. Priestley (1733-1804) y Carl W. Scheele (1742-1786) sobre el comportamiento y caracterización de los gases –*química pneumática*–,^[46] y de la síntesis conceptual liderada por A. L. Lavoisier (1743-1794) (Figura 2).

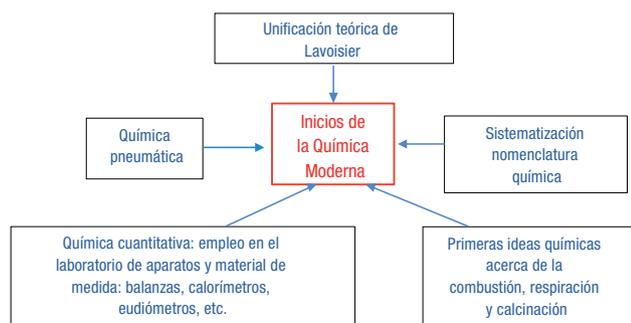


Figura 2. Principales factores que contribuyeron al nacimiento de la química moderna

Una teoría de la reacción química, denominada *teoría del flogisto*, que explicaba los procesos de combustión y calcinación, sirvió de marco de desarrollo de muchos procesos estudiados en los laboratorios de química en el siglo XVIII. Georg Ernest Stahl (1660-1734) supuso que todos los cuerpos inflamables contenían una sustancia (flogisto) que se desprendía y se perdía en la atmósfera en estos procesos químicos.

Por otro lado, el empleo sistemático de la balanza, de eudiómetros y gasómetros, así como otros instrumentos de medida,^[47] permitió que la química se empezara a consolidar como ciencia cuantitativa. Este carácter cuantitativo posibilitaba la reproducibilidad de los diferentes experimentos para su contrastación o refutación.

Antoine L. Lavoisier, destacado líder de la comunidad científica de la época, mandó construir y utilizó una gran cantidad de instrumentos y de sofisticados aparatos de laboratorio, mejorando la precisión de los ya existentes, con los que medir tanto las cantidades de reactivos como las de los productos formados, contribuyendo de forma decisiva a transformar la química en una ciencia cuantitativa.^[33] Además, desde el punto de vista teórico, reconoció que los procesos de combustión, calcinación y respiración, no eran sino manifestaciones de un mismo proceso (oxidación) en los que siempre participaba una misma sustancia, a la que denominó oxígeno. Esta nueva interpretación se enmarca en el contexto del proceso de construcción conceptual, metodológico y terminológico del descubrimiento de esta sustancia (oxígeno –Lavoisier–, aire desflogisticado –Priestley– y aire puro de fuego –Scheele–) realizado por sus tres protagonistas:^[48] el propio Lavoisier, defensor de la teoría del oxígeno, al establecer a esta sustancia como elemental y los otros dos, defensores de la teoría del flogisto (el sueco Scheele, que aisló el oxígeno, y el británico Priestley, que lo caracterizó).

Lavoisier, como miembro destacado de un grupo importante de investigadores, defendió su teoría de la reacción química en contraposición a la del flogisto. Este nuevo marco conceptual superaba una limitación importante de la teoría del flogisto al tener que admitir que en algunos procesos su masa era negativa.^[49] También cabe destacar que en su libro *Tratado elemental de química* (1789) incluyó el principio, ya conocido en la época, de conservación de la masa. El balance de las masas de los reactivos y de los productos le permitieron desarrollar sus importantes trabajos experimentales. Además, clasificó a las sustancias como simples y compuestas, lo que invitaba a los químicos a desarrollar no sólo métodos de estudio de su composición, sino que les sugería cómo concebir *a priori* posibles reacciones químicas.^[50] Todas estas nuevas ideas necesitaban la constitución de un nuevo lenguaje químico que fuese preciso, sistemático y normalizado.^[33-34] En este sentido, Lavoisier también participó en una propuesta de sistematización del lenguaje químico que consiguió mediante la publicación del *Méthode de nomenclature chimique* (1787) (publicado junto a Guyton de Morveau, Berthollet y Fourcroy), lo que supuso el abandono paulatino de la nomenclatura antigua (*azúcar de saturno, gas hediondo, sal de Inglaterra, vitriolo verde*, etc.). Ahora, la idea clave para nombrar los compuestos era la composición de cada sustancia y la proporción de sus constituyentes.

INICIOS DE LA TEORÍA ATÓMICA Y DESARROLLO DE LA QUÍMICA ORGÁNICA

Determinación de pesos atómicos y construcción de la primera tabla periódica

A principios del siglo XIX, John Dalton (1766-1844) formuló su teoría atómica que se materializó en su libro *A new system of chemical philosophy* (1808). Según este científico inglés, la materia estaba formada por átomos indestructibles e indivisibles, caracterizados por su masa. Esta característica cuantitativa propia, que podía determinarse de forma relativa, daba a los átomos una prueba de su existencia. Este modelo permitía explicar las leyes ponderales (Lavoisier, Proust, Richter y Dalton).^[51] La importancia del trabajo de Dalton para la química del siglo XIX fue que:

Entre otras cosas, cuantificó la idea que se tenía de los átomos, concretó el concepto de elemento químico, explicó la discontinuidad de las proporciones dentro de los compuestos según las leyes de las proporciones constantes y múltiples, y sugirió que la disposición de los átomos en un compuesto podía representarse esquemáticamente para indicar la posible estructura real¹.

Pero el modelo de Dalton estaba limitado para explicar la ley de los volúmenes de combinación de gases de J. L. Gay-Lussac (1778-1850). Esta limitación llevó a Dalton a cuestionar los valores experimentales obtenidos por Gay-Lussac. En cambio, el científico italiano Amedeo Avogadro (1776-1856) pudo explicar esta ley de los gases mediante la hipótesis de que volúmenes iguales de gases distintos, en las mismas condiciones de presión y de temperatura, contienen el mismo número de moléculas. Contrariamente a lo defendido por Dalton (para este químico los átomos de un mismo elemento se repelían entre sí), según Avogadro, las sustancias elementales podían estar formadas por moléculas de más de un mismo átomo. Por ejemplo, para el hidrógeno y el oxígeno postuló la existencia de moléculas diatómicas (H_2 y O_2 , respectivamente). Aceptar la hipótesis de Avogadro tuvo consecuencias importantes en el posterior desarrollo de la química en el aspecto clave de la determinación de los denominados pesos atómicos. Por ejemplo, la teoría de Dalton establecía para el agua la fórmula que correspondía a la relación más simple entre sus elementos constituyentes, HO, lo que implicaba que el peso atómico del oxígeno debía ser 8, mientras que si se admitía la hipótesis de Avogadro entonces la fórmula pasaba a ser H_2O , lo que significaba un peso atómico del oxígeno de 16. Un caso parecido se puede decir para el nitrógeno, ya que su peso atómico dependía de que el amoníaco fuese la combinación más simple de nitrógeno e hidrógeno, NH (como defendía Dalton), o NH_3 , según correspondía a la interpretación de Avogadro.

¹ Ref. 51, pág. 68.

El problema de la determinación de pesos atómicos fue un asunto que ocupó a buena parte de los químicos durante la primera mitad del siglo XIX. El químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) fue uno de los científicos más productivos en este campo. Sin embargo, sus valores de pesos atómicos de los metales alcalinos y de la plata fueron cuestionados por el químico francés Charles F. Gerhardt (1816-1856).^[35] Estas cantidades diferentes implicaban que los pesos moleculares de los ácidos que se derivaban del estudio cuantitativo de las reacciones de estas sustancias con los metales también debían corregirse. Estos nuevos valores conllevaban que las fórmulas de estas sustancias también se debían reconsiderar.

A mitad del siglo XIX los químicos todavía no se habían puesto de acuerdo sobre estos aspectos fundamentales. Este problema generó una gran confusión,^[52] ya que cada elemento todavía no tenía asignado su peso atómico de forma uniforme por la comunidad científica (por ejemplo, en química inorgánica el peso atómico de carbono era 6, pero en orgánica había consenso de que su valor debía ser el doble, 12) y para un mismo compuesto cada autor se sentía libre de emplear su propia fórmula. Tan importante resultó dilucidar este problema que los principales químicos de la época decidieron reunirse para debatir estos puntos de controversia en el *Primer Congreso de Química* celebrado en Karlsruhe en el año 1860.^[53-57] En este congreso se discutió, aunque sin llegar a ningún tipo de acuerdo, la comunicación presentada por el químico italiano S. Cannizzaro (1826-1910), que utilizaba la hipótesis de Avogadro, para establecer una escala unitaria de pesos atómicos. En su argumentación, que correspondía al trabajo *Sunto di un corso di filosofia chimica* publicado dos años antes, defendió el método empleado por Gerhardt. En concreto, admitiendo que el hidrógeno gas está compuesto por moléculas diatómicas, H_2 , comparó las densidades de los vapores de compuestos orgánicos con la densidad del hidrógeno, obteniendo valores de pesos moleculares de sustancias orgánicas. Este cálculo posibilitó discernir entre la fórmula empírica de cada compuesto orgánico y su fórmula molecular.

A este congreso asistió el científico ruso Dimitri Mendeléiev, quien usó los valores obtenidos por el método de Cannizzaro para construir la primera tabla periódica en 1869, en su intento de sistematizar la enseñanza de los distintos elementos. El creciente número de elementos químicos que se fueron descubriendo desde los primeros años del siglo XIX hacía necesaria su agrupación con fines didácticos. En 1869 Mendeléiev, culminando otras ordenaciones publicadas a partir de 1862 que también atendían a los pesos atómicos de los elementos como criterio de clasificación (Newlands, de Chancourtois, Odling, Hinrich y Meyer),^[58] diseñó su primera tabla periódica. Posteriormente publicó una segunda tabla en 1871 en la que aparecían los elementos agrupados en ocho columnas según el tipo de compuestos que formaban con el oxígeno y el hidrógeno. Además, dejó huecos, prediciendo las propiedades de elementos todavía no descubiertos (correspondientes a Sc,

Ga, Ge y Tc), asignándoles su peso atómico. Esta tarea predictiva la siguió desarrollando en sucesivos trabajos, aunque en varios casos con menor éxito,^[59-60] como intento de perfección de su ordenación. De todas formas, el carácter predictivo de la clasificación teórica realizada desempeñó un papel importante en el desarrollo de la tabla periódica.^[61] También cuestionaba algunos valores experimentales de elementos por no ajustarse a su ley periódica. Por ejemplo, la necesidad de cambiar el orden de los elementos Te y I, le llevó a no aceptar el calor experimental del Te, otorgándole un valor de 125 en su primera tabla de 1869, un valor de 128 (con el signo ?) en la segunda publicación y finalmente de 127, idéntico al del I, en la de 1904. Esta representación se mostró de capital importancia para la enseñanza de la química, ya que su desarrollo posterior no sólo ha permitido acomodar el descubrimiento de nuevos tipos de átomos, sino que se ha revelado como un elemento didáctico^[62] que permite explicar de forma resumida el comportamiento químico de los distintos elementos químicos, atendiendo a su posición en la tabla. En la actualidad, existen múltiples presentaciones,^[63] siendo su forma más extendida, que consta de 18 columnas, la que se ha convertido en el icono más reconocible de la química.^[62]

Química orgánica: síntesis y determinación de la estructura molecular

A principios del siglo XIX todavía no se había encontrado un método de laboratorio que permitiese obtener de forma sintética alguna de las sustancias halladas en animales y plantas. Esta aparente imposibilidad se explicó mediante la teoría de la *fuerza vital* que establecía que algún tipo de “fuerza”, exclusiva de los seres vivos, era la responsable de que sólo estos organismos fueran capaces de formar las sustancias presentes en los mismos.

En el año 1828 se dio el primer paso que puso en cuestión la teoría de la fuerza vital. F. Wöhler (1800-1882) obtuvo urea (una sustancia hasta entonces sólo hallada en la orina de los animales) a partir del calentamiento de otra sustancia de procedencia inorgánica, el cianato de amonio. Nuevos procesos de síntesis mostraron la posibilidad de obtención de sustancias orgánicas en el laboratorio. En 1845 Adolph W. Kolbe (1818-1884) sintetizó el ácido acético; y en la década de 1850 Marcellin Berthelot (1827-1907) realizó síntesis de diversos compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas. De esta forma, a mediados del siglo XIX parecía existir suficiente evidencia que auguraba la definitiva desaparición de la teoría vitalista. Pero nuevas ideas propiciaron que su vigencia se alargase unas décadas más.^[64-65] En el año 1860 Louis Pasteur (1822-1895) publicó un artículo sobre isomería en el que apoyaba la teoría de la fuerza vital. En concreto, al haber sido incapaz de obtener compuestos ópticamente activos en el laboratorio, asumió que sólo los seres vivos eran capaces de crearlos. Con ello, numerosos

neovitalistas encontraron en esta teoría un soporte para sus investigaciones sobre la estereoquímica de las moléculas orgánicas. Aunque a finales del siglo XIX ya existía un amplio consenso acerca del fin de la teoría vitalista, esta concepción siguió presente en algunos estudios. Por ejemplo, el químico británico Frances Japp (1848-1928) todavía defendió en 1898 en un artículo los postulados de Pasteur.

En 1784 Lavoisier ya había demostrado que los tres elementos más frecuentes en los compuestos orgánicos eran el carbono, el hidrógeno y el oxígeno. Estos métodos analíticos fueron mejorados posteriormente, de forma sucesiva, por Berzelius, Liebig y Dumas. A partir del consenso científico logrado con posterioridad al *Congreso de Karlsruhe*, se facilitó la elucidación de las fórmulas moleculares de las sustancias orgánicas al poder distinguir entre fórmulas empíricas y moleculares.

En la Figura 3 se encuentra esquematizado el desarrollo de la química en el período 1800-1875.

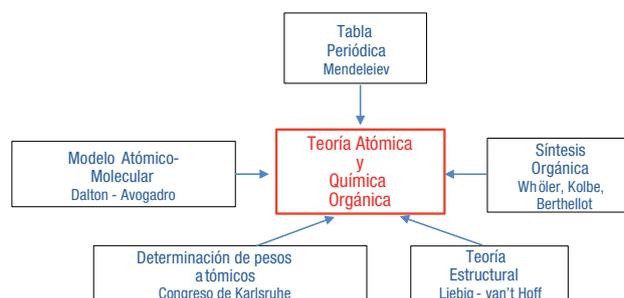


Figura 3. Consolidación de la química: teoría atómica y síntesis orgánica

A principios de la segunda mitad del siglo XIX, el desarrollo de la química orgánica centró la atención en el carbono. A. Kekulé (1829-1896), en su tratado de cuatro volúmenes *Lehrbuch der organischen Chemie* (1861-1867), dio a la ciencia de la química orgánica su definición moderna: un estudio de los compuestos del carbono. Este químico propuso que el átomo de carbono es tetravalente, añadiendo, además, que el átomo de carbono podía emplear una o más de sus cuatro valencias para unirse a otro(s) átomo(s) de carbono, sentando con ello las bases de la moderna teoría estructural, a la que también contribuyeron de forma importante Archivald S. Couper (1831-1892) y Aleksandr M. Bútlerov (1828-1886). De esta forma, quedaron establecidas las reglas generales de los enlaces de valencia, así como la representación gráfica de la molécula orgánica como un conjunto de átomos agrupados mediante uniones químicas. Por ejemplo, la primera representación cíclica del benceno la proporciónó Kekulé en el año 1865.

La segunda mitad del siglo XIX significó un impulso decisivo a la química orgánica por el desarrollo de los métodos de síntesis. En el año 1860 M. Berthelot (1827-1907) publicó su libro *Chimie organique fondée sur la synthèse*, iniciando un nuevo programa de investigación, de forma que el análisis químico dio el relevo a nuevos

métodos de obtención de sustancias orgánicas. Estas vías sintéticas si bien demostraron gran utilidad práctica para el desarrollo de la industria química, se debe destacar que se convirtieron en un elemento conceptual que permitió al químico pensar en nuevas formas de construcción de la arquitectura molecular. Con ello se posibilitó también obtener sintéticamente sustancias completamente nuevas. Podemos citar como ejemplos la reacción de condensación de Claisen, las reacciones de compuestos aromáticos realizadas por Friedel y Crafts, la obtención de alcoholes primarios y secundarios mediante el método propuesto por Saytzeff o los reactivos descubiertos por Grignard.^[53]

A partir de 1874, las fórmulas estructurales debieron considerar las tres dimensiones del espacio, debido a las aportaciones de J. H. van't Hoff (1852-1911) y Le Bel (1847-1930). Se resolvía de esta forma el problema de la isomería óptica mediante las dos representaciones especulares que proporcionaba una molécula con un carbono activo. Con todo ello quedó establecido que el objetivo básico en el estudio de las propiedades de las sustancias orgánicas implica conocer la secuencia de átomos de carbono, la fortaleza de sus distintos tipos de uniones (bien consigo mismo o con otros átomos) y la distribución espacial de todos los elementos que las forman. La obtención de sustancias orgánicas por vía sintética parte, necesariamente, de este triple conocimiento previo. Con ello, las fórmulas de compuestos orgánicos pasaron a ser objetos de entendimiento hipotético-deductivo que permitían a los químicos realizar predicciones teóricas.^[66]

Conviene finalmente realizar una breve reflexión sobre el avance del conocimiento científico, ya que el camino descrito hasta aquí no fue en modo alguno sencillo ni lineal. Ya hemos comentado algunos de estos problemas al tratar la teoría vitalista o la idea daltoniana que impedía que un mismo tipo átomo pudiera combinarse consigo mismo (que quedaba cuestionada por la teoría estructural en la que el carbono se combinaba consigo mismo). Un nuevo ejemplo de disputa de ideas y de controversia científica lo podemos encontrar en el contexto descrito anteriormente.^[67] La publicación de van't Hoff del año 1875, titulada *La Chimie dans l'Espace*, recibió una considerable crítica por parte de Kolbe, quien como editor de la revista *Journal fur praktische Chemie*, se pronunció en los siguientes términos en el número de mayo de 1877:^[68]

Un tal J. H. van't Hoff de la Escuela Veterinaria de Utrech, no encuentra, según parece, ningún gusto por la investigación química exacta. Ha juzgado más conveniente montar a lomos de Pegaso (que obviamente ha tomado prestado de la Escuela Veterinaria) y proclamar en su obra *La Chimie dans l'Espace* cómo, durante su arriesgado vuelo hacia la cima del Parnaso químico, se le aparecieron los átomos agrupados por todo el espacio del universo.

DIÁLOGOS DE LA QUÍMICA CON LA FÍSICA: QUÍMICA FÍSICA Y QUÍMICA CUÁNTICA

¿Cuál es la estructura de la materia? ¿Qué fuerzas actúan entre los componentes de las sustancias? ¿Por qué se producen las reacciones químicas? ¿Cómo ocurren las reacciones químicas? son problemas teóricos que los químicos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX intentaron resolver mediante un diálogo con campos de estudio de la física que hasta entonces se habían desarrollado de forma autónoma. Este nuevo pensamiento químico propició el nacimiento de dos nuevas áreas de conocimiento: la Química Física y la Química Cuántica (Figura 4).

Desarrollo de la Termodinámica en Química: nacimiento de la Química Física

El estudio de las reacciones químicas reversibles e incompletas (equilibrio químico) iniciado por el químico francés C. L. Berthollet (1748-1822) a principios del siglo XIX sólo tuvo especial interés a partir de los trabajos realizados por Friedrich W. Ostwald (1853-1932) a finales de ese siglo. Este científico alemán desarrolló la idea de constante de equilibrio (como expresión matemática entre las concentraciones de reactivos y productos), introducida por vez primera en 1864 por los científicos noruegos Guldberg y Waage.^[69] En este trabajo y en otro posterior de 1867^[70] todavía estaba presente el concepto de fuerza en su explicación teórica de los procesos de equilibrio químico, lo que limitó su desarrollo posterior. Sin embargo, el empleo de las matemáticas en su discusión sí que representó una cierta novedad en el campo de la química. Estos primeros trabajos pasaron un tanto desapercibidos por la comunidad científica^[71] hasta que nuevos tratamientos matemáticos y nuevas ideas fueron empleadas. Jacobus H. van't Hoff (1852-1911) retomó la idea de constante de equilibrio, destacando su publicación *Études de dynamique chimique* (1884).^[72] Este científico proporcionó la primera explicación teórica de los procesos de equilibrio químico mediante la utilización sistemática de un lenguaje algebraico y de ecuaciones diferenciales, empleando para ello dos aproximaciones: una termodinámica y la otra cinética.^[25] Su libro fue considerado por Laidler^[73] como el primer libro de cinética

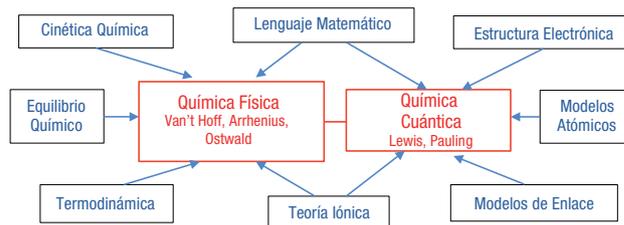


Figura 4. Diálogos de la química con la física

química, así como uno de los más originales de esta disciplina, asentando en el mismo sus principios fundamentales.^[74]

Hasta el último cuarto del siglo XIX, la física y la química se habían desarrollado por caminos paralelos. Un primer punto de encuentro entre ambas disciplinas fue el inicio del empleo del lenguaje matemático por parte de la química, lo que le proporcionó una nueva herramienta tanto conceptual como metodológica. El acercamiento de la física a la química se produjo mediante la contribución especial de van't Hoff, quien a diferencia de G. Gibbs (cuyo formalismo matemático era muy abstracto), empleó un lenguaje matemático sencillo para que los químicos de la época fueran capaces de entender las ideas de la termodinámica, de forma que pudieran aplicarlas al estudio de las reacciones químicas. Por ejemplo, van't Hoff se basó en los dos principios de la termodinámica para una de sus aproximaciones teóricas del equilibrio químico (la otra empleaba consideraciones de cinética química), pero sin hacer mención al concepto de entropía, ya que el mismo se presentaba a los químicos de este tiempo como de difícil comprensión y de escasa utilidad.^[75]

La aproximación física a los estudios de la química propició que surgiera un nuevo campo de estudio de la química denominado *Química Física*. Ostwald, van't Hoff y Svante A. Arrhenius (1859-1927) fundaron en 1887 la revista científica *Zeitschrift für Physikalische Chemie* como medio de expresión de este nuevo ámbito de conocimiento. Buena prueba de la importancia^[45] de este nuevo campo de investigación es que el primer premio Nobel de Química (1901) recayó en van't Hoff; posteriormente, también lo recibieron Svante Arrhenius (1859-1927) en 1903 y Wilhelm Ostwald (1853-1932) en 1909, si bien habría que tener en cuenta la influencia que tuvo el propio Arrhenius sobre el comité encargado de otorgar estos premios.^[76] Otros destacados químico-físicos fueron Fritz Haber (1868-1934), quien recibió el premio Nobel de 1918 por establecer las bases teóricas de la síntesis del amoníaco (materia prima importante para la fabricación de fertilizantes, colorantes, explosivos y medicamentos) y Walther Nernst (1864-1941), que lo recibió en 1920 por sus contribuciones teóricas termodinámicas.

Carácter eléctrico de la materia: composición y estructura Química Cuántica

Antecedentes: procesos electroquímicos

A pesar de los éxitos de la teoría atómica, la propia existencia de los átomos sólo fue unánimemente admitida por la comunidad científica a finales del siglo XIX,^[77] casi cien años después de que fuera formulada por Dalton. Entre los destacados anti atomistas podemos mencionar al químico orgánico Justus von Liebig (1803-1873) y al químico-físico Ostwald, quien aceptó su existencia a principios del siglo XX, después de una frontal oposición.

Paradójicamente, el término átomo (etimológicamente, sin partes) finalmente se aceptó cuando estas partículas dejaron de ser indivisibles. En este sentido, el descubrimiento del electrón a finales del siglo XIX como partícula universal de todos los átomos introdujo nuevas explicaciones teóricas acerca de la formación de uniones químicas y de las propiedades que se derivan de las mismas.

La dimensión eléctrica de la química nos permite encontrar un segundo tipo de conexión con la física. A partir de 1830, Michael Faraday (1791-1867) desarrolló y amplió los estudios de electroquímica^[54] iniciados con la pila de Alessandro Volta (1745-1827) por Humphrey Davy (1778-1829) en el año 1800 en la *Royal Institution* de Londres,^[78] lo que le permitió descubrir seis elementos químicos, dos alcalinos (sodio y potasio) y cuatro alcalinotérreos (magnesio, calcio, estroncio y bario). Faraday estudió de forma cuantitativa la relación existente entre la intensidad de corriente que circula por una celda electrolítica y la cantidad de materia que se forma en cada uno de los electrodos, acuñando en estos estudios nuevos términos relacionados con estos fenómenos: *ánodo*, *cátodo*, *ion*, *electrodo*, *electrólito*, *electrólisis*, etc.^[52] Por su parte, el término *ion* fue también empleado por Arrhenius para explicar la disolución de una sal en agua, señalando que este proceso supone la formación de iones, por lo que según este científico no era necesario que para su formación existiera una corriente eléctrica, discrepando de esta forma con Faraday, quien pensaba que los iones sólo se creaban cuando una corriente eléctrica empezaba a circular en su seno.

Estructura atómica y enlace químico

Particularmente, la existencia del electrón proporcionó un significado y una comprensión precisa tanto de los procesos de disolución de una sal en agua (formación de cationes y aniones) como del comportamiento de los mismos en el seno de un campo eléctrico (movimiento de cationes y de aniones por existencia de una diferencia de potencial eléctrico) y se reveló como un elemento esencial en la formación de uniones químicas, lo que posibilitó establecer distintos modelos de enlace químico.

La controversia surgida acerca de la naturaleza de los rayos catódicos (ondas, según Hertz, entre otros) o partículas, la resolvió finalmente Joseph J. Thomson (1856-1940), diseñando e interpretando una serie de experimentos en los que los rayos catódicos se desviaban por la acción de campos magnéticos y eléctricos, lo que probaba su carácter de partículas cargadas negativamente; la constancia de la relación carga/masa (q/m) permitió establecer que esas partículas eran comunes a todos los átomos. Esta singularidad marcó en el inicio del siglo XX un proceso de elucidación de la estructura atómica (que implicaba comprender la constitución y organización de los átomos, considerando siempre al electrón como elemento esencial) con nuevas propuestas de modelos atómicos, no exentas de controversias,^[79] que intentaban

superar las limitaciones de los precedentes (modelos atómicos del propio Thomson, de Ernest Rutherford [1871-1937] y Niels Bohr [1885-1962]^[80-81]), hasta llegar al modelo cuántico.^[82-83]

El concepto de estructura electrónica se empezó a desarrollar principalmente a principios del siglo xx con las aportaciones de J. J. Thomson,^[84] lo que permitió dar una nueva interpretación a la tabla periódica. Esta visión encontró su base en las investigaciones realizadas por Henry Moseley (1887-1915) con rayos X que demostraban que la verdadera periodicidad de la tabla periódica se debía al número atómico, Z (número de protones que cada átomo contiene en su núcleo). Asociado al concepto estructura electrónica de los átomos se desarrollaron tanto el concepto de valencia,^[82] como los modelos de enlace iónico y covalente para explicar la estequiometría y estabilidad de las distintas sustancias (tanto simples como compuestas) por las interacciones que se establecían entre sus átomos constituyentes.^[84] Destacaron inicialmente en este aspecto las aportaciones teóricas del alemán Walther L. J. Kössel (1888-1956) y las del estadounidense de Gilbert N. Lewis (1875-1946),^[85] resumidas en su libro *Valence and the Structure of Atoms and Molecules* (1923), continuadas por Irwin Langmuir (1881-1957).^[86] Particularmente, el modelo de enlace por compartición de pares de electrones introducido en 1916 por Lewis,^[87] a partir de un átomo cúbico tridimensional con capacidad de rodearse de ocho electrones, representó un concepto precuántico clave en el desarrollo del pensamiento químico. Por ejemplo, explicaba la ordenación tetraédrica del carbono en los compuestos orgánicos y abría una ventana para establecer los mecanismos de reacción en química orgánica,^[88] aunque su aceptación como programa de investigación únicamente tuvo repercusión relevante en el ámbito británico.^[89] De esta forma, parecía que la química necesitaba un átomo estático para explicar la estructura de las moléculas y los mecanismos de reacción, mientras que la física requería un átomo dinámico para explicar sus propiedades espectroscópicas. Por ello, Lewis trató de reconciliar ambos modelos señalando que cada órbita electrónica, según el modelo de Bohr, tenía cierta orientación fija que coincidía con las posiciones electrónicas en su átomo cúbico. Nuevas discusiones mantuvieron la controversia de los dos tipos de átomo durante unos años.^[71,82,89]

Si bien el átomo cúbico de Lewis fue rápidamente superado, la idea de enlace por pares de electrones siguió presente en el desarrollo posterior del concepto de enlace químico. El químico estadounidense Linus Pauling (1901-1994) encontró que la ecuación de Schrödinger era muy complicada en su aplicación al caso de las moléculas. Después de escribir una serie de artículos sobre la naturaleza del enlace químico, en donde simplificaba el tratamiento cuántico de los distintos orbitales, con la publicación de su libro *The Nature of Chemical Bond* (1939)^[90] trató de acercar a los químicos el complejo lenguaje matemático asociado a la mecánica cuántica. Particularmente, su concepto

de resonancia fue bien integrado en la cultura de los químicos orgánicos.^[91] El contenido y la estructura de este libro produjo un cambio en la enseñanza de la química.^[49] Su aproximación cuántica utilizaba el modelo de enlace por pares de electrones introducido por Lewis para explicar la existencia de moléculas. De esta forma, después de admitirse la hipótesis de Avogadro, defendida por Cannizzaro en el congreso de Karlsruhe, finalmente se daba explicación a la formación de moléculas, cuya existencia había estado controvertida por estar formadas por la combinación de dos o más átomos de un mismo elemento (H_2 , O_2 , O_3 , etc.). Por otro lado, esta explicación también proporcionaba una nueva dimensión a la teoría de afinidad química. Además, su concepto de hibridación de orbitales explicaba la disposición espacial de los átomos de carbono en sus compuestos. En cualquier caso, como aportación más destacada, se puede afirmar que su tratamiento de los enlaces químicos permitió unificar diferentes campos de la química al extender e integrar su aplicación a diferentes ramas como la geoquímica, la metalurgia, la química inorgánica, la química orgánica o la bioquímica.^[71] Este científico recibió el premio Nobel de Química (1954) y el de la Paz (1962), habiendo tenido la posibilidad de un tercer premio Nobel por su participación en la carrera por la elucidación de la estructura del ADN, a lo que se adelantaron Watson y Crick. Sus problemas derivados de su activismo contra pruebas nucleares (se le retiró el pasaporte en 1952) le impidieron asistir a un congreso sobre la estructura de las proteínas, imposibilitándole tener acceso a las fotos de rayos X del ADN realizadas por Rosalind Franklin.^[92] Su trabajo en el desarrollo de la química en su doble faceta de investigador y educador ha hecho que se haya considerado por varios científicos como el químico más importante del siglo xx.^[93-94]

CONCLUSIONES

Las reflexiones y consideraciones históricas realizadas en este estudio son susceptibles de ser incluidas tanto en los cursos de formación del profesorado de química como en los niveles de enseñanza preuniversitarios de esta materia. Estas presentaciones y esquemas organizativos pueden servir de ejemplos para tratar en clase, entre otros aspectos históricos y epistemológicos, los siguientes:

- a) Cómo se han ido creando los distintos conceptos y cómo han evolucionado (manifestándose este aspecto a través del lenguaje). Ejemplos pueden ser las ideas de reacción química relacionadas con la teoría del flogisto/oxígeno y las asociadas con el concepto de afinidad química (desde las primeras ideas de reacciones de desplazamiento en un solo sentido a las de equilibrio químico que implicaban procesos reversibles e incompletos), así como las distintas visiones del concepto de átomo.

- b) En relación con el apartado anterior, el cambio experimentado en los supuestos ontológicos que fundamentan unos principios teóricos, en donde de nuevo encontraríamos los ejemplos mencionados de conceptualización de las reacciones químicas.
- c) Como continuación de los dos apartados anteriores, el papel jugado por los modelos en su intento de comprender, explicar y predecir las propiedades de la materia, considerando su rango de aplicabilidad y sus limitaciones, lo que ha permitido representar los átomos, las sustancias químicas y sus reacciones. A los ejemplos anteriores podemos añadir la representación de sustancias orgánicas, así como las correspondientes a los distintos modelos de enlace químico.
- d) El carácter predictivo de los distintos modelos teóricos, como fue la predicción tanto de la existencia del neutrón por parte de Rutherford como de nuevos elementos químicos por parte de Mendeléiev.
- e) El carácter colectivo que supone el avance de los conocimientos científicos, los debates y las controversias producidas. Se puede mencionar en este aspecto la paulatina superación de la teoría de la fuerza vital mediante diferentes síntesis de compuestos orgánicos, lo que no impidió ciertos retrocesos o resistencias, así como la controversia sobre las fórmulas de compuestos como el agua o el amoníaco, lo que determinaba distintos valores de los pesos atómicos del oxígeno y del nitrógeno, entre otros elementos. En el campo de la estructura atómica, otros ejemplos de controversias fueron la interpretación de la naturaleza de los rayos catódicos (ondas, según Hertz y partículas, según Thomson) o la diferente interpretación otorgada por Thomson y Rutherford a las desviaciones y los “rebotes” de las partículas alfa en el experimento de la lámina de oro de Geiger y Marsden. En este campo también se puede citar la existencia simultánea de un átomo (químico) estático (Lewis-Langmuir) y un átomo (físico) dinámico (Bohr).
- f) La necesidad de comunicación y de compartir ideas (el primer congreso de química celebrado en Karlsruhe es un importante ejemplo histórico), así como los diálogos que se establecieron entre disciplinas en principio separadas, como la física y la química, lo que dio lugar al nacimiento de una nueva rama de la química a finales del siglo XIX.
- g) El papel que supuso en el desarrollo del conocimiento químico el empleo de nuevos aparatos y de técnicas analíticas. En este aspecto cabría mencionar el desarrollo de la química neumática, así como las técnicas de la electrólisis y de la espectroscopía, que permitieron el descubrimiento de un número suficiente de elementos para que Mendeléiev pudiera configurar su tabla periódica.
- h) La importancia de las clasificaciones como elementos de investigación, comprensión y de generación de conocimiento químico, así como un instrumento muy útil para su enseñanza. Ejemplos representativos son las tablas de afinidad química, la tabla de sustancias elementales de Lavoisier y la tabla periódica de Mendeléiev.
- i) La diversidad de métodos y formas de conocimiento en el avance de la química. Como se ha mostrado al principio de este estudio, el conocimiento empírico de las sustancias que originó el nacimiento de la química moderna se fundamentó a partir de campos sin conexión aparente como fueron la alquimia, la minería y la medicina y la farmacia. Además, se puede también añadir que si bien la química es una ciencia de laboratorio, el empleo del lenguaje matemático se manifestó como un elemento esencial, tanto ontológico como metodológico, a la hora de desarrollar la termodinámica química, el equilibrio químico, la cinética química y la química cuántica.
- j) La necesidad de institucionalizar la química, lo que supuso la publicación de los primeros manuales para su enseñanza, o la creación de cátedras de química y de instituciones como el *Jardin du Roi* o la *Royal Institution*, así como la creación de revistas especializadas como medio de expresión y debate, como fue el *Zeitschrift für Physikalische Chemie*.
- Finalmente, se deben mencionar otros aspectos no tratados en este estudio que también tienen importancia histórica y didáctica. En concreto, los referidos a la actuación de los científicos en los conflictos bélicos^[76] y el papel jugado por las mujeres en la ciencia.^[95-96]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Gooday, J. M. Lynch, K. G. Wilson, C. K. Barsky. *Isis* **2008** 99, 322-330.
- [2] M. R. Matthews. *Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science. 20th Anniversary Revised and Expanded Edition*. Routledge, Oxford. 2014.
- [3] M. Quintanilla, S. Daza, H. G. Cabrera. *Historia y Filosofía de la Ciencia. Aportes para una “nueva aula de ciencias”, promotora de ciudadanía y valores*. Santiago de Chile. 2014.
- [4] A. J. Ihde. *J. Chem. Educ.* **1971** 48, 686-687.
- [5] S. G. Brush. *J. Coll. Sci. Teach.* **1978** 7(5), 288-291.
- [6] J. H. Wandersee, P. B. Griffard. En *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust, J. H. van Driel, eds.; Kluwer, Dordrecht, 2002, 29-46.
- [7] K. De Berg. En *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*; M. R. Matthews (ed.), Springer, Dordrecht, 2014, 317-341.
- [8] M. Niaz. *Chemistry Education and Contributions from History and Philosophy of Science*. Springer, Dordrecht. 2016.
- [9] M. Monk, J. Osborne. *Sci. Educ.* **1997** 81(4), 405-424.
- [10] K. A. Olsson, M. M. Balgopal, N. E. Levinger. *J. Chem. Educ.* **2015** 92(11), 1773-1776.

- [11] H. Tümay. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2016** *17*, 229-245.
- [12] F. Abd-El-Khalick, M. Waters, A. Le. *J. Res. Sci. Teach.* **2008** *45*, 835-855.
- [13] M. Niaz, A. Maza. *Nature of Science in General Chemistry Textbooks*. Springer, Dordrecht. 2011.
- [14] L. Moreno, M. A. Calvo *Rev. Eureka Enseñ. Divulg. Cien.* **2019** *16*, 1101.
- [15] J. L. Doménech, F. Savall, J. Martínez-Torregrosa. *Ens. Cien.* **2013** *31*(1), 29-43.
- [16] J. Quílez. *Sci. & Educ.* **2021**.
- [17] S. Erduran, A. Aduriz-Bravo & R. Mamlok-Naaman. *Sci. & Educ.* **2007** *16*, 975-989.
- [18] H. A. Wang, D. D. Marsh. *Sci. & Educ.* **2002** *11*, 169-189.
- [19] W. B. Jensen. *J. Chem. Educ.* **1998** *75*(8), 961-969.
- [20] J. A. Chamizo, En: Jari, L., Juuti, K., Lampiselkä, J., Uitto, A., Hahl, K. (eds.) *Science Education Research: Engaging Learners for a Sustainable Future*. ESERA, Helsinki. 2016.
- [21] J. Quílez. *Educ. Quím.* **2002** *13*(1), 45-54.
- [22] J. Quílez. *Chem. Educ. Res. Prac.* **2004** *5*(1), 69-87.
- [23] J. Quílez. *Sci. & Educ.* **2009** *18*(9), 1203-1251.
- [24] J. Quílez. *Found. Chem.* **2019** *21*, 221-252.
- [25] J. Quílez. *Found. Chem.* **2021** *23*, 85-103.
- [26] N. Kortam, M. Hugerat, R. Mamlok-Naaman. *Chemistry Teacher International.* **2020**. <https://doi.org/10.1515/cti-2019-0016>
- [27] J. Quílez. *Ed. Quím.* **2005** *16*(3), 114-134.
- [28] J. Quílez, S. Lorente, F. Sendra, E. Enciso. *Afnidad. Química*. ECIR, Valencia. 2009.
- [29] J. Quílez. *Ed. Quím.* **2002** *13*(2), 101-112.
- [30] A. J. Ihde. *J. Chem. Educ.* **1956** *33*(3), 107-110.
- [31] B. T. Moran. *Distilling knowledge. Alchemy, Chemistry, and the Scientific Revolution*. Harvard University Press, Cambridge. 2005.
- [32] R. P. Multhauf. *The Origins of Chemistry*. Oldbourne Book Company, Londres. 1966.
- [33] B. Bensaude-Vincent, I. Stengers. *Historia de la Química*. Addison-Wesley, Madrid. 1997.
- [34] M. P. Crosland. *Estudios históricos en el lenguaje de la química*. UNAM, México. 1988.
- [35] J. R. Partington. *A Short History of Chemistry*. Dover, Nueva York. 1989.
- [36] F. L. Holmes, *Eighteenth-Century Chemistry as an Investigative Enterprise*. University of California Press, Berkeley. 1989.
- [37] O. Hannaway. *The Chemist and the Word; the Didactic Origins of Chemistry*. John Hopkins University Press, Londres. 1975.
- [38] U. Klein. *Ambix* **1995** *42*, 79-100.
- [39] I. Newton. *Optics or a Treatise of the Reflections, Refractions. Inflexions and Colours of Light*. Dover, Nueva York. 1979.
- [40] E. F. Geoffroy. *Memoires de l'Académie Royale des Sciences* **1718** 202-212.
- [41] M. G. Kim. *Affinity, that Elusive Dream. A Genealogy of the Chemical Revolution*. MIT Press, Cambridge. 2003.
- [42] P. Grapí. *La representación de lo invisible. Tabla de los diferentes rapports observados en la química entre diferentes sustancias*. Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante. 2012.
- [43] P. Lemay, R. E. Oesper. *J. Chem. Educ.* **1946** *23*, 158-165; 230-236.
- [44] P. Grapí, M. Izquierdo. *Ambix* **1997**, *44*, 113-130.
- [45] T. H. Levere. *Transforming Matter. A History of Chemistry from Alchemy to the Buckyball*. Johns Hopkins, Baltimore. 2001.
- [46] F. L. Holmes. *Isis* **2000** *91*, 735-753.
- [47] P. Grapí, *Inspiring air. A history of air-related science*. Vernon Press, Wilmington. 2019.
- [48] T. Sukopp. En B. Schweitzer, T. Sukopp (eds.) *Knowledge Communities in Europe. Exchange, Integration and Its Limits*. Springer, Wiesbaden. 2018, 15-47.
- [49] W. H. Brock. *Historia de la Química*. Alianza, Madrid. 1998.
- [50] M. Beretta. *The Enlightenment of Matter. The Definition of Chemistry from Agricola to Lavoisier*. Science History Publications, Canton. 1993.
- [51] I. Pellón. *El Atomismo en Química. Un Nuevo Sistema de Filosofía Química*. Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante. 2012.
- [52] A. J. Ihde, *The Development of Modern Chemistry*. Harper and Row, Londres. 1964.
- [53] J. Hudson. *The History of Chemistry*. Chapman and Hall, Nueva York. 1992.
- [54] R. G. Ehl, A. J. Ihde. *J. Chem. Educ.* **1954** *31*(5), 226-232.
- [55] R. Cid. *Rev. Eureka Enseñ. Divulg. Cien.* **2009** *6*(3), 396-407.
- [56] P. Román. *An. Quím.* **2010**, *106*(3), 231-239.
- [57] R. Gallego, A. P. Gallego, R. Pérez. *Educ. Quím.* **2012** *23*, 280-289.
- [58] E. R. Scerri. *The Periodic Table. Its Story and Significance*. Oxford University Press, Oxford. 2007.
- [59] G. Lente. *ChemTexts*, **2019** *5*, 17.
- [60] P. J. Stewart. *Found. Chem.* **2019** *21*, 3-9.
- [61] M. Niaz, M. A. Rodríguez, A. Brito. *Studies in History and Philosophy of Science* **2004** *35*, 271-282.
- [62] A. Lykknes, B. Van Tiggelen. *Centaurus* **2019** *61*, 287-298.
- [63] J. Emsley. *Substantia. An International Journal of the History of Chemistry* **2019** *3*(2) Suppl. 5: 15-27.
- [64] P. J. Ramberg. *Ambix* **2000** *47*, 170-195.
- [65] P. J. Ramberg. En R. L. Numbers, K. Kampourakis (Eds.), *Newton's Apple and Other Myths about Science* (pp. 59-66). Cambridge, Harvard University Press. 2015.
- [66] P. Cintas. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007** *46*, 4016 - 4024.
- [67] S. Esteban, F. Peral. *An. Quím.* **2007** *103*(4), 59-69.
- [68] H. Kolbe. *Journal für praktische Chemie*, **1877** *15*, 473.
- [69] P. Waage, C. M. Guldberg. (Traducido por H. I. Abrash) *J. Chem. Educ.* **1986** *63*, 1044-1047.
- [70] C. M. Guldberg, P. Waage. *Études sur les Affinités Chimiques*. Christiania University, Oslo. 1867.
- [71] J. W. Servos. *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling*. Princeton University Press, Princeton. 1990.
- [72] J. H. van't Hoff. *Études de Dynamique Chimique*. Frederik Muller, Amsterdam. 1884.
- [73] K. J. Laidler. En: W. J. Hornix, S. H. W. M. Mannaerts (eds.), *Van't Hoff and the Emergence of Chemical Thermodynamics*. DUP University, Delft. 2001, 243-255.
- [74] K. J. Laidler. *Arch. Hist. Exact Sci.* **1985** *32*, 43-75.
- [75] H. Kragh, E. J. Weininger. *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.* **1996** *27*, 91-130.
- [76] P. Coffey. *Cathedrals of Science. The Personalities and Rivalries that Made Modern Chemistry*. Oxford University Press, Oxford. 2008.
- [77] C. Bigg. *Stud. Hist. Phil. Sci.* **2008** *39*, 312-322.
- [78] K. D. C. Vernon. *J. Chem. Educ.* **1957** *34*(12), 607-610.
- [79] M. Niaz. *Sci. Educ.* **1998** *82*, 527-552.
- [80] J. L. Heilbron. *Am. J. Phys.* **1981** *49*(3), 223-231.

- [81] B. L. Haendler. *J. Chem. Educ.* **1982** 59(5), 372-376.
- [82] K. J. Laidler. *The World of Physical Chemistry*. Oxford University Press, Oxford. 1995.
- [83] A. Garritz. *Educ. Quím.* **2014** 25, 170-175.
- [84] W. B. Jensen. *J. Chem. Educ.* **1984** 61(3), 191-200.
- [85] R. E. Kohler. *Historical Studies in the Physical Sciences* **1971** 3, 343-376.
- [86] R. E. Kohler. *Historical Studies in the Physical Sciences* **1974** 4, 39-87.
- [87] G. N. Lewis. *J. Am. Chem. Soc.* **1916** 38, 742-785.
- [88] S. Shaik. *J. Comput. Chem.* **2007** 28, 51-61.
- [89] R. E. Kohler. *Historical Studies in the Physical Sciences* **1975** 6, 431-468.
- [90] L. Pauling. *The Nature of Chemical Bond*. Ithaca, Cornell University Press. 1939.
- [91] K. Gavroglu, A. Simões. *HYLE - International Journal for Philosophy of Chemistry* **2012** 18 (1), 45-68.
- [92] G. B. Kauffman, L. M. Kauffman. *J. Chem. Educ.* **1996** 73(1), 29-32.
- [93] J. A. Chamizo. *Ed. Quím.* **1995** 6(1), 64-70.
- [94] P. M. Zorky. *Crystallogr. Rep.* **2001** 46 (6), 887-890.
- [95] C. T. Eagle, J. Sloan. *The Chemical Educator* **1998** 3(5), 1-18.
- [96] X. Pintos, J. R. Bermejo. *Boletín das Ciencias* **2008** 21(66), 81-83.

¿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
10 EUR



Real Sociedad Española de Química

www.rseq.org

Mujeres y laboratorios

Su invisibilización en la construcción de la tabla periódica y el ejemplo de la química del flúor en España

Ignacio Suay-Matallana

Resumen: El estudio histórico de la tabla periódica supone una magnífica oportunidad para mostrar el importante papel de las mujeres en la química, a pesar de que, frecuentemente, no ha sido reconocido. En algunos casos su trabajo resultó fundamental para el diseño de los montajes experimentales, el perfeccionamiento de los ensayos analíticos, la recogida de muestras o la preparación de informes. En el caso español, diferentes mujeres contribuyeron de forma decisiva a la química del flúor en el primer tercio del siglo xx. Su estudio contribuye a visibilizar sus trabajos, sus nombres y su papel como expertas.

Palabras clave: mujeres, tabla periódica, invisibilización, flúor, análisis químico.

Abstract: The historical study of the periodic table of the elements provides an excellent opportunity to show the role of women in chemistry, despite the fact that it was frequently not recognized. In some cases, their work was essential for the design of experimental setups, the improvement of analytical tests, the collection of samples or the preparation of reports. In the Spanish case, different women contributed decisively to fluorine chemistry in the first third of the 20th century. Their study contributes to visibilize their work, their names and their role as experts.

Keywords: women, periodic table, invisibilization, fluorine, chemical analysis.

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre el conocimiento experto han mostrado cómo las personas que se dedicaban a la ciencia realizaban una gran variedad de actividades públicas, privadas, académicas y profesionales que contribuían a fundamentar su autoridad científica y a obtener reconocimiento como personas expertas en la esfera pública.^[1] Por ello, existe una doble dependencia entre ser visualizado como experto en el ámbito público y ser considerado como una autoridad científica en una determinada disciplina.^[2] Esta cuestión resulta funda-

mental en el caso de las contribuciones científicas de las mujeres, que han sido mucho más numerosas y relevantes de lo que suele admitirse.^[3] Frecuentemente las mujeres científicas han sido invisibilizadas, sus conocimientos han sido apropiados y han recibido menos reconocimientos que sus colegas masculinos.^[4]

En la actualidad existen algunas iniciativas que han creado directorios de mujeres expertas en una gran variedad de disciplinas, incluida la química, con el objetivo de poder ser contactadas por medios de comunicación, gestores públicos u otros científicos.^[5] Estos esfuerzos facilitan que las diferentes especialistas logren mayor visibilidad pública y que su presencia se incremente en entrevistas o programas de comunicación, conferencias plenarias en congresos científicos o en comités gubernamentales. Como han mostrado algunas propuestas didácticas, el análisis histórico del papel de las mujeres en la química tiene un especial valor en las aulas de ciencia. Gracias a éstos se visibilizan diferentes contribuciones femeninas a la ciencia en diferentes períodos históricos, al tiempo que se contribuye a reforzar las vocaciones científicas de las mujeres en el presente.^[6]



I. Suay-Matallana

Instituto Interuniversitario López Piñero-UMH
Dpto. Salud Pública, Historia de la Ciencia
y Ginecología
Avda. Ramón y Cajal s/n | 03550 San Juan de Alicante
C-e: isuay@umh.es

Recibido: 08/06/2020. Aceptado: 20/04/2021.

LA INVISIBILIZACIÓN DE LAS MUJERES EN LA QUÍMICA

Uno de los ejemplos históricos, en el ámbito de la química, que permite apreciar con más nitidez la invisibilización de las mujeres científicas es el proceso de construcción de la tabla periódica de los elementos (Figura 1). El simposio internacional “Setting their table” organizado en febrero de 2019 por la RSEQ junto con la IUPAC y la Working Party on History of Chemistry (EuChemS), también permitió analizar el papel de las mujeres en la construcción de la tabla periódica.^[7] Los casos del curio y el meitnerio son ejemplos que reconocen la activa contribución de las mujeres en la química.^[8] Sin embargo, reflejan también como fueron muy pocas las que obtuvieron un reconocimiento por su trabajo y refleja las dificultades, discriminaciones e invisibilizaciones que han afectado a las mujeres a lo largo de la historia de la ciencia.

Tradicionalmente, en diferentes trabajos se ha privilegiado el papel de la tabla periódica en la investigación, aunque sus orígenes están vinculados a la docencia.^[9] Su historia también está asociada con la búsqueda (supuestamente heroica) de quienes descubrieron los diferentes elementos. Las discusiones sobre el descubrimiento de cada elemento están vinculadas a grandes disputas de prioridad entre equipos de investigación o países diferentes que reivindican su protagonismo. La idea del descubrimiento también privilegia a aquellas (escasas) personas que han conseguido materializar su trabajo para dar nombre a un elemento químico, mientras que ha ocultado a un número mucho mayor de personas dedicadas a hacerlo posible. Estos trabajos implicaban realizar tediosos montajes experimentales, perfeccionar los ensayos para pesar o preparar las muestras, innovar en técnicas analíticas, recoger y analizar los resultados obtenidos o redactar los informes que hacían posible la publicación de los trabajos finales.^[10]

Proyectos recientes como el titulado *Women in their Element* han buscado superar estos vacíos historiográficos y recuperar las contribuciones científicas de diferentes científicas no sólo con el objetivo de visibilizar sus contribuciones a la tabla periódica sino también de estudiar las razones por las que han quedado ocultas a lo largo del tiempo.^[11] Diferentes trabajos de historia de la química –y de otras disciplinas– han mostrado como existen muchos casos de desigualdades en parejas científicas en las que se han producido apropiaciones intelectuales. Algunas de estas desigualdades fueron resultado de la colaboración científica entre parejas sentimentales que trabajaban en el mismo laboratorio. El conocido modelo de “marido-profesor/esposa-asistente” muestra cómo muchos de los triunfos y avances profesionales de muchos hombres en ciencia fueron posibles gracias a la colaboración de mujeres que les ayudaban y ejercían de asistentes, corrigiendo trabajos, organizando notas, atendiendo la correspondencia y organizando la vida social y familiar. Un ejemplo es el de la físico-química Isabella Karle (1921-2017) –de soltera Isabelle Helen Lugoski– casada con Jerome Karle (1918-2013),



Figura 1. Imagen de mujeres junto a una tabla periódica trabajando en un laboratorio de Filadelfia en 1937. Crédito: Science History Institute

con quien trabajó durante toda su carrera especializándose en cristalografía. A pesar de ello, únicamente su marido fue quien recibió el premio Nobel de Química de 1985.^[12] Otras colaboraciones tuvieron como resultado que las publicaciones científicas fueran firmadas únicamente con el nombre del investigador principal (usualmente el marido), así como que las mujeres desempeñaran un trabajo no remunerado, como colaboradoras, lo cual dificultó enormemente su reconocimiento posterior. Esto sucedió con Astrid Cleve (1875-1968), la primera doctora en ciencias de Suecia y su esposo, Hans von Euler-Chelpin (1873-1964), dedicado a la investigación en química orgánica. Ambos no sólo colaboraron intensamente, sino que también publicaron numerosos artículos de forma conjunta, aunque también en este caso sólo Euler fue galardonado con el premio Nobel de Química de 1929.^[13]

Al igual que sucede en otros ámbitos de la ciencia, como el sanitario con una presencia femenina mayoritaria en torno a los cuidados, las actividades con menor reconocimiento por parte de los colegas o de los poderes públicos llevan aparejados grandes desequilibrios salariales. Este “efecto Matilda” relativo a la distribución del mérito en la ciencia, se une al de los “techos de cristal” y la “segregación jerárquica” según el cual la designación de las tareas que se consideran apropiadas para progresar en las carreras científicas y la obtención de premios y de puestos mejor remunerados, dificulta, a múltiples niveles, los ascensos de las personas que se han dedicado a actividades menos prestigiosas. Finalmente, otros casos, como el de Reatha C. King (1938), muestran la doble discriminación, por género y por raza, que tuvieron que afrontar algunas científicas. Reatha C. King se especializó en la calorimetría del flúor y fue la primera mujer afroamericana en trabajar en el National Bureau of Standards de los EE. UU., no sin antes tener que desplazarse entre diferentes universidades para completar su doctorado en química-física (1963) debido a que aún estaban vigentes las normativas

de segregación que le impedían el acceso a muchas de esas instituciones académicas de la época.^[14]

MUJERES Y FLÚOR EN LA ESPAÑA DE LA DÉCADA DE 1930

Muchas de las cuestiones apuntadas anteriormente pueden ser analizadas a través de un caso particular: los trabajos analíticos vinculados a la búsqueda del flúor en diferentes sustancias.^[15] A pesar de que este elemento químico era conocido anteriormente, su aislamiento y estudio está tradicionalmente asociado al químico y farmacéutico francés Henri Moissan (1852-1907), así como al químico alemán Otto Ruff (1871-1939). Uno de los visitantes del laboratorio de Moissan, en 1902, fue José Casares Gil (1866-1961), catedrático de análisis químico en la Universidad de Barcelona entre 1888 y 1905 y, posteriormente en la Universidad Central de Madrid.^[16] Desempeñó diferentes cargos políticos e institucionales, como el de presidente de la RSEQ. Fue también director del laboratorio aduanero e integró su laboratorio universitario en los de la Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (JAE). En las décadas de 1920 y 1930, el número de mujeres estudiantes de ciencias creció progresivamente y muchas de ellas trabajaron en su laboratorio. En el marco de la JAE, el laboratorio de la Residencia de Señoritas también fue fundamental para impulsar los estudios y la investigación química en España, así como en su internacionalización debido a la labor desarrollada por la química estadounidense Mary Louise Foster (1865-1960).^[17]

Una de las primeras expertas en la química del flúor en España fue Jenara Vicenta Arnal Yarza (1902-1960). Inicialmente formada como maestra, fue la primera doctora en química en España (1929), con una tesis titulada *Estudio potenciométrico del ácido hipocloroso y de sus sales*. Asimismo, fue la segunda (1930) en obtener una cátedra

de instituto en física y química. Fue también una de las primeras mujeres que ingresó, en 1929, en la Sociedad Española de Física y Química, debido a su excelente expediente académico y a su actividad investigadora. Realizó numerosos viajes de estudio gracias a la JAE, especializándose en aislar el flúor por vía electroquímica.^[18] Su estancia como pensionada le permitió trabajar en la Universidad de Basilea con el químico inorgánico suizo Friedrich Fichter (1869-1952), vicepresidente de la International Union of Chemistry. Durante un año participó en numerosos seminarios científicos, se integró en el *Anstalt für Anorganische Chemie* y publicó un artículo en la prestigiosa revista científica *Helvetica Chimica Acta* sobre la electroquímica del cinc y del lantano en la oxidación del flúor. También publicó otros artículos conjuntamente con Fitcher en esa revista sobre las oxidaciones químicas producidas por la acción del flúor en corrientes gaseosas, en las que el flúor era obtenido por electrólisis del bifluoruro de potasio fundido.^[19] A pesar de su trayectoria científica, con una consolidada actividad investigadora y con intensas conexiones internacionales, no consiguió integrarse en la estructura universitaria.^[20] Después de trabajar como catedrática interina en un instituto de bachillerato en Barcelona, se trasladó a Madrid donde ejerció en el Instituto Nacional Velázquez y terminó dirigiendo el instituto femenino de Enseñanza Media Beatriz Galindo.^[21]

María del Carmen Brugger Romaní (1899-¿) y Trinidad Salinas Ferrer (¿-1965) también realizaron interesantes contribuciones al análisis del flúor. Ambas finalizaron su doctorado en farmacia en la Universidad Central de Madrid a finales de la década de 1920 e inicios de la de 1930 y se especializaron en la química del flúor en el laboratorio de Casares (Figura 2). Brugger había nacido en una familia burguesa de Valencia. Comenzó sus estudios universitarios en Barcelona junto con su hermana y los

© 2021 Real Sociedad Española de Química

Oxydationen mit Fluor XVIII¹⁾. Einwirkung von Fluor auf Cer(III)sulfat und auf Jodate
von Fr. Fichter und Vicenta Arnal.
(4. VI. 31.)

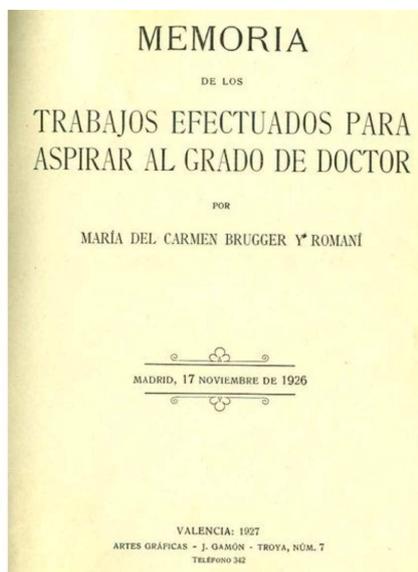
I. Cer(III)sulfat und Fluor.

Die Oxydation von Ce^{III}-ion zu Ce^{IV}-ion verlangt ein Potential von + 1,6 Volt und ist somit durch Fluor spielend leicht zu verwickeln; aber die in wässriger Lösung unvermeidliche gleichzeitige Bildung von Wasserstoffperoxyd steckl der Ansammlung von Cer(IV)salz eine Grenze. Eine weitere Schwierigkeit bietet die Ausfällung von schwer löslichem schleimigem Cer(III)fluorid, 2 CeF₃ + H₂O₂, durch die mit dem Fluorgas eingeführte oder aus ihm in der wässrigen Lösung erzeugte Fluorsäure. Diese Fällung kann durch einen genügend grossen Überschuss von Schwefelsäure verhindert werden, der aber seinerseits die Löslichkeit des Cer(III)sulfats herabsetzt. Die Bedingungen, unter denen die Oxydation gelingt, sind dadurch ziemlich eng begrenzt; die Konzentration an Schwefelsäure muss ca. 8-n. sein (40 g SO₄'' in 100 cm³ Lösung). Selbst in so saurer Lösung fällt etwas Cer(III)fluorid aus, doch stört es weder die Oxydation durch Fluor, noch die Analyse der Lösung, die mit Hilfe von überschüssigem titriertem Wasserstoffperoxyd und Zurücktitrieren mit Kaliumpermanganat nach c. Knorre²⁾ durchgeführt wurde.

Auffallend bei der Fluorierung der Cer(III)sulfatlösung ist der Umstand, dass die Gelbfärbung sehr langsam auftritt; sie erreicht ihr Maximum erst nachträglich, nach Unterbrechung des Fluorstromes, nach 3- bis 1stündigem Stehen, und bläst dann wieder ab. Nach zwei Tagen ist die gelbe Farbe völlig verschwunden; dafür ist dann stets etwas Wasserstoffperoxyd nachweisbar.

Käufliches Cer(III)sulfat wurde in Wasser von 0° gelöst und 76,92 cm³ einer Lösung mit 23,08 cm³ konz. Schwefelsäure vom spezifischen Gewicht 1,84 vermischt. Die Lösung enthielt dann 0,993 g Ce⁺⁺⁺ und 39,90 g SO₄'' in 100 cm³. Von ihr wurden für jeden Versuch 26 cm³ angewandt. Die Temperatur wurde durch Eisküh-

¹⁾ XVII, vgl. Helv. 13, 1200 (1930).
²⁾ Jolin, Bl. [2] 21, 533 (1876).
³⁾ B. 33, 1924 (1900).



Sobre la determinación cuantitativa del flúor y su aplicación a algunos productos naturales

por
José Casares y Trinidad Salinas
(PRESENTADO EN LA SESIÓN DEL 16 DE ENERO DE 1935)

El problema de la distribución del flúor en el reino orgánico es muy interesante; fácilmente se encuentra en huesos y dientes, y, según muchos investigadores, en otros tejidos del organismo animal. También se ha señalado su presencia en los vegetales, donde seguramente existe. No de otra manera se explica el que en los huesos de los herbívoros pueda demostrarse la presencia del flúor con toda seguridad.

La Memoria clásica, citada por los autores respecto a la distribución del flúor en el reino orgánico, es la de Gautier y Clausmann (1). Aplicando su método, estos químicos franceses han demostrado que el flúor, a semejanza de iodo, es un elemento que se halla muy esparcido en la naturaleza. Lo han descubierto en el agua del mar, en casi todas las aguas de los ríos y en gran número de aguas minerales, en los órganos y tejidos de los animales, etc., habiendo determinado su cantidad en la sangre, en músculos y tendones, en el cerebro, glándula tiroidea, epidermis, orinas, etc. Pero la investigación cuantitativa del flúor en pequeñas cantidades, y especialmente en presencia de ácido fosfórico y de sílice, ofrece dificultades, y hemos creído que resultaría interesante el confirmar en algunos casos particulares—ya que en todos la tarea sería demasiado extensa—los datos obtenidos por algunos investigadores.

METODO DE GAUTIER Y CLAUSMANN

Siendo, como ya hemos dicho, el trabajo de estos autores el que ha servido de base para la creencia general respecto a la distribución del flúor en el reino orgánico, consideramos oportuno exponer brevemente su fundamento.

(1) Compt. rend. Acad. Sciences, 754, 1.466, 1.670, 1.753 (1922).

Figura 2. Portada de trabajos publicados por Arnal, Brugger y Salinas relativos al flúor

finalizó en Madrid con una tesis titulada *Contribución al estudio de la química analítica del flúor*.^[22] Su objetivo principal era la investigación cualitativa y cuantitativa de dicho elemento para conocer con más detalle cómo utilizar los fluoruros como aditivos en los alimentos y sus propiedades como agentes conservadores. Para ello, no sólo estudió numerosas reacciones propuestas en la literatura científica existente, sino que desarrolló diferentes técnicas y montajes instrumentales para llevar a cabo nuevas reacciones. En relación con Salinas, se convirtió en una experta en la detección de este elemento en diferentes tipos de sustancias, gracias a su tesis titulada *Estudios sobre la determinación cuantitativa del flúor y su aplicación a varios productos del reino animal*.^[23] Su trabajo se centró en la detección del flúor no sólo en las sustancias más habituales –como huesos, dientes o el agua–, sino en detectarlo en pequeñas trazas en presencia de ácido fosfórico y de sílice. Para ello realizó numerosos ensayos utilizando diferentes tipos de silicatos como vidrio pírex, porcelana, platos porosos, etc., y diferentes fluoruros, como fluorina, criolita, fluoruro de sodio y de bario. El éxito de su trabajo le llevó a publicar un artículo junto con Casares en la *Revista de la Academia de Ciencias de Madrid*, en el que aplicaban sus investigaciones a una gran variedad de productos naturales como huesos de humanos, fósiles, dientes de diferentes animales, huesos de mamíferos, aves y peces, caparazones de crustáceos e incluso en fuentes naturales más exóticas como marfil, barbas de ballena o conchas de jibia.^[24]

La colaboración con ambas autoras fue beneficiosa para Casares ya que le permitió consolidar nuevas líneas de investigación en química analítica y en bromatología.^[25] Por su parte, los trabajos de Brugger y Salinas no sólo les ayudaron a completar sus tesis doctorales, sino también a conseguir nuevas becas de colaboración con la JAE, a publicar sus trabajos en revistas científicas y a ser citadas en la literatura científica internacional. Un ejemplo de ello son las diferentes menciones al artículo de Salinas y Casares incluidas en un tratado sobre las intoxicaciones del flúor publicado en 1937 en el que se revisaban los ensayos y experimentos más relevantes de la época sobre esta materia y se señalaba como ambos habían permitido detectar valores límite de dicho elemento desconocido hasta la época en muestras de huesos.^[26]

Vicenta Arnal nunca se casó, tampoco María del Carmen Brugger ni Trinidad Salinas, lo cual era un prerrequisito invisible pero prácticamente indispensable para las mujeres que desearan dedicarse a la ciencia en las primeras décadas del franquismo.^[27] Esta condición personal era compartida por algunas de las escasas químicas integradas en instituciones científicas de ese período como técnicas de investigación en el CSIC. Estos fueron los casos de Sara Borrell Ruiz (1917-1999) o Piedad de la Cierva Viudes (1913-2007) que lograron continuar investigando debido, posiblemente, a sus conexiones familiares y sociales con las élites franquistas.^[28] En países como la Alemania nacionalsocialista, el trabajo femenino estaba incluso prohibido para las mujeres casadas. A diferencia de las dos investigadoras anteriores, Brugger y Salinas no continuaron sus ca-

rreras científicas después de la guerra, ni siquiera en puestos de trabajo menos visibles que las cátedras universitarias. A partir de entonces, las noticias sobre ambas son casi inexistentes. No sucedió lo mismo con sus investigaciones, de las que se apropió el propio Casares, junto con otros colaboradores, con quienes continuó publicando trabajos sobre la determinación del flúor en diferentes productos.^[29]

CONCLUSIONES

Las mujeres han realizado contribuciones relevantes a la tabla periódica. Los ejemplos anteriores han mostrado su papel en el estudio del flúor en la década de 1930, tanto en España como en el contexto internacional. El análisis de sus biografías también permite conocer históricamente el impacto de las discriminaciones que han afectado a las trayectorias científicas de las mujeres, como han sido su exclusión de los estudios académicos o su veto para acceder a cátedras universitarias. Incluso actualmente, los techos de cristal siguen dificultando la adecuada integración de la mujer en la ciencia. El análisis de los casos anteriores muestra también cómo muchas de las científicas que lograron reconocimientos tuvieron que sortear barreras u obstáculos históricos, así como renuncias personales o sociales para competir con éxito en un mundo en el que las reglas habían sido marcadas por los hombres (Figura 3). Por todo ello, los casos históricos mencionados muestran el valor de recuperar no sólo las contribuciones individuales y colectivas de diferentes mujeres en la química, sino también del estudio de las razones que motivaron los desequilibrios que se encontraron. El reconocimiento de las contribuciones de las científicas pasadas y presentes pasa también por su visibilización como expertas ante la comunidad científica y la opinión pública.

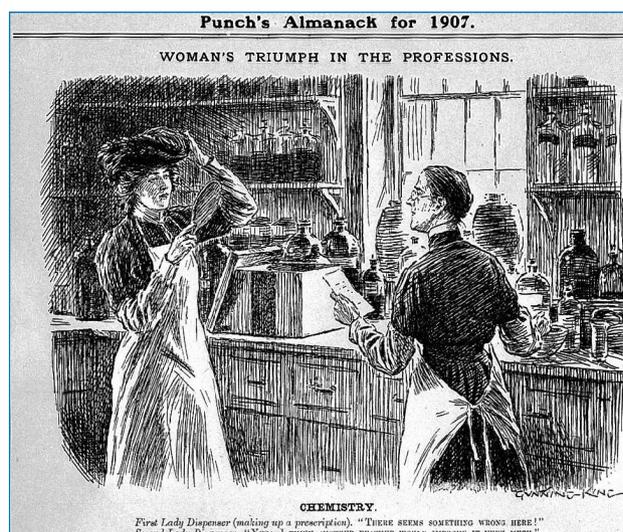


Figura 3. Caricatura de una revista estadounidense de 1907 burlándose de las contribuciones de las mujeres a la química. [*Triunfo de las mujeres en las profesiones. Química*. Primera preparadora (formulando una receta): "Parece que hay algo falla aquí". Segunda preparadora: "Sí, pienso que otra pluma lo mejoraría mucho"]. Crédito: Wellcome Collection

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Abir-am, D. Outram. *Uneasy careers and intimate lives. Women in Science, 1789-1979*, New Brunswick, Rutgers University Press, 1987.
- [2] D. Opitz, S. Bergwik, B. van Tiggelen. *Domesticity in the Making of Modern Science*, Palgrave MacMillan, Londres, 2016.
- [3] J. R. Bertomeu Sánchez, *Mujeres de ciencia en el siglo XIX*, <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/ciencia-y-sociedad/108/posts/mujeres-de-ciencia-en-el-siglo-xix-18886>, consultado el 16/04/2021.
- [4] Lykknes, A., Opitz, D. L.; van Tiggelen, B. (eds.), *For better or for worse? Collaborative couples in the sciences*, Springer, 2012.
- [5] 500 Women Scientists. Request a Woman in STEM, <https://500womenscientists.org/request-a-scientist>, consultado el 16/04/2021.
- [6] R. Martínez-Haya. Una perspectiva histórica y epistemológica de los estudios de ciencia y género y su uso en el aula de ciencias. *Anales de Química*. **2019**, *1*, 26-31.
- [7] "Setting their Table" - International Symposium on Women and the Periodic Table of Elements, <https://iupac.org/event/setting-their-table-international-symposium-on-women-and-the-periodic-table-of-elements/>, consultado el 16/04/2021.
- [8] A. I. Morales López. Hacia la igualdad de género en la historia del sistema periódico. *Anales de Química*. **2019**, *3*, 227-234. (Este trabajo obtuvo el Premio "Salvador Senent" de la RSEQ).
- [9] J. R. Bertomeu Sánchez, A. García Belmar, B. Bensaude-Vincent. Looking for an Order of Things: Textbooks and Chemical Classifications in Nineteenth Century France. *Ambix*. **2002**, *49* (2), 227-251.
- [10] B. van Tiggelen, A. Lykknes. The women behind the periodic table. *Nature*, **2019**, *565*, 559-561.
- [11] Lykknes, A; van Tiggelen, B. Women in their Element, *World Scientific*, **2019**, Singapore.
- [12] J. Sanz-Aparicio. The legacy of women to crystallography. *Arbor*, **2015**, *191* (772).
- [13] K. Espmark, C. Nordlund. Married for Science, Divorced for Love: Success and Failure in the Collaboration Between Astrid Cleve and Hans von Euler-Chelpin. En: A. Lykknes, D. Opitz, B. Van Tiggelen, *For better or for worse? Collaborative couples in the sciences*, Springer, **2012**, 81-102.
- [14] J. E. Brown. *African American women chemists*. Oxford University Press, Oxford, 2018.
- [15] I. Suay-Matallana, I. Fluorine and the research of Vicenta Arnal, María del Carmen Brugger, and Trinidad Salinas. En: A. Lykknes, B. Van Tiggelen, B. Women in their Element. *World Scientific*, **2019**, 158-169, Singapore.
- [16] I. Suay-Matallana. Expertos en química analítica y familias científicas en la España contemporánea: Antonio Casares Rodríguez y su hijo José Casares Gil. *Llull*, **2017**, *40* (84), 207-224.
- [17] C. Magallón. El Laboratorio Foster de la Residencia de Señoritas. Las relaciones de la JAE con el International Institute for Girls in Spain, y la formación de las jóvenes científicas españolas. *Asclepio*. **2007**, *49* (2), 37-62.
- [18] Memoria correspondiente a los cursos 1931 y 1932. Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, Madrid, 1933.
- [19] F. Fichter, J. V. Arnal, Oxydationen mit Fluor XVIII: Einwirkung von Fluor auf Cer(III)sulfat und auf Jodate. *Helvetica chimica acta*. **1931**, *14* (4), 862-867.
- [20] I. Suay-Matallana. Farmacéuticos innovadores. María del Carmen Brugger Romaní. *Circular Farmaceutica*. **2019**, *77* (1), 49.
- [21] M. J. Báguena Cervellera, Jenara Vicenta Arnal Yarza, <http://dbe.rah.es/biografias/61256/jenara-vicenta-arnal-yarza>, consultado el 16/04/2021.
- [22] M. C. Brugger Romaní. *Contribución al estudio de la química analítica del flúor*. Artes Gráf, J. Gamón, Valencia, 1927.
- [23] T. Salinas Ferrer. *Estudios sobre la determinación cuantitativa del flúor y su aplicación a varios productos del reino animal*. Universidad Central, Madrid, 1934.
- [24] J. Casares Gil, T. Salinas. Sobre la determinación cuantitativa del flúor y su aplicación a algunos productos naturales. *Revista de la Academia de Ciencias de Madrid*. **1935**, *32*, 88-119.
- [25] I. Suay-Matallana. La colaboración científica y los espacios de la química: un estudio de caso español en la primera mitad del siglo XX. *Revista Española de Documentación Científica*. **2014**, *37* (4).
- [26] K. Roholm, *Fluorine Intoxication: A Clinical-Hygienic Study. With a Review of the Literature and Some Experimental Investigations*. H. K. Lewis & Co. Ltd, Londres; Nyt Nordisk Forlag, Copenhagen, 1937.
- [27] C. Magallón. *Pioneras españolas en las ciencias. Las mujeres del Instituto Nacional de Física y Química*, Madrid, CSIC, 1998.
- [28] M. J. Santasmases. Género, afición y mérito: Una biografía de Sara Borrell Ruiz. *Arenal*. **2017**, *24* (2), 287-318; A. Romero De Pablos. Mujeres científicas en la dictadura de Franco: Trayectorias investigadoras de Piedad de la Cierva y María Aránzazu Vigón. *Arenal*. **2017**, *24* (2), 319-348. Ver también: A. Ulises Acuña Fernández. María Josefa Molera: cinética, fotoquímica y cromatografía en la España de 1940 a 1980. *Anales de Química*. **2013**, *1*, 31-33.
- [29] J. Casares Gil, F. Moreno Martín. Investigación de flúor en cenizas vegetales, *Anales de Física y Química*. **1944**, *11*, 685-692.

Dorotea Barnés González (1904-2003)

Una química española en la encrucijada de la espectroscopía y el estudio de los aminoácidos

Álvaro Martínez-del-Pozo

Resumen: Química española que, en colaboración con otras dos científicas estadounidenses, publicó en 1930 un artículo sobre las características químicas y espectroscópicas de la cistina. Fue una auténtica pionera porque este artículo es considerado como la primera contribución científica internacional hecha por una mujer española en el campo de la Bioquímica. Sin embargo, su carrera científica quedó truncada por su matrimonio (“A mí me retiró de la ciencia mi marido”, declaró a los 92 años), y por la Guerra Civil española, que la llevó al exilio y a la posterior inhabilitación académica.

Palabras clave: Espectroscopía, cistina, absorción, raman, pionera.

Abstract: Spanish chemist who, in collaboration with two other American scientists, published in 1930 an article on the chemical and spectroscopic characteristics of cystine. She was a true pioneer because this article is considered the first international scientific contribution made by a Spanish woman in the field of Biochemistry. However, her scientific career was cut short by her marriage (“My husband retired me from science”, she declared at the age of 92), and by the Spanish Civil War, which led to her exile and subsequent academic disqualification.

Keywords: Spectroscopy, cystine, absorption, raman, pioneer.

INTRODUCCIÓN

En el momento en el que se escriben estas líneas, ya hay excelentes biografías publicadas sobre Dorotea Barnés, que se encuentran fácilmente sin más que teclear su nombre en cualquier buscador de internet.^[1-4] Simplemente como ejemplo, remito a los lectores interesados a la propia Wikipedia,^[1] o al estupendo trabajo publicado por Estibaliz Urarte en Principia.^[2] Por este motivo, y dado que se escribe pensando principalmente en lectores con una mínima formación química, aparte de trazar también unas pinceladas biográficas, este texto se enfoca hacia la descripción de su principal trabajo científico, publicado en *The Journal of Biological Chemistry*.

Este artículo es además la versión extendida de otra mucho más breve publicada por la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular (SEBBM) en su página web.^[5]

DOROTEA BARNÉS GONZÁLEZ

Hija de Francisco Barnés, ministro de Educación de la Segunda República Española, y de Dorotea González, Dorotea Barnés González fue la mayor de una familia de siete hermanos (cuatro mujeres y tres varones). En contra de lo que entonces era costumbre en España, los siete hermanos recibieron una educación equivalente, lo que se tradujo en que las cuatro chicas terminaron licenciándose con un título universitario, algo poco frecuente en España durante por lo menos la primera mitad del siglo xx.

La carrera elegida por Dorotea fue la de Química, si bien su trayectoria académica también fue inusual, dado que tardó trece años (1918-1931) en acabarla. Un espacio de tiempo que revela cómo los estudios universitarios de entonces no estaban tan encorsetados como ocurre ahora y que se explica fácilmente atendiendo a cómo, durante esos años, Dorotea no se limitó a acudir



Á. Martínez-del-Pozo

Departamento de Bioquímica y Biología Molecular
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Complutense de Madrid
Ciudad Universitaria
Plaza de las Ciencias, 2
28040 Madrid
C-e: alvaromp@quim.ucm.es

Recibido: 02/02/2021. Aceptado: 11/05/2021.

a las clases regladas, sino que su formación implicó también la realización de estancias en diversos laboratorios de gran prestigio, tanto en España como en el extranjero.

Estas estancias comenzaron cuando realizó prácticas en la Residencia de Señoritas de Madrid, en el laboratorio de Mary Louise Foster, una científica estadounidense que se encontraba de año sabático. Al igual que en la mucho más conocida Residencia de Estudiantes, en la Residencia de Señoritas las residentes también disponían de un laboratorio donde practicar, una buena biblioteca para complementar sus estudios y un programa de clases, encuentros, conciertos y conferencias poéticas. Todo ello con el fin de complementar y ampliar su formación académica reglada. En ella se formaron mujeres como Victoria Kent, Clara Campoamor o María Zambrano, sólo por citar algunas de las más conocidas.^[6] Este contacto, y su buena labor y disposición, permitió a Dorotea ser becada por la Junta para Ampliación de Estudios en 1929, para realizar una estancia en el Smith College de Northampton, Massachusetts, bajo la dirección de Gladys Anslow. Allí llevó a cabo una investigación sobre las características espectroscópicas del aminoácido cistina. Un trabajo que acabaría convirtiéndose en su publicación científica más relevante, y en su tesis doctoral, una vez que regresó a España. Dorotea fue, con estos resultados, la primera española en publicar un artículo^[7] en *The Journal of Biological Chemistry* (una revista de referencia para todo bioquímico que se precie, y con ya más de 120 años de antigüedad).

El artículo en concreto planteaba comprobar si el aminoácido cistina, que hoy sabemos que es el producto de la unión de dos cisteínas a través de su cadena lateral, mediante un enlace disulfuro, poseía una estructura cíclica o "alifática" (*sic*) (Figura 1).

Es muy destacable que este trabajo se llevó a cabo en los años 30 del siglo XX, en un contexto en el que todavía no se aceptaba de forma generalizada que las proteínas estuviesen formadas exclusivamente por aminoácidos. Ni siquiera por entonces estaba claro si eran macromoléculas o simples agregados coloidales. Recuérdese que el primer aspecto no quedaría definitivamente zanjado hasta una fecha tan tardía como 1955, cuando Fred Sanger publicó la secuencia completa de la insulina, incluyendo el correcto emparejamiento de sus dos enlaces disulfuro.^[8] El segundo aspecto, el de su naturaleza macromolecular, algo que hoy nos parece tan obvio, tampoco se aceptó hasta por lo menos la difusión de los famosos experimentos de ultracentrifugación con la hemoglobina, realizados por Theodore Svedberg en 1925.^[9,10] Es decir, más o menos al mismo tiempo en el que Dorotea Barnés y sus colaboradoras se afanaban en el estudio espectroscópico de la cistina. Incluso el propio concepto de macromolécula no fue premiado con un premio Nobel, a Hermann Staudinger, hasta una fecha tan tardía como el otoño del año 1953.^[11]

La cistina es un aminoácido que, además, tiene una gran importancia histórica, pues fue el segundo aminoácido

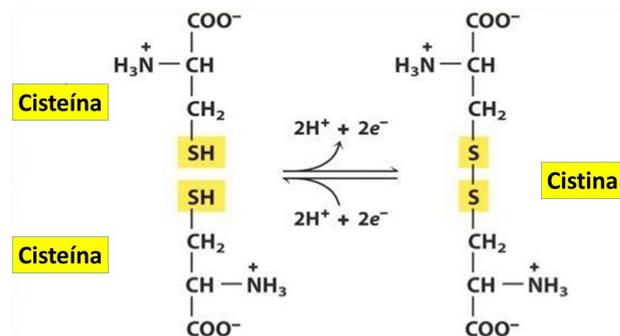


Figura 1. Representación de la reacción química por la que dos moléculas del aminoácido cisteína se unen covalentemente, a través de un enlace disulfuro, para formar una molécula de cistina

proteico aislado, a partir de un cálculo extraído de una vejiga humana.^[12,13] Un aislamiento llevado a cabo en 1810 por William Hyde Wollaston, un químico británico que tuvo también el privilegio de descubrir dos nuevos elementos químicos: el paladio^[14] y el rodio.^[15]

La presencia de cistina en las proteínas suele suponer un elemento importante de estabilidad termodinámica y mecánica, dado que implica la introducción de enlaces covalentes completamente distintos de los enlaces peptídicos. Además, estos enlaces disulfuro casi siempre se establecen entre aminoácidos alejados en la secuencia, de forma que estabilizan la estructura tridimensional nativa de las proteínas. Por ese motivo, son frecuentes en proteínas que deben ser muy resistentes, como aquellas de organismos extremófilos, muchas toxinas, o las que juegan un papel estructural, como las queratinas, que forman parte mayoritaria de pelos, uñas, lana, escamas, etc. Así que, con buen criterio, Dorotea Barnés se afanó en la purificación de la cistina a partir de hidrolizados ácidos de lana de oveja, obteniendo distintos tipos de cristales que hoy sabemos que, muy probablemente, algunos de ellos serían simplemente resultado de la isomerización del inicialmente único estereoisómero presente, la L-cisteína.

También es hoy de conocimiento general que prácticamente todas las proteínas muestran una banda de absorción centrada sobre los 280 nm, como resultado de la contribución de las cadenas laterales de los aminoácidos a los que los bioquímicos nos gusta denominar como aromáticos: la fenilalanina (un benceno), la tirosina (un fenol) y el triptófano (un indol) (Figura 2).

En la zona del espectro electromagnético que se denomina como ultravioleta próximo (aproximadamente entre los 250 y los 350 nm), se dan las condiciones de longitud de onda adecuadas para que las moléculas con dobles enlaces entre átomos de carbono puedan absorber radiación electromagnética; para que se comporten como *cromóforos*. Una absorción que produce la excitación de los electrones involucrados en esos enlaces, de forma que tienen lugar transiciones electrónicas que, principalmente, involucran orbitales moleculares del tipo n y π . En términos químico-físicos, se habla de

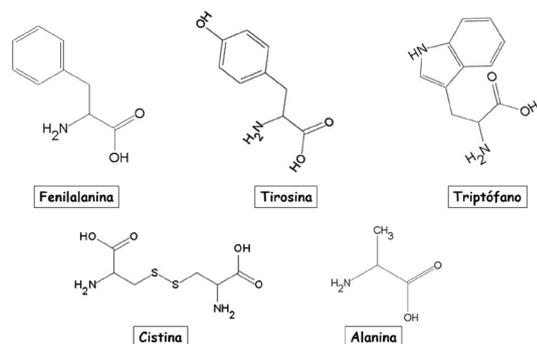


Figura 2. Se muestran las fórmulas semidesarrolladas de los aminoácidos que se mencionan a lo largo del artículo

transiciones $n \rightarrow \pi^*$ y $\pi \rightarrow \pi^*$. Los únicos aminoácidos proteicos cuya cadena lateral reúne características para registrar este tipo de transiciones son precisamente los aromáticos.^[16,17]

En la época en la que Dorotea hizo sus experimentos, las características moleculares y, sobre todo, espectroscópicas, de la cistina no eran conocidas con suficiente detalle. En este caso, su cadena lateral, resultado del establecimiento de un enlace disulfuro entre dos cisteínas (Figura 1), no es cíclica, ni, lo que es más relevante en este caso, aromática. Las transiciones electrónicas involucradas en su espectro de absorción implican orbitales moleculares completamente distintos (orbitales σ) de los involucrados en las transiciones de las cadenas laterales de los aminoácidos aromáticos. En este caso, el cromóforo es el propio disulfuro, un enlace cuyas características se corresponde con transiciones $\sigma \rightarrow \pi^*$.^[16,17] Esta transición electrónica no origina bandas de absorción centradas sobre los 280 nm sino, como demostró Dorotea en su trabajo, a longitudes de onda sensiblemente menores. Tanto que solapan con las de otros dobles enlaces que involucran al carbono, como el propio carboxilo, presente en todos los aminoácidos (véase, por ejemplo, el espectro correspondiente a la alanina en la Figura 3). Por este motivo, en el caso de la cistina, no se observa una banda definida en la zona del ultravioleta próximo (Figura 3).

Esto es lo que Dorotea y sus colaboradoras trataron de explicar. Cuál era la razón molecular por la que la cistina también absorbe significativamente en ese intervalo de longitudes de onda. Tanto que hay que tenerla en cuenta a la hora de calcular su coeficiente teórico de extinción molar. Un esfuerzo que hoy puede parecer trivial, pero que entonces fue titánico y llevó muchos meses de experimentación. Una vez más, y también para contextualizarlo, es necesario recordar que un espectrofotómetro capaz de medir con suficiente precisión en la región del ultravioleta, un instrumento clave hoy en día en todos los laboratorios bioquímicos, fue comercializado tan tarde como 1940 por la compañía de instrumentación fundada por el químico americano Arnold O. Beckman.^[18] El artículo que nos ocupa se publicó en 1930... ¡Diez

años antes!^[7] Por este motivo, las medidas se llevaron a cabo en una versión parcialmente “casera” de lo que hoy consideramos como un espectrofotómetro estándar, utilizando un instrumento basado en un fotómetro de sector giratorio con un pequeño espectrógrafo de cuarzo, suministrado por Gaertner Scientific Corporation.^[19] Como fuente de luz se utilizó un tubo de descarga de hidrógeno, construido *exprofeso* por la United States Bureau of Standards, y que tenía la ventaja, con respecto a otros diseños contemporáneos, de suministrar un espectro continuo en gran parte de la región ultravioleta.^[20] Es decir, se dispuso de una fuente de luz mucho más intensa y homogénea que facilitó la realización de las medidas descritas en el artículo.

La conclusión principal de su trabajo fue entonces que la cistina no mostraba “la propiedad de absorción selectiva propia de los aminoácidos con una cadena lateral cíclica” (que traducido a nuestro lenguaje actual quiere decir que no muestra una banda definida de absorción) y que, por lo tanto, “su cadena lateral debería ser lineal”:

Since the absorption curves for cystine show only continuous absorption we conclude that the structure of cystine is that usually assumed, a straight chain.

Una conclusión correcta, y nada fácil, dado que la cistina, a pesar de no mostrar esa banda característica de los aromáticos, sí absorbe bastante más que el resto de los otros aminoácidos, como se aprecia en los espectros que se muestran a continuación y que son reproducciones de las originales del artículo que nos ocupa (Figura 3).

Aparte de la importancia de esta caracterización, la labor de Dorotea en su conjunto fue tan notable que la propia Foster no dudó en apadrinarla para la obtención de otra beca que le permitió entrar, ni más ni menos, que en la prestigiosa Universidad de Yale. Allí dedicó un buen número de meses a investigar sobre los ácidos nucleicos de bacterias patógenas. Al final, lo que había empezado como una estancia relativamente breve en los EE. UU., se alargó y duró dos años, a lo largo de los cuales también tuvo la oportunidad de visitar otras conocidísimas universidades, como Harvard y Columbia.

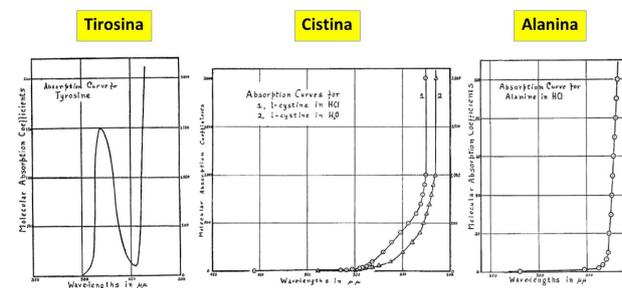


Figura 3. Espectros de absorción de la alanina (cadena alifática, derecha), cistina (centro), y tirosina (aromático, izquierda) según se publica en el artículo de Dorotea Barnés en *The Journal of Biological Chemistry*



Figura 4. Dorotea Barnés en el Physiclisches Institut der Technischen Hochschule de Graz (Austria), donde se realizó la fotografía en abril de 1932 (Residencia de Estudiantes, Madrid).

Foto tomada de <http://cienciaeacogida.org/es/expo/protagonista/dorotea-barnes/>

A su vuelta a España, trabajó otro par de años en la sección de espectroscopía del Instituto Rockefeller de Madrid (hoy Instituto de Química-Física Rocasolano-CSIC, Madrid), lo que incluyó otra breve estancia, esta vez de tres meses, en Austria, en el laboratorio del Karl Wilhelm Friedrich Kohlrausch^[21] (no confundir con otro famoso Friedrich Kohlrausch, responsable de describir la propiedad electroforética del mismo nombre,^[22] que permite la gran resolución de la separación de proteínas mediante electroforesis en geles de poli-acrilamida y en presencia de docecilsulfato sódico o PAGE-SDS).^[23] Allí aprendió el manejo de la entonces novedosa técnica de la espectroscopía Raman, convirtiéndose en una de las mejores conocedoras del momento de esta técnica en su aplicación al estudio de las moléculas biológicas.

Finalmente, aunque ya apartándose un poco de la investigación activa, y prácticamente coincidiendo con su matrimonio, Dorotea consiguió la cátedra de Física y Química en el instituto de educación secundaria Lope de Vega (Madrid), un logro que tampoco se debe considerar menor en el contexto de la época que nos ocupa y dado el enorme prestigio de esta institución. Lamentablemente, llegó el año 1936, se desató nuestra terrible guerra civil y, como muchos otros científicos e intelectuales españoles, Dorotea se vio abocada al exilio en Francia, en compañía de su marido y de su hija recién nacida. Un exilio que trajo funestas consecuencias para ella, dado que en 1941 se dictó un decreto en el que, como consecuencia de la depuración llevada a cabo por el régimen franquista, Dorotea fue inhabilitada para ejercer la enseñanza durante el resto de su vida. Al contrario que alguno de sus hermanos, Dorotea sí volvió a España, pero nunca más pudo retornar a ninguna de sus dos labores preferidas: la investigación y la enseñanza.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Ruth López Zazo, Paloma Sánchez Hombre y Myriam de Hipólito Ruiz por haberme servido de inspiración para escribir este pequeño artículo al haber organizado, en la Biblioteca de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid, la magnífica exposición “Ellas. Mujeres con Ciencia” (<https://tribuna.ucm.es/news/exposicion-ellas-mujeres-con-ciencia-facultad-de-quimicas-ucm>). También quiero agradecer a Isabel Varela-Nieto, y a la SEBBM en general, por haberme animado a escribir estas líneas. Finalmente, quiero aprovechar para agradecer a todos los miembros del “Grupo de proteínas tóxicas” su constante apoyo y, sobre todo, su amistad. Este trabajo ha podido ser financiado gracias a dos proyectos Banco de Santander-UCM con referencias PR75/18-21561 y PR87/19-22556.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] https://es.wikipedia.org/wiki/Dorotea_Barn%C3%A9s_Gonz%C3%A1lez
- [2] E. Urarte. Dorotea Barnés (1904-2003). Química. La luz invisible. *Principia*. <http://cienciaeacogida.org/es/expo/protagonista/dorotea-barnes/>
- [3] C. Magallón Partalés. *Pioneras españolas en las ciencias. Las mujeres del Instituto Nacional de Física y Química*. Consejo Superior de investigaciones científicas. ISBN 9788400077730.
- [4] Real Academia de la Historia. <http://dbe.rah.es/biografias/51689/dorotea-barnes-gonzalez>
- [5] Dorotea Barnés <https://www.sebbm.es/web/es/divulgacion/mujeres-ciencia/retratos/4385-enero-2021-dorotea-barnes>
- [6] Women at the Forefront. 100 Years of the Residencia de Señoritas (1915-1936). <http://www.residencia.csic.es/expomujeres/en/expo02.htm>
- [7] M. L. Foster, G. Anslow y D. Barnés. A Study of Some of the Chemical Characteristics and the Absorption Spectrum of Cystine. *J. Biol. Chem.* **1930** 89, 665-673.
- [8] A. P. Ryle, F. Sanger, L. F. Smith y R. Kitai. The disulphide bonds of insulin. *Biochem. J.* **1955** 60, 542-556.
- [9] T. Svedberg. The ultra-centrifuge and the study of high-molecular compounds. *Nature* **1937** 139, 1051-1062.
- [10] J. S. Fruton. *Molecules and life. Historical essays on the interplay of chemistry and biology*. Wiley-Interscience. ISBN 0-471-28448-3. 1972, 136-140.
- [11] The Nobel Prize in Chemistry, 1953. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1953/staudinger/biographical/>
- [12] W. H. Wollaston. On cystic oxide: a new species of urinary calculus. *Trans. R. Soc. Lond.* **1810** 100, 223.
- [13] A. Meister. *Biochemistry of the amino acids*. Academic Press. 1957, 6-7.
- [14] D. Solé Arjó (2019) Z=46, paladio, Pd. Un metal precioso con gran interés industrial y versatilidad catalítica. *An. Quím.* 115, 108.

- [15] E. de Jesús Alcañiz. Z=45, rodio, Rh. Un metal que hace menos contaminantes a nuestros vehículos. *An. Quím.* **2019** 115, 107.
- [16] J. M. García Segura, J. G. Gavilanes, A. Martínez-del-Pozo, F. Montero, M. Oñaderra y F. Vivanco. *Técnicas instrumentales de análisis en Bioquímica*. Colección Ciencias Químicas: Química básica. Síntesis. ISBN 84-7738-4290. 1996, 72-76.
- [17] F. Dörr, *Structure Determination of Biomolecules by Physical Methods. Biophysics*. Editado por W. Hoppe, W. Lohmann, H. Markl y H. Ziegler. Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-68877-5. 1983. 102-106.
- [18] R. D. Simoni, R. L. Hill, M. Vaughan y H. Tabor. A Classic Instrument: The Beckman DU Spectrophotometer and Its Inventor, Arnold O. Beckman. *J. Biol. Chem.* **2003** 278, p. e1.
- [19] B. T. Thorne. Spectroscope: Its uses in general analytical chemistry. An intermediate textbook for practical chemists. Publicado por W. Wood. 1907.
<https://archive.org/details/spectroscopetsu00bake/page/82/mode/2up>
- [20] W. H. Crew y E. O. Hulburt. The Continuous Spectrum of Hydrogen. *Phys. Rev.* **1926** 28, 936.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Karl_Wilhelm_Friedrich_Kohlrausch
- [21] https://fr.wikipedia.org/wiki/Karl_Wilhelm_Friedrich_Kohlrausch
- [22] <https://es.wikipedia.org/wiki/Electroforesis>
- [23] A. L. Shapiro, E. Viñuela y J. V. Maizel Jr. Molecular weight estimation of polypeptide chains by electrophoresis in SDS-polyacrylamide gels. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* **1967** 28, 815-820.






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

APLAZADO A 2022

www.bienal2021.com

La química contra la transmisión de la COVID-19

Un recurso eficaz y didáctico

Fernando Ignacio Prada Pérez de Azpeitia

Resumen: Para combatir eficazmente la propagación del coronavirus SARS-CoV-2 entre la población, la OMS recomienda utilizar productos desinfectantes presentes en la mayoría de los hogares, como alcohol etílico, jabón, lejía y agua oxigenada, así como el uso de mascarillas. La investigación de la composición, concentración, características y modo de actuación de las sustancias químicas que constituyen estos productos es un oportuno recurso didáctico que permite a los estudiantes comprobar las implicaciones de la química en la salud y el bienestar de la sociedad de una forma práctica y aplicada.

Palabras clave: química y COVID-19, desinfectantes y coronavirus, jabón, gel hidroalcohólico, mascarillas.

Abstract: To effectively combat the spread of SARS-CoV-2 coronavirus among the population, WHO recommends using disinfectant products, such as ethyl alcohol, soap, bleach and hydrogen peroxide, which are to be found in most homes, as well as the use of face masks. The analysis of the composition, concentration, characteristics and mode of action of the chemical substances that constitute these products is an opportune didactic resource that enables students to check the effects of chemistry on the health and well-being of society in a practical and applied manner.

Keywords: chemistry and COVID-19, disinfectants and coronavirus, soap, hydroalcoholic gel, face masks.

*A nivel molecular, el jabón actúa rompiendo estructuras.
A nivel social, ayuda a mantenerlo todo unido.*
F. JABR, *The New York Times*, marzo de 2020.

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2019, la Comisión Municipal de Salud y Sanidad de Wuhan (China) informó a la OMS de un brote de neumonía de origen desconocido en un mercado mayorista de animales vivos. El agente causante de este brote, identificado como un nuevo virus de la familia de los Coronaviridae, se denominó SARS-CoV-2 (de las siglas en inglés de Síndrome Agudo Respiratorio Grave), cuyo cuadro clínico se identifica como la enfermedad COVID-19.

La transmisión del virus entre personas se puede producir por diferentes vías:

- Indirectamente, a través de las manos o por superficies inertes contaminadas (denominadas fómites), si acto seguido hay contacto con la mucosa de la boca, nariz y/u ojos.
- Directamente, a través del aire, bien al respirar gotículas exhaladas por las personas contagiadas al respirar, hablar, estornudar o toser (gotas de Flügge), bien a través de partículas más pequeñas, que permanecen suspendidas en el aire durante más tiempo y alcanzan mayor distancia (aerosoles).^[1]

En marzo de 2020, la OMS declaró la pandemia mundial y recomendó una serie de medidas con el objetivo de eliminar los microorganismos patógenos e inactivar los coronavirus de las manos. Dentro de estas medidas, la Química juega un papel fundamental al ofrecer productos antisépticos (jabón y etanol), para la asepsia de tejidos vivos, y desinfectantes (lejía y agua oxigenada), para esterilizar superficies inertes.

La industria química proporciona muchos otros productos en la lucha contra el virus: fármacos (medicamentos), antibióticos, antivirales, estabilizantes para las vacunas), gases medicinales (oxígeno para tratar la hipoxia)



F. Prada Pérez
de Azpeitia

Dpto. de Física y Química (IES Las Lagunas)
Gabriel García Marquez, 1. (Rivas-Madrid)
C-e: fernando.pradaperez@educa.madrid.org

Recibido: 10/12/2020. Aceptado: 12/04/2021.

y materiales sanitarios fabricados con polímeros (bolsas de suero, respiradores, jeringuillas, material quirúrgico y equipos de protección individual o EPIs). Dentro de esta última categoría, se incluyen: guantes, batas, gorros, gafas, pantallas faciales de protección y mascarillas FFP (del inglés filtering face pieces).^[2] Entre todos estos materiales, la mascarilla se ha convertido en la “herramienta” más eficaz e imprescindible en la vida cotidiana de las personas para evitar los contagios.

UN RECURSO DIDÁCTICO Y SANITARIO

La lucha contra la propagación de la COVID-19, ofrece una buena oportunidad para elaborar recursos didácticos que alcancen uno de los principales objetivos del currículo de química en niveles preuniversitarios, que los estudiantes comprueben las implicaciones de la química en la salud y bienestar de la sociedad, y que reconozcan la necesidad de la ciencia para mejorar las condiciones de nuestra existencia. Es una magnífica ocasión para mostrar cómo la Química es una ciencia central y aplicada, partiendo del análisis de la composición, propiedades y modo de actuación de productos químicos cotidianos, eficaces para combatir la pandemia (Figura 1).

Para ello se ponen en práctica contenidos fundamentales del currículo de química en las etapas educativas de ESO y bachillerato, como por ejemplo: sustancias puras y mezclas, concentración y preparación de disoluciones, trabajo en el laboratorio, solubilidad, pictogramas indicadores de peligro de sustancias químicas, reacciones químicas, ácidos y bases, medida de la acidez, hidrólisis de sales, grupos funcionales del carbono, propiedades de los alcoholes, reacciones orgánicas, saponificación, sustancias hidrófilas e hidrófobas, composición de los jabones y otros productos químicos cotidianos de interés industrial.

Los contenidos teóricos y prácticos que se tratan son susceptibles de ser utilizados tanto durante las clases y explicaciones como en el laboratorio, entre otras experiencias, para preparar disoluciones que pueden ser



Figura 1. El lavado con agua y jabón es una práctica clave de salud pública para reducir la pandemia, a la vez que una oportunidad para analizar las propiedades de sustancias químicas cotidianas

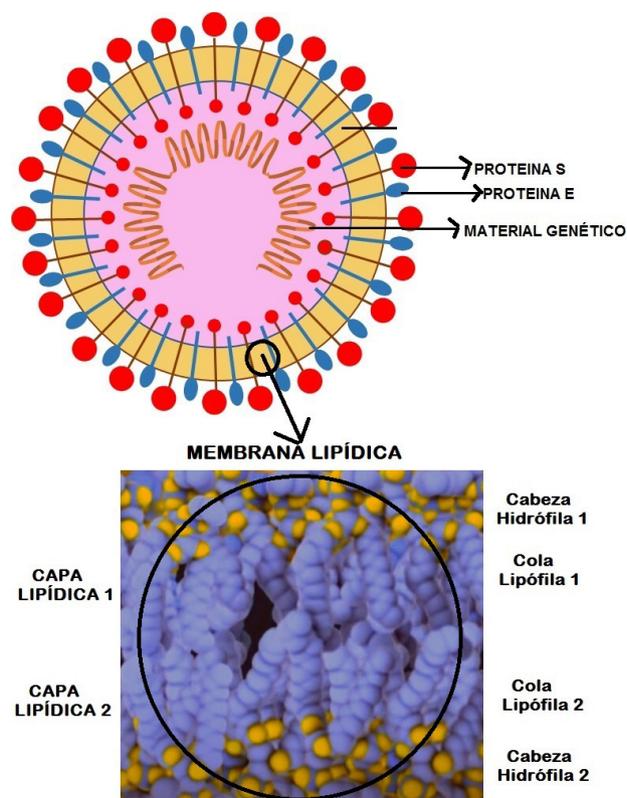


Figura 2. Estructura de un coronavirus con detalle ampliado de la bicapa lipídica de la membrana

aprovechadas por los propios estudiantes para la desinfección de sus manos y/o superficies comunes, y para identificar mascarillas no homologadas.

EL JABÓN FREENTE EL CORONAVIRUS

El SARS-CoV-2 es el virus causante de la enfermedad denominada COVID-19. Al igual que algunos otros tipos de virus y bacterias, se encuentra rodeado de una membrana externa formada por una bicapa lipídica, con las colas lipófilas (o hidrofóbicas) hacia adentro rodeados por sendos anillos formados por las cabezas hidrófilas (o lipófilas), que protege el genoma o material genético (ARN) contenido en su interior (Figura 2). El genoma del virus codifica cuatro proteínas estructurales, tres de ellas asociadas a la envuelta viral (S-spike, E-envelope y M-membrane) y una en el interior asociada al ARN (N-nucleocapsid).^[3]

Las proteínas S, que sobresalen de la membrana viral, tienen la actividad de unirse con los receptores de células hospedadoras de la mucosa oral con el objeto de fusionar sus membranas (Figura 3). De esta forma, el virus libera el genoma viral en el interior e infecta a las células sanas del tejido pulmonar, replicándose de forma semejante a los virus de la gripe y pudiendo crear unas 100.000 copias. El sistema inmunitario, sobre todo en el caso de personas inmunodeprimidas y de edad avanzada, puede llegar a reaccionar tan agresivamente para eliminar el

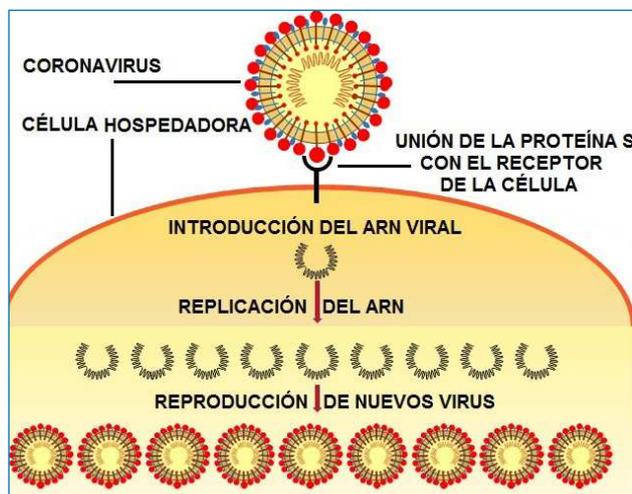


Figura 3. Proceso de infección del virus (cortesía de J. M. Pons)

coronavirus que cause daños muy graves en las células sanas del tejido pulmonar, originado por la actuación desenfrenada de proteínas (citoquinas) liberadas como defensa.

Es sorprendente, que con todos los avances médicos y tecnológicos del siglo XXI, el uso de un sencillo jabón sea uno de los métodos más eficaces en la lucha contra la pandemia. La obtención del jabón, tanto a nivel tradicional como industrial, se basa en una reacción química, la saponificación, que utiliza como materia prima los triglicéridos de los ácidos grasos presentes en las grasas. En las de origen vegetal, predominan los ácidos grasos insaturados, con uno o más dobles enlaces tipo cis, como por ejemplo el ácido oleico del aceite de oliva. Mientras que en las de origen animal, predominan los ácidos grasos saturados, como el ácido esteárico. Así por ejemplo, en la saponificación de triesterato de glicerilo (Figura 4), al reaccionar con hidróxido de sodio origina estearato de sodio, y como producto secundario propano-1,2,3-triol, conocido comercialmente como glicerina, una sustancia humectante que conserva la humedad de la piel y evita su deshidratación.^[4]

El jabón en forma de pastillas puede convertirse en un depósito de microorganismos patógenos. Por lo que lavarse las manos con él podría conducir a propagar una infección. Por esta razón, antes de usar una pastilla de jabón hay que enjuagarla bien, para eliminar los gérmenes adheridos, o bien lavarnos con un jabón líquido o gel de ducha elaborado con tensioactivos (surfactantes) que disminuyen la tensión superficial del agua, favoreciendo la emulsión de las grasas.^[5] Los principales tensioactivos aniónicos de los jabones líquidos y detergentes

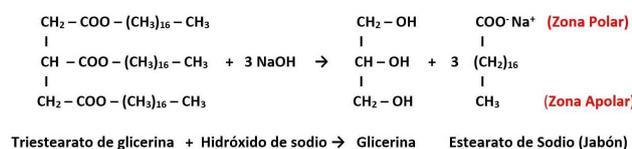


Figura 4. Saponificación del triesterato de glicerina

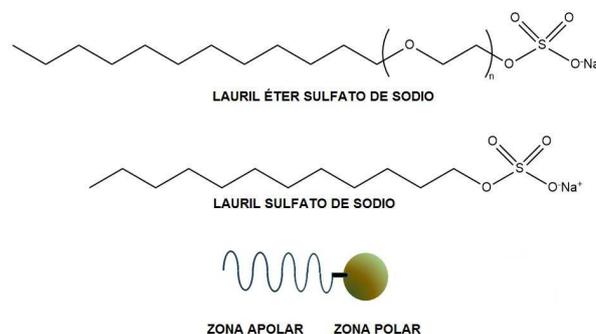


Figura 5. Carácter anfipático (anfifílico) de las sales alcalinas de los ácidos grasos presentes en jabones líquidos

son el lauril sulfato de sodio $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2\text{OSO}_3\text{Na}$ y el lauril éter sulfato de sodio $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2(\text{OCH}_2\text{CH}_2)\text{OSO}_3\text{Na}$, procedentes del aceite de coco y del aceite de palma, respectivamente. Presentan una particularidad fundamental en los jabones: dos extremos con propiedades diferentes (Figura 5).^[6]

La eficacia de los jabones líquidos radica en que sus tensioactivos tienen carácter anfipático: dos zonas de diferente polaridad: una lipófila y otra hidrófila. Cada zona busca moléculas semejantes, cumpliendo el axioma químico *similia similibus solvuntur* (semejante disuelve a semejante). Esta característica hace que actúen como emulsionantes capaces de dispersar un líquido, como la grasa, en el seno de otro, como el agua, en el que es inmisible. Durante el lavado de manos, la zona lipófila del tensioactivo, formada por la larga cadena alifática, busca moléculas semejantes, como los lípidos, y la zona hidrófila, localizada en el ión sulfato, se une a moléculas polares, como el agua, mediante puentes de hidrógeno.

En el proceso de desactivación del coronavirus, la zona lipófila de los componentes activos del jabón se introduce en la membrana lipídica del patógeno atraídas por la zona hidrofóbica de los aminoácidos, aprovechando las zonas más débiles donde se encuentran insertadas las proteínas, y a modo de palanca, las fragmentan, desligando a las proteínas y rompiendo la integridad estructural. Esto permite que se una a las moléculas de lípidos constituyentes de la membrana, formando agregados moleculares (micelas), que contienen las moléculas de lípidos y proteínas en su interior, rodeada y atrapada por la zona hidrófila del jabón (Figura 6). Como resultado de estas acciones, el material genético queda desprotegido y el coronavirus inactivado e incapacitado para infectar a células sanas. Finalmente, las micelas dispersadas en el agua forman una emulsión que es eliminada con el agua de lavado.

Si el tiempo de contacto entre el jabón y el patógeno es muy breve, solo se produce un debilitamiento de la membrana de un número limitado de virus. Por esta razón, para que la acción del jabón sea eficaz es necesario que actúe sobre toda el área de las manos (incluidas las uñas y el espacio interdigital) un tiempo mínimo,

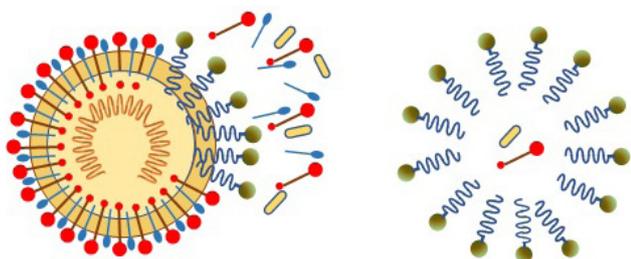


Figura 6. Ruptura de la membrana del virus por los tensioactivos del jabón y micela jabonosa encapsulando moléculas de lípidos y proteínas de la membrana (cortesía de J. M. Pons)

establecido en 20 s, de esta manera sobre la espuma se puedan formar eficientemente micelas alrededor de los lípidos que constituyen la membranas viral. Aunque la espuma no limpia por sí misma, cuanto más tiempo hagamos espuma con el jabón, mayor contacto habrá con las moléculas limpiadoras y mayor probabilidad de destruir el virus. Si nos lavamos las manos en un lugar público, es recomendable secarlas con una toallita limpia de papel y utilizar para cerrar el grifo y/o la puerta del baño, con el fin de evitar la posible contaminación de estas superficies.

Laboratorio: efecto emulsionante del jabón

Al añadir unas gotas de aceite en los dedos, frotarlos y mezclarlos con agua, observaremos que no desaparece la sensación grasienta y resbaladiza, por mucha agua que gastemos. Sin embargo, si añadimos un poco de jabón y frotamos los dedos aceitosos bajo el agua, percibiremos que esa sensación desaparece, lo que indica que los constituyentes del aceite se han separado de la superficie de la piel formándose una emulsión. Para poder analizar mejor el efecto del jabón, añadimos 50 mL de agua y 50 mL de aceite vegetal a un embudo de decantación. Se observa una mezcla heterogénea formada por dos fases inmiscibles, que aunque aparentemente se combinen al agitar, terminan separándose. Al añadir a la mezcla 5 mL de jabón líquido y agitar, comprobaremos que se mezclan las dos fases, formándose una emulsión estable (Figura 7).

Laboratorio: comprobación de la hidrólisis del jabón

Si realizamos la prueba de impregnar las manos con unas gotas del indicador ácido-base fenolftaleína y mojarlas con agua, no se produce cambio de color porque el agua es neutra. Al repetir la operación, pero está vez lavando las manos jabón, aparece una coloración violeta característica de las disoluciones básicas (Figura 8). Aunque los principios activos del jabón son sales neutras, se

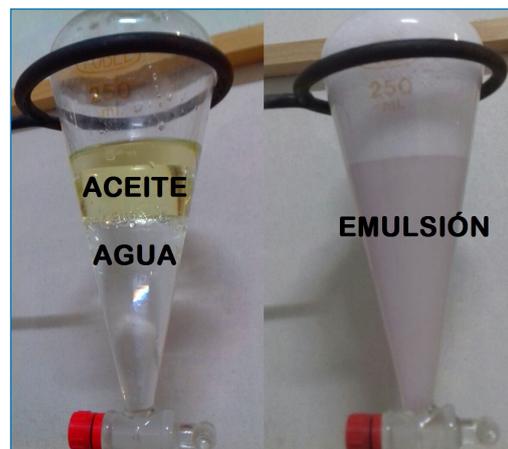


Figura 7. Formación de una emulsión por acción del jabón

produce una hidrólisis que alcaliniza la disolución. Este efecto no se produce si en vez de agua empleamos etanol.

Las sales de los jabones se puede considerar formadas por un catión que procede de una base fuerte (hidróxido de sodio o de potasio), y de un anión procedente de un ácido graso que es un ácido débil. El catión no reacciona con el agua, pero sí el anión, que capta un protón H^+ de la molécula de agua y se liberan iones OH^- en la disolución, aumentando su concentración ($[OH^-] > 10^{-7}$). Para que se mantenga constante el producto iónico del agua ($K_w = [H_3O^+][OH^-] = 10^{-14}$) la concentración de iones H_3O^+ tendrá que ser inferior a 10^{-7} y su $pH > 7$. Como resultado, las disoluciones de las sales neutras de los jabones, dan lugar a disoluciones acuosas básicas ($pH \approx 9$), detectable con el indicador fenolftaleína (punto de viraje $\approx 8,3$).



Figura 8. Coloración violeta de la fenolftaleína causada por la hidrólisis de las sales neutras del jabón

EL ALCOHOL FRENTE AL CORONAVIRUS

Cuando el agua y el jabón no están al alcance, las sustancias antisépticas que se aplican tópicamente sobre superficies corporales son eficaces para inhibir o eliminar microorganismos patógenos que podrían originar procesos infecciosos. Estos biocidas comprenden un amplio

grupo de productos químicos, de naturaleza muy variada, entre los que se encuentran, debido a su carácter anfipático, los alcoholes. Los más utilizados son el alcohol etílico (etanol) y el alcohol isopropílico (isopropanol), ambos muy solubles en agua y con actividad semejante. No está permitido utilizar el alcohol metílico (metanol) con este fin, debido a su toxicidad cuando se absorbe a través de la piel o cuando se ingiere, pudiendo causar vómitos, ceguera permanente, daños al sistema nervioso e incluso la muerte.

El alcohol farmacéutico es alcohol etílico desnaturado (*denat*) que contiene un aditivo antiséptico, como el cloruro de benzalconio (cloruro de alquildimetilbenzilamonio) al 0,1%, con el objetivo de amargar su sabor y hacerlo no apto para el consumo. Así, se reducen las intoxicaciones por ingestión accidental en los niños y se evita su utilización para elaborar bebidas alcohólicas caseras o bebidas ilegales que eviten pagar los impuestos especiales que gravan a este tipo de productos.

Los alcoholes alquílicos de cadena corta (hasta 4 carbonos), son muy solubles en agua, propiedad que disminuye al aumentar la longitud de la cadena, ya que aumenta su carácter hidrófobo. Las ramificaciones de la cadena aumentan la solubilidad en agua, así el alcohol isopropílico es más soluble que el propílico debido a que su ramificación disminuye la parte hidrófoba de la molécula. El isopropanol es menos polar que el etanol y disuelve mejor las sustancias orgánicas. Ambos alcoholes presentan propiedades bactericidas y son eficaces para desactivar algunos tipos de virus, como el coronavirus, por su capacidad para disolver la membrana externa lipídica que envuelve a los microorganismos y destruir la estructura de las proteínas, desnaturizándolas y haciendo que precipiten, impidiendo que se unan a los receptores de las células sanas.

La concentración del alcohol es un factor importante que condiciona su eficacia. Se considera que por debajo del 70%, disminuye su eficacia, al igual que si lo aplicamos sobre manos que están húmedas o sudorosas, por efecto de la dilución. Pero no siempre más es mejor, por encima del 90% se reduce su efecto debido a que el bajo porcentaje de agua no favorece la penetración del etanol en el coronavirus ni la consiguiente desnaturización de las proteínas.^[7]

Algunas bebidas alcohólicas contienen elevadas concentraciones de etanol, el menos tóxico de los alcoholes. La absenta y el vodka pueden alcanzar concentraciones superiores al 90% en volumen, por lo que podrían ser utilizados tópicamente como biocidas. El resto de bebidas alcohólicas, como la ginebra, whisky, vino, cerveza, etc., presentan concentraciones inferiores (entre el 3 y el 40%), y no serían eficaces para este fin. Pero si bien el alcohol, en la concentración adecuada, actúa como antiséptico en la piel, carece de eficacia ingerido en forma de bebida alcohólica, ya sea para combatir el virus en el aire inhalado, en la boca o dentro del organismo, y además es nocivo para el sistema inmunitario y la salud.

Los geles hidroalcohólicos comerciales contienen tres componentes fundamentales: etanol, el principal ingrediente activo, agua destilada, como diluyente, y glicerina, cuya función es proteger la piel evitando su deshidratación. Este viscoso humectante forma un gel que permita aplicar mejor el producto, a la vez que reducir la volatilidad del alcohol, permitiéndole actuar durante más tiempo frente a los microorganismos. El inconveniente que presenta el gel hidroalcohólico es que los patógenos, y sus restos, no se desprenden de la piel. Hay que esperar un tiempo (sobre 2 min) para que se evapore todo el alcohol, sin secarse con una toalla, de esta forma se garantiza una buena actividad antiséptica.^[8] Además, el volumen de alcohol utilizado debe ser el suficiente, unos 3 mL, para cubrir perfectamente toda la superficie de la mano y dorso, sin dejar ninguna zona sin tratar.^[9]

Tipos de geles hidroalcohólicos

Desde el punto de vista legal, la normativa clasifica a los geles con alcohol en dos categorías: antisépticos e higienizantes.

- Los geles antisépticos deben cumplir con el Reglamento (UE) 528/2012,^[10] son productos biocidas cuya finalidad es desinfectar la superficie de la piel destruyendo los microorganismos, disminuyendo el riesgo de contagio por contacto directo y evitando su propagación.
- Los geles higienizantes, deben cumplir con el Reglamento (UE) 1223/2009,^[11] son productos cosméticos cuya finalidad es limpiar las manos, retirando los gérmenes, suciedad e impurezas de su superficie. De esta forma disminuye el riesgo de propagación de la infección. No tienen efecto desinfectante para destruir bacterias ni virus, por tanto no pueden contener indicaciones de carácter biocida o antiséptico.



Figura 9. Pictogramas de peligro que deben llevar en el etiquetado los geles hidroalcohólicos antisépticos (inflamable y peligroso para la salud), según el reglamento CLP

La actual normativa no obliga a los fabricantes de geles hidroalcohólicos a indicar en su etiqueta el porcentaje de etanol, por lo que no siempre es posible conocer su concentración y propiedades. Para comprobar si un gel es biocida hay que acceder al listado de antisépticos para piel sana autorizados por la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios.^[12]

Los desinfectantes hidroalcohólicos tienen propiedades similares a los componentes de los jabones: doble afinidad polar-apolar. Pero menos acentuado, por ello se necesita una alta concentración, entre el 70% y el 90%, para conseguir una eficacia semejante a la del jabón.

La parte hidrofílica del alcohol se encuentra localizada en el grupo polar hidroxilo, lo que permite que pueden combinarse con otras moléculas polares, como el agua, formando enlaces intermoleculares por puente de hidrógeno. La parte lipofílica, se localiza en la cadena de carbonos, facilitando la unión con regiones apolares de los lípidos, alterando así sus funciones, y desnaturalizando a las proteínas, al debilitar las atracciones por puente de hidrógeno que unen las cadenas. El hecho de que las moléculas orgánicas que constituyen el coronavirus (lípidos, proteínas, ARN, etc.), se encuentren unidas por fuerzas intermoleculares, más débiles que las fuerzas debidas a enlaces interatómicos covalentes, facilita que las moléculas se disgreguen y pierdan su funcionalidad.

Laboratorio Anti-COVID-19: preparación de un gel desinfectante

Una de las formulaciones recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS-1) para la desinfección de manos propone como reactivos, el alcohol etílico al 96% como agente activo, agua destilada o hervida como diluyente, glicerina al 98% para minimizar la deshidratación que produce el etanol y peróxido de hidrógeno al 3% para eliminar la posible contaminación por esporas.^[13] Para preparar 1 L de gel, medir 833 mL de etanol (o 752 mL de isopropanol, en la formulación OMS-2) con una probeta y añadir a un matraz aforado de un litro. Medir 41,7 mL de peróxido de hidrógeno al 3% y 14,5 mL de glicerina y verter ambos reactivos al matraz. Rellenar con agua hasta la línea de aforo, tapar y agitar suavemente para homogeneizar bien la mezcla. Para su uso, introducir en un bote con dispensador de pipo, indicando la fórmula y concentración final del etanol.

En las recomendaciones de la OMS se indica que la concentración final del etanol así preparado es del 80% (v/v), lo que se puede comprobar experimentalmente con un alcoholímetro, admitiéndose límites aceptables del 5% de la concentración deseada (75%-85%) o haciendo los cálculos correspondientes. Partiendo de que la cantidad de etanol en la disolución concentrada y en la diluida es la misma, se cumplirá la ecuación de la dilución de mezclas:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

donde C_1 es la concentración inicial del etanol (96%), V_1 es el volumen de etanol a diluir con agua (833 mL), C_2 es la concentración del etanol diluido que se quiere preparar y V_2 es el volumen de disolución de un litro que queremos preparar. Despejando y sustituyendo los datos, se comprueba que la concentración es del 80%:

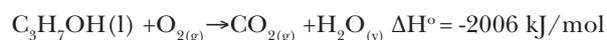
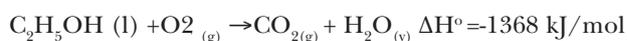
$$C_2 = C_1 \cdot V_1 / V_2 = 96\% \cdot 0,833 \text{ L} / 1 \text{ L} = 80\%$$

Esta fórmula supone que los volúmenes de etanol y agua son aditivos, sin tener en cuenta la contracción de volumen debido a la formación de puentes de hidrógeno.

Laboratorio: evaluación de la concentración de etanol en un gel hidroalcohólico

Para obtener una medida directa, y aproximada, de la concentración de etanol en una mezcla hidroalcohólica se utiliza un densímetro alcoholímetro graduado a 20°C, instrumento basado en el Principio de Arquímedes. La densidad del etanol a 20°C es de 0,797 g/mL, inferior a la del agua, por lo que el densímetro se sumergirá más a medida que disminuya su concentración. La obtención de una concentración (v/v) inferior al 70% (admitiéndose un margen de error del 5%) en un gel hidroalcohólico analizado indicará que no tiene propiedades antisépticas ni biocidas, solo higienizantes o limpiadoras, por tanto, no es eficaz frente al coronavirus. Además de agua y etanol, el gel contiene otros solutos no volátiles, como la glicerina, pero debido a su baja concentración no alteran significativamente los resultados de la prueba.

Para estimar de forma aproximada el grado alcohólico de un gel, se puede utilizar una prueba basada en la inflamabilidad del etanol e isopropanol. Alcoholes que emiten vapores inflamables a partir de 13°C y 12°C (punto de inflamación), respectivamente, valores que aumentan con la dilución. Para que ardan sin fuente de ignición (punto de autoinflamación) tienen que alcanzar una temperatura de 363 y 425°C, respectivamente, siendo difícil que prendan por exposición directa al Sol, donde no se superan dichas temperaturas^[14] La adición de pequeñas cantidades de glicerina aumenta levemente la viscosidad y reduce ligeramente la volatilidad e inflamabilidad de la mezcla. Cuando estos alcoholes arden lo hacen con una llama azulada poco luminosa y sin generar humo, según las ecuaciones de combustión:



Si a temperatura próxima a 20 °C, se aproxima una cerilla encendida a un hidrogel del 70% en etanol, se comprueba que los vapores de alcohol se inflaman. Pero si el gel se diluye con suficiente cantidad de agua,

el porcentaje de etanol en el vapor es tan bajo que no se produce la combustión. Así, al mezclar 4 mL del gel al 70% con 1,5 mL de agua y aproximar la llama de una cerilla, la disolución arde, pero no lo hace cuando se mezcla con 2 mL de agua. Tomando como referencia que a concentraciones inferiores al 47%, el gel hidroalcohólico no se inflama con una cerilla.

La prueba de combustión con cerilla se puede utilizar como un método didáctico para dilucidar si un hidrogel alcohólico está correctamente etiquetado. Por ejemplo, al mezclar 4 mL del hidrogel marca *Aptonia* con 1,5 mL de agua y aproximar una cerilla encendida, no se produce la combustión (Figura 10). Evidencia de que su concentración en etanol no alcanza el 70%. Es solo un gel higienizante, que no puede ser etiquetado como antiséptico porque no protege frente al patógeno.

LOS DESINFECTANTES FRENTE AL CORONAVIRUS

La OMS advierte de la posibilidad de que las gotículas respiratorias, procedentes de personas infectadas, puedan contaminar objetos (encimeras, barandillas, interruptores, pomos, grifos, teléfonos, teclados y ropa), lo que produce fómites (superficies contaminadas), desde donde el coronavirus puede transferirse a las personas. Si bien no existen informes concluyentes, dada la dificultad de diferenciar entre la transmisión por gotículas respiratorias y por fómites, se recomienda inactivarlos mediante la aplicación de productos desinfectantes cotidianos, como la lejía y el agua oxigenada.^[15]

Lejía (disolución de hipoclorito de sodio)

El compuesto clorado más recomendado como agente eficaz en la eliminación de ciertos virus, como el coronavirus, bacterias y microorganismos, es el hipoclorito de sodio (NaClO), que en disolución acuosa se conoce comercialmente como lejía. Se caracteriza por un fuerte y penetrante olor y un color verde-amarillento. Por su alta capacidad de desinfección es utilizado en diferentes ámbitos, desde el hogar hasta hospitales e industrias: potabilización de aguas residuales, tratamiento de piscinas,

limpieza de frutas y verduras, desodorizante contra los malos olores, blanqueador de ropa, etc.

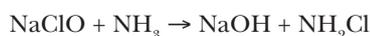
La concentración de la lejía se expresa en %, referido a masa-volumen. Por normativa, la concentración en la lejía doméstica debe ser inferior al 5%. Su efecto desinfectante se basa en su carácter oxidante, que incluso a concentraciones muy bajas, del orden del 0,5%, es capaz de inactivar el coronavirus, según la OMS. Para obtener el máximo efecto, después de ser aplicado, debe permanecer unos 10 minutos sobre la superficie a desinfectar. No debe ser pulverizada sobre el cuerpo porque es irritante y daña la piel y los ojos (Figura 11).

La sustancia activa responsable del efecto biocida de la lejía es el ácido hipocloroso, que se forma a partir de la disolución acuosa de hipoclorito de sodio.



El ácido hipocloroso se disocia parcialmente formando el ión hipoclorito. Tanto la forma disociada como la no disociada, son oxidantes capaces de romper la membrana del coronavirus y los enlaces químicos de sus moléculas, alterando las proteínas e inactivando los sistemas enzimáticos y el material genético del patógeno. Como consecuencia desactiva estructuras esenciales para su reproducción.

Es muy importante no mezclar lejía con otros productos químicos limpiadores pensando que así aumentará su poder desinfectante. En el etiquetado de la lejía se incluye la indicación EUH206 (No utilizar junto a otros productos, pueden desprender gases peligrosos). Según el Servicio de Información Toxicológica (SIT), la intoxicación más frecuente en los hogares se produce al mezclar lejía con amoníaco, debido a que se genera un gas muy tóxico, la cloramina (NH₂Cl), según se indica en la ecuación:



La cloramina, al entrar en contacto con las mucosas produce una sustancia muy corrosiva, cloruro de hidrógeno, que puede causar daños graves en el sistema respiratorio.

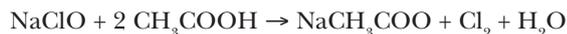
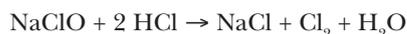


Figura 10. Prueba de combustión de hidrogeles alcohólicos



Figura 11. Etiqueta con indicaciones y pictogramas de peligro de la lejía doméstica: corrosiva y peligrosa para el medio ambiente

También es peligroso mezclar lejía con productos que contienen disoluciones acuosas de ácidos, como el salfuman o agua fuerte (ácido clorhídrico, HCl) o vinagre (ácido acético, CH₃COOH). En medio ácido, el ión hipoclorito oxida el ión cloruro a cloro, un gas tóxico muy peligroso, según los procesos redox siguientes:



Laboratorio Anti-COVID-19: preparación de una disolución de hipoclorito de sodio al 0,5%

La lejía comercial industrial se presenta en concentraciones entre el 0,5% y el 5%. Para la desinfección de superficies contaminadas por el coronavirus, la OMS recomienda utilizar una disolución de hipoclorito de sodio del 0,5%, que equivale a 5.000 ppm o 5 g/litro. La ecuación de la dilución permite calcular el volumen de una lejía de uso doméstico de concentración del 4% necesario para preparar un litro de una lejía de concentración del 0,5%:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

donde C₁ es la concentración inicial de la solución de lejía concentrada (4%), V₁ es el volumen de lejía a calcular, C₂ es la concentración de la solución diluida a preparar (0,5%) y V₂ es el volumen de solución final que queremos preparar (1 litro).

Sustituyendo los datos y despejando, resulta que se necesitan 125 mL de lejía del 4%, y el resto de agua fría, hasta enrasar a un litro. No hay que utilizar agua caliente porque el NaClO se descompone formando gas cloro, disminuyendo la concentración y aumentando el peligro en caso de inhalación.

$$V_1 = C_2 \cdot V_2 / C_1 = 0,5\% \cdot 1\text{L} / 4\% = 0,125 \text{ L}$$

Para preparar la lejía diluida, medir 125 mL de lejía al 4% con una probeta y verter a un matraz aforado de un litro. A continuación, añadir agua hasta la línea de aforo, tapar y agitar para mezclar bien los componentes. Etiquetar el matraz indicando el reactivo, la concentración y la fecha de preparación. Estas soluciones son inestables y se descomponen con el tiempo, perdiendo su eficacia desinfectante. Por esta razón, es recomendable que se preparen diariamente antes de ser utilizadas y que se conserven en recipientes herméticos.^[16]

Agua oxigenada (peróxido de hidrógeno)

Dentro del grupo de desinfectantes de superficies, y en la categoría de oxidantes, se encuentra el peróxido de hidrógeno. Debido a su elevada polaridad es un líquido muy soluble en agua. La reducción del peróxido dando

agua y oxígeno, mediante ruptura heterolítica, es un proceso termodinámicamente favorable, pero lento debido al enlace relativamente fuerte O-O, velocidad que aumenta considerablemente en presencia de catalizadores.



El peróxido de hidrógeno farmacéutico se presenta en concentraciones diluidas que van del 3% al 5% referido a masa/volumen (Figura 12). La concentración se suele indicar también en volúmenes, indicando los litros de oxígeno que puede producir un litro de solución de H₂O₂, en condiciones normales de presión y temperatura. Por ejemplo, una concentración al 3% (m/v), equivale a un agua oxigenada de 10 volúmenes, lo que indica que 1 litro de la misma puede generar 10 litros de oxígeno.

En los hogares, el agua oxigenada se suele utilizar como antiséptico doméstico para curar pequeñas heridas, debido a la actuación de la enzima catalasa, presente en la sangre, que cataliza su descomposición liberando oxígeno, gas responsable de la destrucción de bacterias anaeróbicas. Es útil también para desinfectar lentes de contacto y eliminar irritaciones en la boca. La OMS recomienda el peróxido de hidrógeno como uno de los agentes eficaces para desinfectar una amplia gama de microorganismos presentes en las superficies y así evitar su propagación, entre ellos el coronavirus, en concentraciones superiores al 0,5% y dejando actuar el producto durante varios minutos.

La actividad antiséptica del peróxido de hidrógeno se debe a su poder oxidante frente a los grupos funcionales de las macromoléculas orgánicas constituyentes del coronavirus. Por ejemplo, oxida a los grupos sulfhidrilo o tiol (-SH) que se encuentran formando puentes disulfuro en las proteínas, causando su desnaturalización. Como resultado de la ruptura homolítica del enlace O-O presente en el peróxido, se forman radicales libres muy reactivos (grupos hidroxilo: -OH),^[17] que actúan fragmentando las membranas lipídicas de los microorganismos y uniéndose a las enzimas para desactivarlas y alterar las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos. Así, consigue modificar la estructura del ARN, alterando la información genética y evitando la propagación del patógeno.

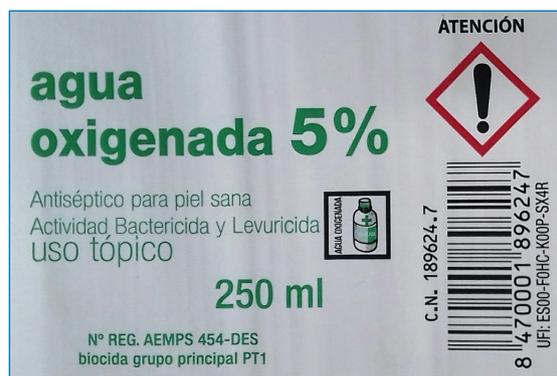


Figura 12. Etiqueta con indicación de la concentración y pictograma de peligro del peróxido de hidrógeno farmacéutico

Laboratorio Anti-COVID-19: preparación de una disolución de peróxido de hidrógeno al 0,5%

Para preparar un litro de una disolución diluida de H_2O_2 al 0,5%, eficaz para eliminar el coronavirus en las superficies, a partir de otra del 3%, hay que calcular el volumen de disolución concentrada necesario mediante la ecuación de la dilución:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

donde, $C_1 = 3\%$, $C_2 = 0,5\%$, $V_2 = 1 \text{ L}$

sustituyendo, $V_1 = C_2 \cdot V_2 / C_1 = 0,5\% \cdot 1\text{L} / 3\% = 0,167 \text{ L}$

El método consiste en medir 167 mL de H_2O_2 al 3% con una probeta y verter a un matraz aforado de un litro. Rellenar con agua hasta la línea de aforo, tapar y homogeneizar la mezcla. Para conservar la disolución hay que utilizar un recipiente opaco, porque el enlace covalente entre los dos átomos de oxígeno del peróxido de hidrógeno es susceptible de romperse al interactuar con la luz. Finalmente, etiquetar con la fórmula, concentración y fecha del agua oxigenada preparada.

Para obtener la concentración expresada en volúmenes de oxígeno del H_2O_2 al 0,5% (m/v), se calcula primero la concentración molar M:

$$M = n^\circ \text{ mol} / V = [5\text{g} / (34 \text{ g/mol})] / 1 \text{ L} = 0,15 \text{ mol/L}$$

Como en la descomposición de dos moles de H_2O_2 se forma un mol de O_2 , con 0,15 moles de H_2O_2 se formarán la mitad de moles de O_2 (0,15/2), lo que equivale a un volumen de 1,7 L de O_2 , en condiciones normales:

$$0,15/2 \text{ mol } O_2 \cdot (22,4 \text{ L en c.n.}) = 1,7 \text{ L de } O_2$$

LA QUÍMICA QUE SE ESCONDE EN LAS MASCARILLAS

Una de las vías de transmisión del virus es por contacto directo con las micropartículas nasofaríngeas (gotitas de Flügge) expelidas por las personas infectadas, no solo al estornudar o toser sino también al hablar y respirar.^[18] Estas partículas se clasifican según su tamaño:

- Gotículas con un diámetro entre 100 y 1.000 μm (0,1 a 1 mm), dado que el diámetro del coronavirus es muy pequeño, del orden de 0,1 μm ,^[19] cada gota puede albergar hasta 50.000 coronavirus, que caen al suelo por efecto gravitatorio, con un alcance entre 1 y 2 m.
- Y partículas menores de 100 μm (aerosoles), que permanecen suspendidas durante varias horas en el aire y, aunque con mucho menor carga viral (6 coronavirus por gota), se transmiten a mayor distancia.^[20] El sistema más eficaz, para evitar el contagio directo del virus a través del aire, es el

uso correcto de las mascarillas. Un objeto de uso personal convertido en artículo habitual e imprescindible para la salud de todos.

Clasificación de las mascarillas

En un primer momento, ante la escasez de mascarillas sanitarias para médicos y enfermeros, la OMS recomendaba a la población utilizar las mascarillas higiénicas, destinadas a personas sin síntomas y diseñadas para disminuir el riesgo de contagio ante la imposibilidad de mantener el distanciamiento social. Este tipo de mascarillas no están diseñadas para proteger a la persona que la usa, sino para evitar que las gotículas de saliva exhaladas se dispersen en el aire y contagien a otras personas. Dado que su eficacia respecto a las pequeñas partículas no es muy alta, no están catalogadas como equipo de protección individual (EPI). Deben cumplir las especificaciones: UNE-0064-1 (adultos, no reutilizables), UNE-0064-2 (niños, no reutilizables) y UNE-0065 (adultos y niños, reutilizables). Si bien, en entornos de bajo riesgo y ventilados (vías públicas, comercios, supermercados, aulas) las mascarillas higiénicas son apropiadas. En entornos más expuestos (hospitales, residencias, transporte público, aulas con 30 alumnos y sin ventilación, etc.), son recomendables las mascarillas sanitarias clasificadas como EPI, que reducen el número de partículas y gérmenes del aire que inhala el portador. Se clasifican en 3 categorías, según la mínima capacidad de filtración de partículas: FFP1 (78%), FFP2 (94%) y FFP3 (98%). Deben estar fabricadas de acuerdo a la norma UNE-EN 149-200.

Las mascarillas FFP1 no son recomendadas para los médicos, porque no evitan que se contagien. Son aptas para evitar inhalar partículas no tóxicas (polvo de ladrillo, cemento, carbón, serrín y polen). Las FFP2 y FFP3, son recomendadas para proteger de partículas muy finas tóxicas (plomo, amianto) y agentes patógenos (virus, bacterias), tanto al que las usa como a las personas próximas, siendo especialmente indicadas para profesionales sanitarios que trabajan en contacto directo con pacientes infectados por el virus y expuesto a altas concentraciones. En cualquier caso, el uso de la mascarilla, con independencia del tipo, no garantiza una protección total frente al contagio, habida cuenta de que ninguna protege los ojos, otra posible vía de entrada del virus. Además, si no se ajusta correctamente a la cara, el aire se cuela por los bordes donde hay menos resistencia, en vez de por las capas de la mascarilla, perdiendo su eficacia. Por ello, es vital el uso correcto de las mascarillas y complementarlo con el resto de medidas preventivas, tanto higiénicas como de distanciamiento y ventilación.

Funcionamiento de las mascarillas

El mecanismo de filtración de las mascarillas no se basa en actuar como un simple colador, que retiene a las

partículas que por su tamaño no pueden pasar a través de los poros del filtro. Las dimensiones de los huecos entre las fibras son mucho mayores que las de las partículas que portan los virus. En caso contrario, no se respiraría bien. La actuación de las mascarillas se basa en que las partículas que se encuentran en el aire respirado, independiente de su tamaño, entren en contacto directo con sus fibras. Las fuerzas de atracción de Van der Waals entre moléculas son las responsables de que las partículas se queden unidas y no atraviesen la mascarilla. Cuantas más capas tenga, aumenta la probabilidad de retener a las partículas. Especialmente a las de mayor tamaño ($> 0,5 \mu\text{m}$), que se mueven en línea recta, y a las más pequeñas ($< 0,1 \mu\text{m}$), que se mueven aleatoriamente en zig-zag con movimiento Browniano, debido a las colisiones con las moléculas del aire. Las partículas de tamaño intermedio (entre $0,1$ y $0,5 \mu\text{m}$), son las más difíciles de retener porque fluyen con el aire bordeando la fibra y no se mueven en línea recta. Estas partículas quedan retenidas por atracción electrostática, gracias al campo eléctrico permanente que han adquirido las fibras de las mascarillas FFP2 y FFP3, mediante un tratamiento previo de electrificación que aumenta su eficacia diez veces.^[21] Con el uso, al ir humedeciéndose, van perdiendo la carga electrostática y su eficacia, por lo que hay que sustituirlas después de utilizarlas durante unas horas (4 a 6 h). La fracción de partículas con un tamaño crítico de $0,3 \mu\text{m}$ (PM03) que son retenidas por una mascarilla determina la eficacia de filtración de partículas (PFE) en la normativa.

Composición de las mascarillas

Las mascarillas higiénicas son las más económicas y utilizadas, pero las que ofrecen una menor protección. Generalmente, están formadas por tres capas de “tejido no tejido” (TNT o, en inglés, *non woven*); material creado a partir de un polímero fundido (normalmente polipropileno, aunque pueden ser otros: PE, PA, PET), formado por una red de fibras unidas mediante procesos térmicos, mecánicos o químicos. Al no pasar

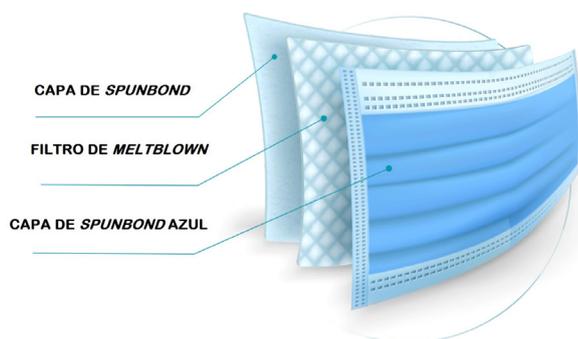


Figura 13. Mascarilla higiénica de 3 capas SMS: la exterior (azulada), hace de barrera a partículas grandes líquidas y sólidas, la intermedia, de barrera bacteriológica y vírica, y la interna, absorbe la humedad y protege la piel (hipoalérgica)

por un telar, ni ser tejidas, se consiguen láminas, de fibras microscópicas formadas por cientos de capas con un tamaño de poro muy pequeño. Según el proceso industrial, a partir del polipropileno es posible obtener materiales laminados con diferentes características, como spunbond (S) y meltblown (M), capas que se pueden combinar para mejorar las propiedades filtrantes. Las capas externa e interna de la mascarilla higiénica están hechas de TNT *spunbond*, con alta resistencia a la tracción y agresiones biológicas, hipoalérgico, de baja inflamabilidad e hidrofóbico. La capa intermedia, es de TNT *meltblown*, formado por un filtro de microfibras muy finas (de 1 a $2 \mu\text{m}$), que se apilan mediante uniones porosas tridimensionales, lo que le confiere a este material excelentes propiedades de filtración. Esta combinación trilaminar SMS de “tejido no tejido”, constituye una barrera capaz de bloquear los gérmenes patógenos de los fluidos por sus propiedades hidrofóbicas, consiguiendo que el tejido no se moje y que el agua se mantenga sobre él, debido a la tensión superficial. En el caso de que se utilicen materiales que no repelan el agua de forma natural, se les somete a un acabado químico hidrófobo a base de siliconas y parafinas.

Las mascarillas quirúrgicas, en su mayoría, también están formadas por tres capas y son semejantes a las mascarillas higiénicas, pero están clasificadas como producto sanitario y deben cumplir una normativa diferente (UNE-EN 14683:2019).

Las mascarillas FFP2 y FFP3, contienen más capas o filtros que las higiénicas; cuatro o cinco (Figura 14). Algunos modelos incorporan una válvula de exhalación para facilitar la expulsión de aire y evitar la condensación, pero como no filtran el aire exhalado, no protegen a los que están a su alrededor. Las capas internas filtrantes generalmente están compuestas de fibras de polipropileno, con un diámetro de unos $5 \mu\text{m}$, y poros entre 10 y $20 \mu\text{m}$. Presentan propiedades electrostáticas para retener con mayor eficacia las partículas de

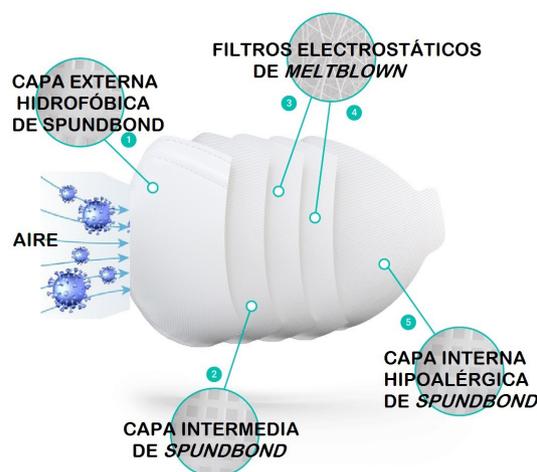


Figura 14. Mascarilla sanitaria de 5 capas: combinación SSMMS



Figura 15. Comprobación de la impermeabilidad de una mascarilla



Figura 16. Comprobación de la incombustibilidad de un filtro

tamaño intermedio, la cual aumenta con el grosor del filtro^[22] Por esta razón, las mascarillas FFP3, que son las que tienen mayor nivel de estratificación de fibras, presentan mayor grado de filtrado, y las recomendadas para labores sanitarias de riesgo, como por ejemplo, entubar a pacientes en la UCI.

Como experiencias didácticas, que pueden ser útiles como controles de calidad para identificar imitaciones, se pueden realizar dos pruebas: la del agua y la del fuego.

Laboratorio: prueba del agua

Colocar una mascarilla higiénica, ahuecada a modo de filtro, sobre un soporte con aro metálico (Figura 15). Con una probeta verter encima 50 mL de agua. El agua no debería atravesar el tejido hidrófobo ni gotear. A continuación, sujetar la mascarilla con las manos y agitarla suavemente; el agua debe moverse sobre la superficie y no empapar el tejido. Si se golpea ligeramente la parte inferior de la mascarilla contra una servilleta de papel, esta debe permanecer seca, indicando que la mascarilla es impermeable y ofrece suficiente protección frente a la humedad al hablar. En el caso de que la servilleta se humedeciera, indicaría que el material de la mascarilla no es impermeable y es fraudulenta.

La tensión superficial del agua es responsable de que sus moléculas tiendan a no dispersarse, como consecuencia de fuerzas intermoleculares de cohesión originadas por puentes de hidrógeno, reduciendo su superficie y formando gotas y películas que ofrecen resistencia a romperse. Cuando estas fuerzas son mayores que las fuerzas de adhesión entre el líquido y el sólido con el que está en contacto, el líquido no mojará el sólido. Esto explica las propiedades hidrófobas del material de las mascarillas.

Si ahora, añadimos al agua unos mililitros de etanol (o jabón líquido) o pulverizamos el etanol sobre la capa externa de la mascarilla, el agua es absorbida y se filtra;

la mascarilla deja de ser impermeable. Estos productos disminuyen la tensión superficial del agua y la capacidad filtrante de las fibras del filtro, enlazadas mediante enlaces débiles que se rompen por sustancias deshidratantes (etanol) o con pH básico (jabones y detergentes).

Al dejar secar totalmente la mascarilla y repetir la prueba del agua, se comprueba que vuelve a ser impermeable. Sin embargo, aunque aparentemente no se detecte, las propiedades de retención electrostática y filtradoras de las fibras en las mascarillas no reutilizables (NR) son alteradas y pierden su eficacia. Las únicas mascarillas que se pueden reutilizar son las reciclables (R), fabricadas con materiales que pueden lavarse e higienizarse, siguiendo las indicaciones del fabricante.

Laboratorio: prueba del fuego

Cortar una mascarilla higiénica, con una tijera, por los laterales para extraer el filtro de la capa intermedia. Colocarlo en un soporte y acercar la llama de una cerilla al filtro (Figura 16). Las mascarillas homologadas contienen un filtro de polipropileno ignífugo, resistente al fuego, que se funde por el calor desprendido en la combustión de la cerilla, a una temperatura próxima a 170° C y sin formar llama.

En el caso de que la capa filtrante estuviera formada por un simple papel, se inflamaría fácilmente y ardería. Prueba de que el filtro es una imitación y no está homologado, por lo que incumpliría la normativa y no evitaría la entrada de gérmenes nocivos.

CONCLUSIONES

En todos los centros escolares, se deberían impartir charlas divulgativas de forma colectiva para incrementar el conocimiento sobre el modo de utilización y de actuación de las mascarillas y sustancias químicas que contie-

nen los productos cotidianos recomendados en la lucha contra el COVID-19 y, a la vez, concienciar sobre la necesidad de la higiene personal y del uso de las mascarillas en el bienestar común.

Dentro de las asignaturas que incluyen contenidos de química en las aulas de enseñanzas medias, los principios activos y productos eficaces para contrarrestar la propagación de la pandemia viral, pueden ser aprovechados para convertirse en un interesante recurso didáctico. Con el que conseguir, por un lado, que el estudiante aplique de forma práctica sus conocimientos y, por otro, que compruebe las implicaciones de la Química en la sociedad y en la salud.

Con carácter general, todos los ciudadanos deberían tener unos conocimientos científicos básicos, para que puedan tomar decisiones informadas que afectan tanto a su propia salud como a la colectiva, y no dejarse engañar por la desinformación y bulos que inundan los medios de comunicación, ni depender exclusivamente de supuestos expertos que sesgan la información científica a su conveniencia.

ÚLTIMAS INVESTIGACIONES

Los resultados de las últimas investigaciones científicas, indican que el coronavirus SARS-CoV-2 se transmite principalmente a través del aire, por contagiados que exhalan gotículas, y sobre todo, aerosoles. El contagio indirecto, a través de objetos y fómites, resulta poco probable.^[23] Esto no significa que haya que dejar de lavarse las manos con jabón y usar el gel hidroalcohólico. Pero no es tan prioritario concentrar esfuerzos en desinfectar la ropa, fregarlo todo o fumigar paredes y edificios que nadie va a tocar, lo que se ha llamado el “teatro de la pandemia”. Es preferible centrarse en usar correctamente las mascarillas, mejorar la ventilación e instalar purificadores de aire.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Scientific briefing: Vías de transmisión de SARS-CoV-2. OMS, julio, 2020.
- [2] Webinar Feique. *La química, esencial frente al COVID-19*. Federación Empresarial de la Industria Química Española. 2020. <https://youtu.be/HpJ9chEfsY0>
- [3] K. Carroll *et al.* *Microbiología médica*. McGraw-Hill Interamericana. 27.^a edición, cap. 41, págs. 573-574, 2016.
- [4] R. Chang. *Química*. Ed. McGraw-Hill. 2010.
- [5] P. Hegde, Pete *et al.* Microbial contamination of "In use" bar soap in dental clinics. *Indian Journal of Dental Research* **2006** 17(2):70-3. DOI: 10.4103/0970-9290.29888.
- [6] I. Regla *et al.* La química del jabón y algunas aplicaciones. *Revista digital UNAM*. **2014** 15(5) Art. 38.
- [7] W. Rutala, D. Weber. *Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities*, 2008, 39-40. Centers for Disease Control and Prevention. 2019. <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/disinfection>
- [8] Manual técnico de referencia para la higiene de las manos OMS. 2009. <https://www.who.int/gpsc/5may/tools/es/>
- [9] W. Zingg, T. Haidegger y D. Pittet. Hand coverage by alcohol-based handrub varies. *American Journal of Infection*. **2016** 44 (12) DOI:10.1016/j.ajic.2016.07.006.
- [10] Reglamento (UE) n.º 528/2012 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2012, relativo a la comercialización y el uso de los biocidas. <http://data.europa.eu/eli/reg/2012/528/oj>
- [11] Reglamento (CE) n.º 1223/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2009, sobre los productos cosméticos. <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/1223/oj>
- [12] Antisépticos para piel sana autorizados por la AEMPS. 2020. <https://www.aemps.gob.es>
- [13] Formulaciones recomendadas por la OMS para la desinfección de las manos. 2010. <https://www.who.int/gpsc/5may/tools/es>
- [14] Fichas Internacionales de Seguridad Química. INSST. 2020. <https://www.insst.es/fisq>
- [15] G. Kampf *et al.* Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *Journal of Hospital Infection*, **2020** 104, 246-251. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.01.022>
- [16] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). NTP 429: *Desinfectantes: características y usos más corrientes*. 1996.
- [17] I. Bertini, H. Gray, E. Stiefel, J. Valentine. *Biological Inorganic Chemistry*. University Science Books, California. 2007.
- [18] A. Bax *et al.* Transmission via speech-generated respiratory droplets. www.thelancet.com/infection, **2021** 21, 318. DOI: 10.1016/S1473-3099(20)30726-X.
- [19] Z. Varga *et al.* Electron microscopy of SARS-CoV-2: a challenging task. *The Lancet*. **2020** 935. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31185-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31185-5)
- [20] L. Anderson *et al.* Consideration of the Aerosol Transmission for COVID-19 and Public Health. *Risk Analysis*. **2020** 40. <https://doi.org/10.1111/risa.13500>
- [21] The astounding physics of N95 mask. 2020. <https://youtu.be/eAdanPfQdCA>
- [22] J. Courty, É. Kierlik ¿Cómo funcionan las mascarillas de protección respiratoria? *Investigación y Ciencia*. **2020** 524.
- [23] E. Goldman. Exaggerated risk of transmission of COVID-19 by fómites. *The Lancet*. **2020** 20. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30561-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30561-2)

Figura manipulativa para la didáctica de la Tabla Periódica y sus grupos

Pablo Cassinello Espinosa

Resumen: Se propone una figura manipulativa y lúdica de la Tabla Periódica. Se trata de un caleidociclo que es una figura tridimensional realizada por plegado de una plantilla plana. Consta de 4 caras distintas que pueden cambiarse con sencillos movimientos. En este caleidociclo se han recogido todos los elementos de la Tabla Periódica cuidando muchos aspectos didácticos y de forma organizada, pues se agrupan sus elementos divididos en los 4 bloques dependiendo de la configuración electrónica externa. Se pretende conseguir un aprendizaje más motivante y didáctico de la Tabla Periódica.

Palabras clave: Sistema periódico, grupos o familias, bloques de elementos, metales, no metales.

Abstract: A manipulative and playful figure of the periodic table is proposed. It is a kaleidocycle: a three-dimensional figure made from a flat template, consisting of 4 different faces that can be changed with simple movements. In this kaleidocycle, the entire periodic table has been collected, taking care of many didactic aspects and in an organized way, since its groups of elements are divided into the 4 known blocks according to the external electronic configuration. It is intended to achieve a more motivating, didactic and exciting learning of the periodic table.

Keywords: Periodic system, groups or families, element blocks, metals, non-metals.

INTRODUCCIÓN

En el año 2019 se conmemoraban los 150 años de la creación de la primera Tabla Periódica establecida por Dimitri Mendeleiev. Como profesor de química en un instituto de secundaria, me planteé cómo mejorar el estudio de la Tabla Periódica para que fuera más motivante y didáctico para mis estudiantes. Se me ocurrió utilizar la figura que presento en este trabajo. Es un dispositivo lúdico manipulativo que permite tener toda la tabla periódica en la palma de la mano. Está pensado como una herramienta para motivar a los estudiantes en el aprendizaje del sistema periódico. La figura base

se llama caleidociclo (kaleidocycle en inglés). Es una figura tridimensional que se obtiene por plegado de una plantilla plana. Consta de cuatro caras distintas, consistentes en una yuxtaposición de rombos. Por manipulación sencilla puede cambiarse y escogerse una de las caras. En estas caras pueden presentarse 4 dibujos o fotografías distintas. La figura fue diseñada en los años treinta del siglo xx por el matemático americano Stone y dada a conocer al mundo por Martin Gardner.^[1] El resultado final elaborado a partir de la plantilla consiste en una figura divertida y manipulativa.

Pretendí utilizar esta figura base o genérica para conseguir un aprendizaje más motivante de la tabla periódica. Después de muchos intentos infructuosos conseguí plasmar finalmente, en esas 4 caras toda la tabla periódica de manera organizada. El criterio didáctico que se escogió para esta organización fue el de mostrar o enseñar los 4 grupos o bloques en que se divide la tabla periódica cuando se realiza una clasificación de los elementos atendiendo a la estructura electrónica. Como quería que la figura fuera un elemento didáctico añadí a la tabla original, algunos aspectos que no suelen recogerse como el nombre de cada uno de los grupos representativos. También añadí el número de oxidación



P. Cassinello
Espinosa

Departamento de Física y Química
IES Diego Velázquez
Calle del Instituto, 1, 28250 Torrelozón, Madrid
C-e: pbcasti@gmail.com

Recibido: 17/12/2020. Aceptado: 01/04/2021.

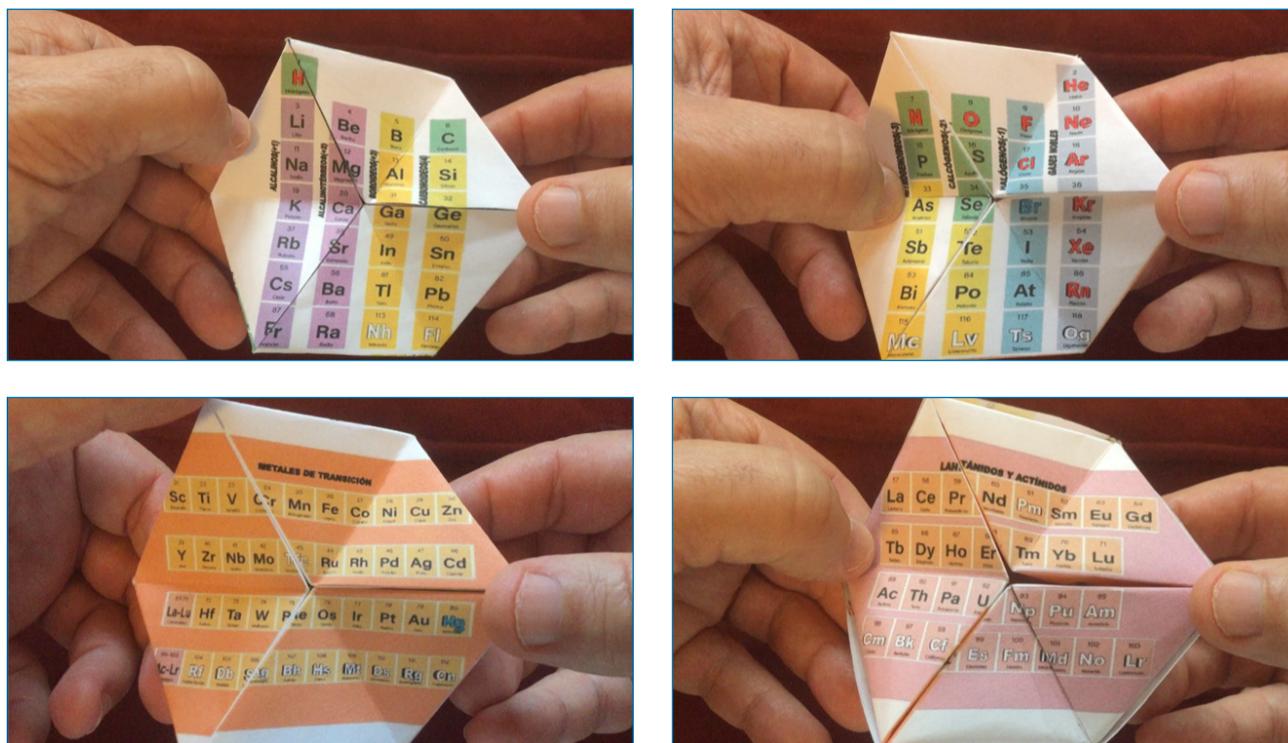


Figura 1. Resultado final del caleidociclo con sus 4 caras

más común de cada uno de estos grupos. Igualmente, cuidé que se distinguiera claramente entre elementos metálicos, semimetálicos y no metálicos. El resultado se puede ver en la Figura 1. En el vídeo, cuya referencia^[2] es: <https://youtu.be/bdInoO49WEg>, se expone someramente este caleidociclo y se observa cómo hay que moverlo.

POBLACIÓN DESTINATARIA DEL PROYECTO

Esta herramienta está destinada principalmente al alumnado de Educación Secundaria Obligatoria que cursa Química. A los y las estudiantes se les ofrece esta plantilla del sistema periódico ya organizada e impresa, para que ellos mismos monten y peguen el caleidociclo, según las instrucciones que se incluyen en otro epígrafe y la ayuda del profesor. A continuación se utiliza en el aula para aprender distintos aspectos de la tabla periódica. Además, este caleidociclo de la tabla periódica pertenece a cada alumno y puede usarlo no solo en clase, sino en casa con compañeros o familiares y utilizarlo como elemento lúdico y de estudio.

QUÉ SE PRETENDE MOSTRAR Y APRENDER

Para la realización del proyecto se ha utilizado la tabla periódica con la tipografía y diseño de elementos químicos que facilita libremente el Foro Química y Sociedad.^[3]

Pero esta tabla periódica original del Foro se ha transformado mucho. Se ha aumentado su carácter didáctico añadiendo los números de oxidación principales o más comunes de los elementos representativos, lo que consideramos muy útil y didáctico. También se han añadido el nombre de estos grupos. Además, se ha remarcado la diferencia entre no metales, semimetálicos y metales^[4] y se ha resaltado la peculiaridad de un grupo de elementos muy estable que es el grupo de los gases nobles. En la tabla original del Foro Química y Sociedad (FQS) no se diferenciaban, mediante el color, los no metales en general, de los que forman el grupo exclusivo de los gases nobles. Por eso, para distinguirlos, cambiamos el color de este grupo de los gases nobles (de color azul lo coloreamos a gris). De esta manera, se consigue que en la tabla estén diferenciados todos los elementos no metálicos (color azul o verde) que no sean los gases nobles. Si se usa la plantilla del caleidociclo que proponemos en blanco y negro, son los propios estudiantes quienes tienen que pintar las cuadrículas de los semimetálicos y las de los no metales. Nosotros les proponemos colorear de amarillo las de los semimetálicos y de verde las de los no metales, excluyendo los gases nobles.

Además, en la tabla original no se indicaba el estado físico de los elementos. Lo que sí incluimos nosotros. Para conseguirlo tuvimos que cambiar el color de muchos de los símbolos de la tabla original del FQS. Se cambió el color negro por blanco de todos los símbolos de todos aquellos elementos que no fueran sólidos. Dejamos al alumnado, la labor de buscar en libros o en internet

todos los elementos que sean líquidos, gases y sintéticos o artificiales. Para unificar criterios les aconsejamos pintar en su caleidociclo, las letras de los elementos gaseosos de rojo, a las de los líquidos de azul y dejar los sintéticos con color blanco. Así se consigue también que el estudiante, con su aportación, haga suya la tabla manipulativa. Aunque esta labor pueda parecer ardua o pesada, consideramos que es muy didáctica y contribuye a que el caleidociclo sea considerado con mayor intensidad como algo propio, en parte hecho por ellos. Como se ha comentado anteriormente, se dividieron a todos los elementos en cuatro grupos teniendo en cuenta la división típica de los elementos según su corteza electrónica.^[5] Téngase presente que esta estructura electrónica es muy pertinente porque las propiedades de los elementos químicos dependen del final de la configuración electrónica. Por eso, en cada una de las caras del Caleidociclo aparecen todos los elementos de la tabla periódica que tienen la misma estructura electrónica final.

En una primera cara se recogen las 4 primeras columnas de los elementos representativos a los que corresponden una estructura electrónica final con orbital “s” o bien con orbitales “p” ocupados, en conjunto, solo por uno o dos electrones. Los cuatro grupos son los alcalinos con n.º de oxidación +1, alcalinotérreos con n.º de oxidación +2, boroideos con n.º común +3 y carbonoides con n.º de oxidación ± 4 (algunos también tienen +2).

En una segunda cara del Caleidociclo se recogen todos los elementos representativos que tienen al final de su estructura atómica más de un orbital “p” con más de dos electrones en total (las 4 columnas de la derecha). Son los nitrogenoideos (-3); anfígenos o calcógenos (-2); halógenos (-1) y los más estables: los gases nobles.

En la siguiente cara están los metales de transición que presentan al final de su estructura electrónica un orbital “d”.

Finalmente, en la última cara, se presentan los lantánidos y actínidos (también llamados tierras raras) que, como es conocido, tienen en su configuración electrónica final un electrón en un orbital “f”.

Con este caleidociclo se ofrece pues, de forma interactiva, estructurada, y manipulable la totalidad de los 118 elementos que componen la tabla periódica, pero es una figura tan pequeña que cabe en el estuche del estudiante donde tiene sus lápices y bolígrafos. Para conseguir esta disposición, se realizaron primero muchos intentos infructuosos porque nos topamos con la dificultad de incluir todos los elementos de transición en una sola cara. Además también tuvimos que conseguir plasmar en otra de las caras, períodos tan largos como de 15 elementos cada uno correspondientes a los de los elementos de transición interna (lantánidos y actínidos). Se decidió distribuir cada fila de 15 elementos, ya sea la de lantánidos o la de actínidos, en dos grupos de 7 y 8 elementos cada uno.

Además, tuvimos la dificultad de conseguir que las letras de los símbolos no quedaran distorsionadas por hallarse en medio de las separaciones de la figura tridi-

mensional. Tuvimos que desplazar ligeramente algunas filas o algunas casillas.

Hay que decir que el resultado final no corresponde a una tabla periódica para conocer detalles que no caben como la masa atómica exacta o todos los números de oxidación. Eso se puede consultar en otros sistemas periódicos con más profusa información.

USO Y MOTIVACIÓN EN LAS CLASES

Se pretende acabar con una actitud pasiva que tienen a veces los estudiantes, ante la tabla periódica. Todo aquello que contribuya a dinamizar las clases facilitará tanto la aproximación del docente a los estudiantes como la comprensión del tema.

Uno de los aspectos que aumenta la motivación consiste en que se plantea la realización de la tabla como un reto, pues el alumno ha de conseguir construirla correctamente por sí mismo.

Cuando los estudiantes consiguen montarla y terminarla con éxito la muestran y explican orgullosos a compañeros y familia. Hay que señalar que no sólo este caleidociclo lo han realizado por sí mismos sino que también lo han tenido que completar previamente por su cuenta pues han tenido que investigar el estado físico de los elementos y plasmarlo en su tabla con el color adecuado. También se les pidió que investigaran cuáles son los elementos sintéticos o artificiales.

Otro aspecto atrayente es que esta tabla se presenta como un juego manipulativo. En el aula, se pueden proponer ejercicios didácticos en que el alumno tiene que girar su Caleidociclo para encontrar la respuesta adecuada. Esto les implica activamente, les motiva mucho y aprenden de forma lúdica aspectos importantes sobre la tabla periódica. En algunos manuscritos se sugiere que las actividades manipulativas suponen una herramienta didáctica en la educación científica.^[6]

Las clases en que todos los alumnos tienen su caleidociclo, son más activas y participativas. Los discentes no son meros oyentes sino que tienen que participar activamente moviendo manualmente su caleidociclo para buscar la cara adecuada en su figura y así seguir el análisis que se lleve a cabo de algún grupo o bloque del sistema periódico.

Con este este Caleidociclo, las clases son más didácticas. Como sólo se puede elegir una de las caras de la figura, es más fácil encauzar la atención de los discentes en uno de los bloques o en uno de los grupos, aislándolo de todos los demás elementos de la Tabla periódica. La figura ayuda a focalizar el estudio y la atención en un bloque en concreto o en un grupo de elementos.

Se pueden proponer ejercicios de búsqueda de ciertos elementos. Puede decirse directamente el nombre o pueden darse pistas como que tiene determinado número de oxidación o que su nombre empieza por tal letra y pertenece a tal o cual grupo o bloque... Igualmente, se pueden pedir ejercicios en que tienen que buscar aquellos

elementos que cumplan alguna característica que consideremos relevante. Para hacerlo manipulan con interés su caleidociclo. Por ejemplo, podemos pedirles que busquen elementos con parecidas características a las de uno seleccionado, o que cuenten el número total de elementos gaseosos, o podemos hacerles preguntas como: ¿cuántos elementos son sintéticos entre los elementos representativos?

Hemos comprobado que en la clase se aprenden mucho mejor ciertas diferencias y características entre los elementos químicos. Ayuda a recordar mejor a los discentes cuáles son los elementos gaseosos, cuáles son no metales, sintéticos, muy reactivos... Y sobre todo aprenden que hay cuatro grupos principales de elementos según su estructura electrónica externa, llamados bloques.

Además, hay que destacar que los estudiantes pueden llevar la figura en una pequeña caja o en su estuche. No hace falta una lámina extensa para tener toda la Tabla Periódica.

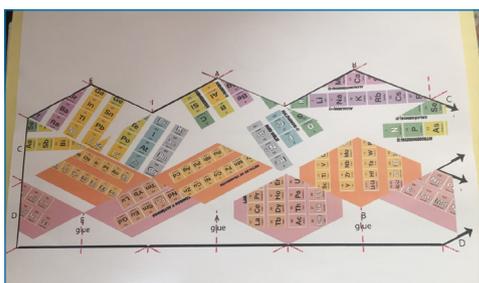
Hay otra posibilidad didáctica a considerar, consistente en entablar un diálogo con los estudiantes en que se discuta con ellos la conveniencia de dividir a los elementos en el caleidociclo, como en esta figura, según su configuración electrónica. ¿Podría realizarse según otro criterio?

¿CÓMO SE HACE LA FIGURA?

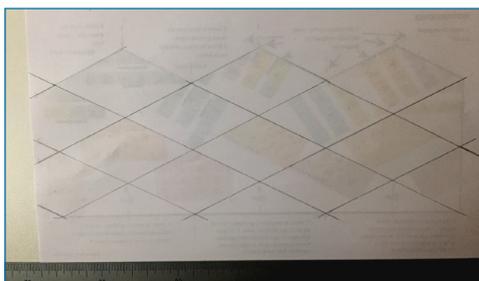
En el anexo, se encuentra la plantilla para construir el caleidociclo.

A continuación detallamos los pasos a seguir con explicaciones pormenorizadas.

- Paso 1. Imprimir la figura (mejor en papel grueso).

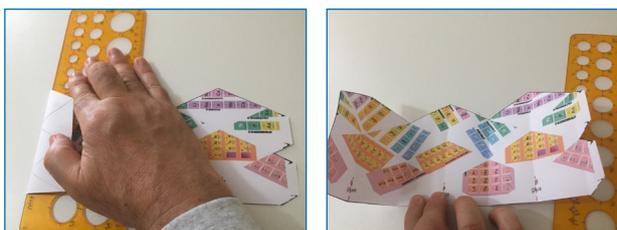


- Paso 2. Se dispone de forma apaisada. Marcar (sin pintar) las líneas verticales y oblicuas (cuyos extremos se indican con línea roja discontinua en la



plantilla). Para marcar mejor las oblicuas pueden trazarse las líneas correspondientes con lápiz por detrás, poniendo la figura impresa al revés en una ventana iluminada.

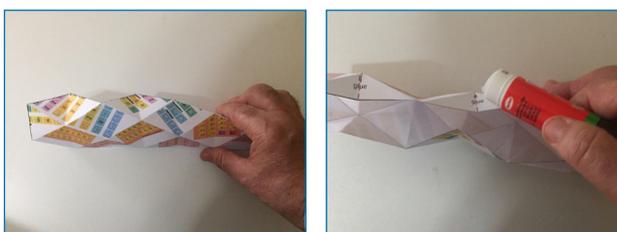
- Paso 3. Se recorta la figura por donde hay líneas en negrita, evitando en lo posible que se vean dichas líneas.
- Paso 4. Se doblan las líneas verticales marcadas hacia dentro con ayuda de una regla.



- Paso 5. Las diagonales se deben doblar hacia fuera. Lo mejor es darle la vuelta a la figura y doblar hacia dentro las líneas oblicuas que habíamos trazado con lápiz en la ventana. Es mejor ayudarse, como en la foto, de una regla.



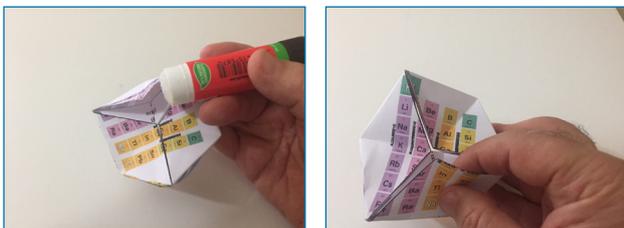
- Paso 6. Se fuerza la figura para tener una forma tubular empujando los dos partes señaladas con la letra A, la una hacia la otra, quedando la forma de un rombo y se pega la parte en que pone glue debajo de la otra parte impresa.



- Paso 7. Ahora la lengüeta C se mueve hacia el borde C, formando un anillo. Y se pega procurando que casen bien las letras de una parte con los de la otra. También puede servir de referencia el doblez de la línea vertical marcada. Lo mismo se hace con los extremos D.



- Paso 8. Y por último, pegar el rombo señalado como E al triángulo blanco E. Hacer lo mismo con el rombo B con el triángulo blanco B.



- Finalmente, se pintan las letras de los elementos líquidos con color azul (sólo son Br y Hg) y las de los gases con color rojo (sólo son los gases nobles, H, N, O, F y Cl). Este paso, puede hacerse también antes de montar la figura. Las letras de los elementos sólidos ya están pintados de negro y los artificiales ya tienen las letras pintadas de blanco.

Si se imprime en blanco y negro, que es lo más común si la clase es numerosa, se sugiere a los estudiantes que pinten las casillas de los no metales con marcador o subrayador fluorescente verde (H, halógenos, C, O, S, Se, N, P) y que pinten las casillas de los semimetales de amarillo con marcador o subrayador fluorescente de ese color (B, Si, Ge, As, Sb, Te, Po). Todas las demás casillas que quedan sin pintar corresponden a los metales o a los gases nobles. En las referencias^[2] se cita el vídeo que puede consultarse para ver el resultado.

CONCLUSIONES

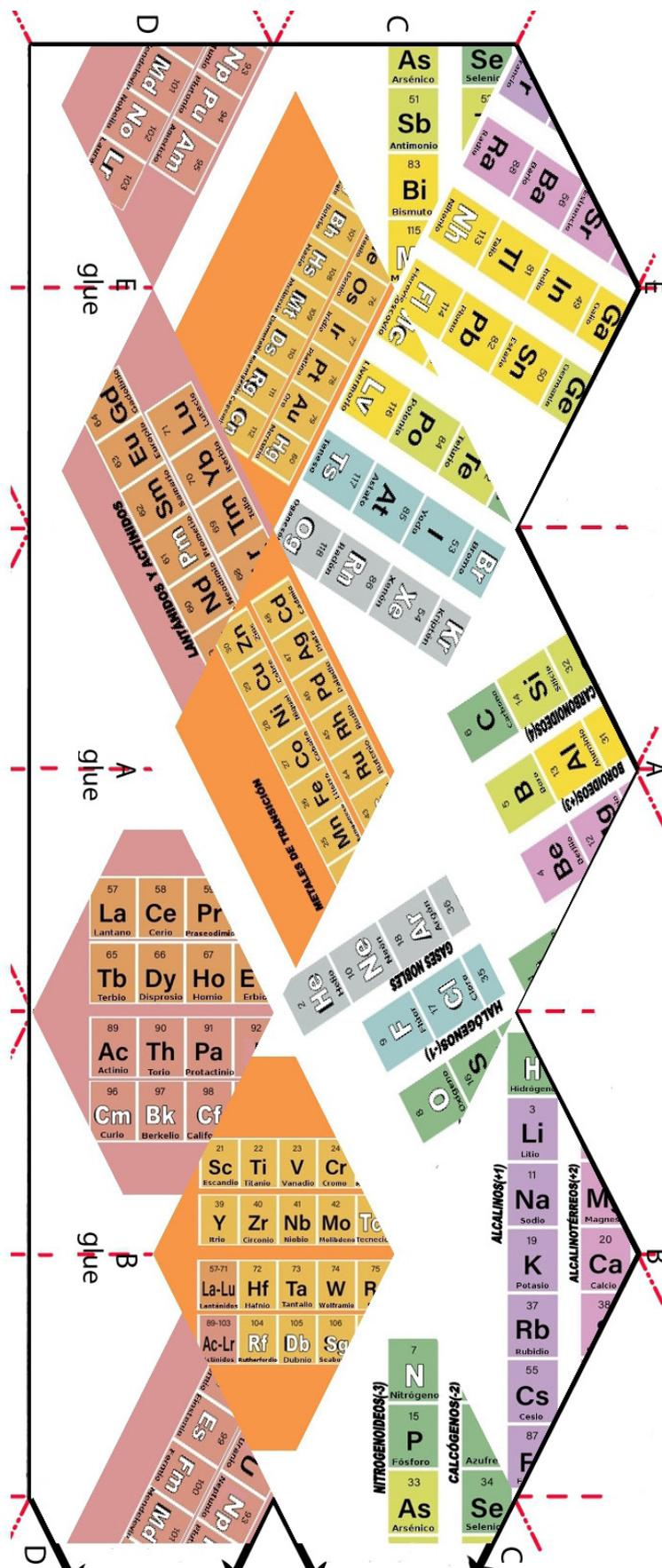
Se puede concluir que el proyecto: “Figura manipulativa para la didáctica de la tabla periódica y sus grupos”, puede ser un material y medio motivante para ayudar en la didáctica de la Química en lo que se refiere al tema del sistema periódico. Con este caleidociclo, se trata de abordar este tema, de una forma atractiva e interactiva. Además, puede ayudar a estudiar la Tabla Periódica de los elementos de una forma organizada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martin Gardner. *Hexaflexagons and Other Mathematical Diversions*, Scientific American, MAA press, 1988.
- [2] P. Cassinello. <https://youtu.be/bdINoO49WEg>
- [3] Foro Química y Sociedad (FQS). Tabla periódica <https://www.quimicaysociedad.org/tabla-periodica-de-los-elementos-quimica/>
- [4] Zumdahl, Decoste. *Introductory Chemistry*. Brooks cole Cengage learning Boston, 2011, pág. 348
- [5] Raymond Chang, *Química*, McGraw-Hill Interamericana, 2003.
- [6] Manuel F. M. Costa y Benito V. Dorrió Actividades manipulativas como herramienta didáctica en la educación científico tecnológica, *Revista Eureka*, 2010, 7(2), 462.

ANEXO

En la siguiente página está la plantilla de la “Figura manipulativa para la didáctica de la Tabla Periódica y sus grupos”.



La enseñanza de la física y la química en tiempos de pandemia

Antonio Pérez Vicente

Resumen: En este artículo se incluye una reflexión sobre las condiciones de la enseñanza de la física y la química durante el confinamiento derivado de la pandemia por COVID-19, aportando información sobre recursos didácticos y diversos aspectos relacionados con la metodología, e incidiendo en la importancia del profesor en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Palabras clave: Educación, recursos educativos, pandemia, laboratorio, profesor.

Abstract: This article includes a reflection on the teaching conditions of physics and chemistry during confinement derived from the COVID-19 pandemic, providing information on didactic resources and various aspects related to the methodology, and emphasizing the importance of teacher in the teaching-learning process.

Keywords: Education, educational resources, pandemic, laboratory, teacher.

INTRODUCCIÓN

Ni en nuestras peores pesadillas (ni siquiera leyendo los libros de Orwell, Huxley o Camus) podíamos imaginar la situación en la que nos encontramos en el año 2020. Una pandemia que ha golpeado con dureza a toda la Humanidad, con cientos de miles de muertos y millones de contagiados, poniendo a prueba los sistemas sanitarios de todos los países y socavando los cimientos de la economía.

En el ámbito educativo, la pandemia nos cogió (como a todos los demás) completamente por sorpresa. De la noche a la mañana nos vimos confinados, sin posibilidad de continuar las clases con nuestros alumnos de forma presencial (¿es que hay alguna otra forma?). Ni siquiera nos planteábamos antes de ese momento que las clases

presenciales pudieran ser sustituidas por otro sistema de enseñanza. Es cierto que desde hace años hay otros medios (YouTube, webs...) que “compiten” con el aprendizaje en el aula, pero se trata de clases o explicaciones grabadas, sin interacción entre el profesor y el alumno. El aula es otra cosa: es complicidad, es teatro, es juego, es respeto y tolerancia, es diversidad, es también convivencia y socialización, es compartir, es debatir, es crecer. Por eso nos costó tanto esa ruptura súbita del cordón que nos une a nuestros alumnos. Sí, porque son nuestros, no en el sentido posesivo de la palabra, sino porque los hacemos nuestros, los adoptamos durante un tiempo convirtiéndonos en su guía en este proceso de descubrir el mundo que nos rodea.



A. Pérez Vicente

Departamento de Física y Química
IES Isabel la Católica
C/ Alfonso XII, 3 y 5, 28014, Madrid
C-e: antonio.perez@iesisabellacatolica.es
aperez1@educa.madrid.org

Recibido: 30/12/2020. Aceptado: 25/03/2021.

RECURSOS EDUCATIVOS EN TIEMPOS DE PANDEMIA

Desde hace años son muchos los recursos disponibles para la enseñanza de la física y la química en la educación secundaria, tanto en la ESO como en el Bachillerato. Desde aplicaciones (*applets*) de diferentes universidades (por ejemplo las de la Universidad de Colorado)^[1] y otras entidades educativas (por ejemplo KCVS)^[2] o personales (Fislab,^[3] de Tavi Casillas, o FisquiWeb,^[4] de Luis Ignacio García), como canales de YouTube (y otras plataformas) donde encontrar videos de creación reciente

(algunos muy bien realizados y muy didácticos) o desarrollados hace años (series como “El Universo Mecánico” o “Cosmos”). Recursos creados por profesores, por instituciones, por empresas y por universidades. Recursos para utilizar con el ordenador o incluso con el móvil^[5] (*apps*). Recursos para crear recursos: aulas virtuales y plataformas de creación de contenidos. Todos ellos son muy interesantes y han permitido que los profesores estemos continuamente adaptándonos a estas utilidades y creando contenidos que permitan que nuestras clases sean más atractivas, más participativas, más amenas.

Pero incluso para los que disponíamos en ese momento de muchos de los recursos anteriores, la ruptura con el “aula” supuso un salto al vacío, un cambio tan radical y tan repentino que solo con el tiempo podemos valorar y evaluar. En nuestro afán por continuar con las clases nos convertimos en buscadores de nuevos recursos: plataformas de videoconferencias, aulas virtuales, pizarras digitales, webcams, grabaciones con el móvil, tabletas gráficas... Durante varios meses, encerrados en nuestras casas, con nuestros problemas familiares, sociales y sanitarios, nos enfrentamos a la tarea de que nuestros alumnos pudiesen continuar su aprendizaje. Aprendimos a marchas forzadas a dar clases *online*, a colarnos en las casas de los alumnos e intentar contar lo que sabemos, a compartir nuestros conocimientos^[6] y transmitir nuestro entusiasmo por la ciencia.

Enseguida nos dimos cuenta de que, más allá de los problemas informáticos, de las dificultades tecnológicas y de los recursos disponibles (tanto de los alumnos como de los profesores), el problema fundamental estaba en el “aula”, en ese espacio físico y temporal que no se puede sustituir por una pantalla. De repente, nos sentíamos con la necesidad de mantener ese contacto personal, esa cercanía que permite la comunicación directa, la mirada y el gesto, la palabra y el diálogo.

El volumen de contenidos generado en estos meses ha sido enorme y en muchos casos se ha compartido con otros profesores para que puedan utilizarlos con sus alumnos. Hemos contactado con compañeros de otros centros, con profesionales de otros medios y también hemos ido aprendiendo de forma autodidacta cómo crear contenidos, cómo compartir recursos.^[7]



Figura 1. Montaje para la realización de videos caseros con el móvil

Muchos de los recursos desarrollados están disponibles en la Mediateca de Educamadrid,^[8] en las Aulas Virtuales^[9] y en el canal de YouTube.^[10] En otros casos, los materiales sólo estaban disponibles en la “nube” para los alumnos de un grupo. Estas primeras grabaciones caseras se realizaron con un montaje muy rudimentario y el móvil, tal y como se aprecia en la imagen.

Colocando el móvil entre los soportes de madera podía grabar mientras realizaba los ejercicios en la hoja de papel, como si se tratara de una pantalla blanca o una pizarra de clase. El resultado se puede comprobar en YouTube,^[11] donde se muestran varios videos realizados de la manera descrita.

EXPERIMENTACIÓN E INVESTIGACIÓN

Uno de los aspectos más importantes de la enseñanza de la física y la química es la posibilidad de realizar experiencias de laboratorio. Si bien es cierto que no en todos los centros ni en todos los cursos se pueden realizar prácticas en el laboratorio (en la mayoría de los casos debido a la falta de horas de desdobles en los horarios) es imprescindible que los alumnos conozcan la base del desarrollo científico, que no es otra que la experimentación. También en este aspecto hay muchísimos recursos disponibles que suplen o complementan (en algunos casos) la experimentación directa en el laboratorio, desde *applets* muy completos a descripciones de prácticas para realizar con materiales sencillos, incluso en casa.^[12] Este aspecto imprescindible de la enseñanza de las ciencias, y de la física y la química en particular, debe seguir siendo, incluso en estos momentos, el hilo conductor de nuestra tarea como docentes.

Desde hace años se imparten en España enseñanzas del Bachillerato Internacional^[13] en varios centros, tanto públicos como privados, que inciden en la base experimental de la Física y la Química, completando la formación en estas materias con la realización de investigaciones supervisadas por los profesores. La experiencia de más de diez años formando parte del equipo docente del Bachillerato Internacional en un centro público de la Comunidad de Madrid (IES Maestro Matías Bravo)^[14] ha permitido comprobar la importancia de que los alumnos realicen este tipo de investigaciones e incluso trabajos más amplios y detallados, denominados monografías. En ellas, el alumno aborda un problema de investigación desde el principio, desde la pregunta que da origen al problema a investigar (promoviendo la curiosidad del alumno) hasta la realización de un informe, pasando por la experimentación y la valoración de los resultados obtenidos. Como señala Miguel Cañizares:^[15]

Lo importante en las actividades experimentales de los alumnos es el propio proceso de investigación, que sean capaces de hacer una valoración crítica de los resultados obtenidos y del grado de validez de las conclusiones que emitan.

Desde las actividades dirigidas para los alumnos de la ESO hasta las investigaciones más abiertas para los alumnos de Bachillerato, la experimentación debe guiar el proceso de enseñanza de la física y la química.^[16] Este modo de enfocar el aprendizaje de las ciencias debería ser incorporado en nuestros centros, disponiendo del tiempo y recursos suficientes, de modo que se incluyan en el currículo y en la asignación horaria tanto de las asignaturas como del horario del profesorado. En muchos casos, las experiencias o pequeñas investigaciones se pueden realizar sin costosos materiales ni montajes espectaculares porque el verdadero objetivo es fomentar el descubrimiento como base del desarrollo de la ciencia. En este sentido, hay muchísimos recursos disponibles en textos y en la web aunque, por la simplicidad de los experimentos descritos, es muy interesante el texto editado por la UNESCO donde se indica:

Para que las ciencias se aprendan eficazmente, su enseñanza debe ser experimental. El Nuevo manual ha sido proyectado para que constituya una fuente de ideas para planificar actividades científicas simples, investigaciones y experimentos susceptibles de ser realizados por los mismos alumnos.^[17]

Pensando en esto, se grabó también un video para que los alumnos pudieran realizar un experimento en su casa, en este caso con un péndulo. Para la realización y montaje del video, que se puede ver en YouTube,^[18] se contó con el personal de Tenlines /EquusMedia.^[19]

La idea original era realizar varios videos que permitieran realizar experiencias sencillas con material que tenemos en casa, aunque por el momento está pendiente la ampliación a otras actividades experimentales.



Figura 2. Fotograma del video Péndulo simple

La colaboración con profesionales de la grabación y edición de imágenes continuó con varios videos sobre aspectos muy concretos, en este caso de dinámica: fuerzas de inercia^[20] y acelerómetro.^[21] Las imágenes muestran los montajes para explicar estas ideas.



Figura 3. Capturas de los videos realizados con materiales caseros

EL TRABAJO PERSONAL COMO PARTE DEL NUEVO CURRÍCULO

Otro de los aspectos que se han replanteado durante este tiempo de confinamiento ha sido la realización de trabajos personales. Las clases *online* donde el profesor se pone delante de la pantalla y explica los contenidos como si estuviera en una clase presencial, ya sea para explicar un tema o para resolver problemas (aunque no todas las clases presenciales son de este tipo, sí hay un porcentaje elevado de clases magistrales, al menos en Bachillerato) no parecen la mejor opción cuando el alumno se encuentra en casa conectado con un ordenador (en el mejor de los casos, ya que no todos los alumnos disponen de este recurso informático). Una alternativa puede ser la realización de tareas o trabajos individuales,^[22] que el alumno puede realizar en el propio tiempo disponible como clase *online* o en otro momento. Para este tipo de actividades resulta muy interesante contar con un aula virtual, como la que está disponible en el entorno de trabajo EducaMadrid,^[23] que incluye muchos recursos para poder diseñar actividades personalizadas. Aunque se ha trabajado durante muchos años con este entorno, siempre había sido utilizado como complemento de las actividades del aula y no como único medio de comunicación con los alumnos. Una de las actividades más interesantes es el diseño de tareas como la que se muestra en la imagen.

En este caso se trata de una actividad sobre el efecto fotoeléctrico basada en el simulador del mismo nombre

del PhET^[24] (Universidad de Colorado) que permite trabajar los conceptos relacionados con la frecuencia umbral, la función de trabajo y la energía cinética de los fotoelectrones, comprobando la ecuación de Einstein.^[25]

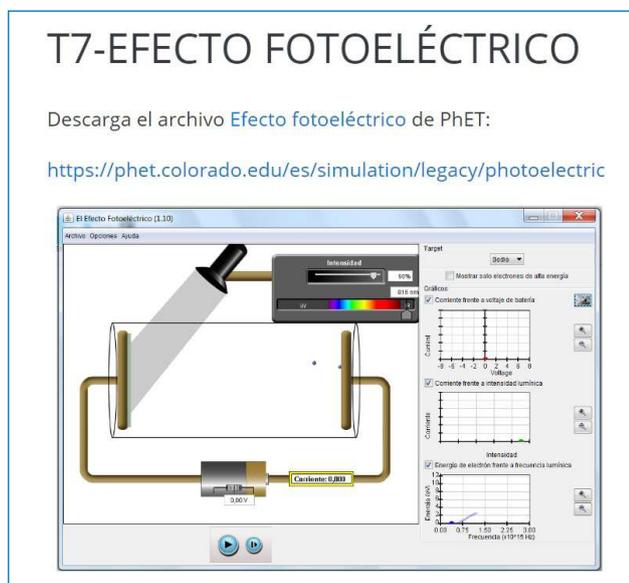


Figura 4. Tarea diseñada para trabajar sobre el efecto fotoeléctrico

El alumno debe realizar la tarea disponible en el Aula Virtual,^[26] siguiendo las instrucciones que se indican y enviar un informe que el profesor puede corregir y evaluar a través del “calificador” (también incluido en el entorno de trabajo del Aula Virtual y que se muestra en la imagen).



Figura 5. El “calificador” permite visualizar, corregir y evaluar el trabajo del alumno, así como enviar comentarios y las correcciones realizadas

NUEVO CURSO, NUEVOS RETOS

El nuevo curso 2020-2021 ha traído un escenario muy complejo, donde conviven las clases presenciales y las clases *online*, en algunos casos de forma simultánea, es decir, que los alumnos de un grupo se subdividen en dos subgrupos y en días alternos asisten al centro de forma

presencial mientras que la otra mitad del grupo sigue las clases desde casa. En otros casos se trata de asignaturas que se imparten exclusivamente *online*.

Estas distribuciones horarias suponen un nuevo reto, diferente al del final del curso 2019-2020, teniendo en cuenta que ahora hay alumnos que asisten a clase presencial por turnos (a veces todos los días, pero media jornada cada turno) y en ocasiones con clases presenciales y *online* en días diferentes, con grupos a mitades o completos (cada centro educativo ha optado por una distribución horaria diferente teniendo siempre presente que el objetivo fundamental es preservar la salud y cumplir las normas sanitarias). A ello se suma la posibilidad de que algunos alumnos (o el propio profesor) no puedan asistir a las clases presenciales, bien por haberse contagiado o por tener que guardar cuarentena. Una nueva vuelta de tuerca a la enseñanza a la que tanto profesores como alumnos tratamos de adaptarnos. Ya no se trata de continuar lo que dejamos a medias en el aula en el curso anterior, sino de comenzar de una forma diferente un nuevo curso.

La realidad nos coloca en otro escenario, en uno donde se cambia el decorado cada cierto tiempo. Un nuevo entorno donde se simultanea la clase presencial con alumnos utilizando la pizarra (de tiza, digital o tableta gráfica) con la clase *online* (a través de plataformas de videoconferencia) compartiendo recursos (Aula Virtual, webs...).



Figura 6. Utilidades como la tableta gráfica se suman al conjunto de recursos tecnológicos que añaden posibilidades de trabajo, pero que requieren también de un tiempo de aprendizaje y adaptación

Recursos todos ellos que deben considerarse como herramientas y utilidades que aportan un valor añadido al principal sujeto, el profesor. El profesor como recurso indispensable, quien guía al alumno en el aprendizaje, quien selecciona materiales y recursos, y quien evalúa el proceso. El profesor ha sido en estos meses (y lo va a seguir siendo) una figura insustituible en este nuevo entorno de trabajo ya que acompaña al alumno, resuelve sus dudas y, sobre todo, transmite y motiva. En este sentido, un artículo publicado hace unos años en el blog de José Almeida, Discu(r)siones^[27] hace referencia a la

importancia del profesor en su papel de acercamiento al alumno. En él se puede leer:

Porque al final un profesor, ese profesor, cualquier profesor no va a poder cumplir adecuadamente con su labor sin llegar a los alumnos, sin entenderlos, sin reírse con ellos, sin sufrir con sus problemas, sin conocerlos para poder así guiarlos, sin entender sus necesidades, sus miedos, sus preocupaciones. No debe pretender por supuesto ser su amigo, ni su colega, porque es lo que menos necesitan; ha de asumir su rol como adulto, actuar con mano firme, ser cercano y accesible pero al tiempo distante para respetar sus espacios, para dejarlos crecer sin que su presencia los perturbe, sabiendo abandonar el primer plano, desapareciendo cuando sea necesario, apareciendo cuando se le necesita, en su aula, con sus clases, guiándolos, respondiendo a sus dudas, evitando que se sientan mal cuando se equivocan, obligándoles a aprender de sus errores, renunciando a la inútil crítica personalizada, abriéndoles puertas y, por supuesto, transmitiéndoles conocimiento.

Y en una reflexión posterior, Almeida incide en el papel del profesor como guía y acompañante en el proceso de aprendizaje, valorando el esfuerzo personal del alumno.

No hay aprendizaje sin esfuerzo pero no hay posibilidad de aprendizaje real para muchos adolescentes sin un profesor que les muestre que ese esfuerzo tiene una meta asequible y los refuerce para conseguirlo.^[28]

CONCLUSIONES

Un análisis de la situación vivida durante estos meses de confinamiento, que se ha prorrogado en el curso 2020-2021, nos lleva a considerar algunos aspectos positivos y negativos. Entre los primeros, podemos mencionar el aumento de la autonomía del alumno y la valoración del trabajo personal. El alumno ha dejado de ser un sujeto pasivo para ser el auténtico protagonista. Aunque hace mucho tiempo que el alumno debiera haber adoptado este rol, la inercia del propio sistema educativo y del profesorado ha relegado al alumno al papel de receptor de su propio proceso de aprendizaje. Esto ha cambiado con la situación actual ya que, debido a que en muchos casos el alumno tiene que estar en casa realizando actividades, la participación activa es una obligación que implica la búsqueda de recursos y la resolución individual de las tareas, fomentando la autonomía. La evaluación del proceso de enseñanza-aprendizaje debe incluir elementos que tengan en cuenta esta nueva situación valorando las actividades realizadas por el alumno (incluso si la autoría es dudosa) puesto que es en esta faceta de aprendizaje donde se puede comprobar mejor el progreso del alumno y su implicación personal. Las herramientas y recursos que hemos utilizado durante este tiempo nos sirven para poner en marcha este desafío que permita descargar el peso de la evaluación en los

exámenes y valore las actividades y el trabajo del alumno, teniendo en cuenta el principio de probidad académica y utilizando los medios necesarios para su control. Un proceso que, lo hemos visto en estos meses de confinamiento, conlleva un trabajo por parte del profesor para seleccionar y elaborar los materiales y recursos más adecuados. También el alumno debe implicarse más y participar activamente en el proceso, lo que conlleva un esfuerzo más continuo, del día a día, que, a la larga, es el que verdaderamente deja huella en el aprendizaje. Es verdad que el trabajo en el aula, el que realiza el alumno de forma individual, tiene la ventaja de que es supervisado por el profesor y no cuenta con el apoyo de agentes externos que puedan alterar el verdadero propósito de las actividades: generar las habilidades y recursos para resolver por sí mismo los problemas. Se trata de un proceso y, evidentemente, no se consigue el primer día, pero cuando se logra, la satisfacción personal incrementa la autoestima y la valoración personal. Los padres deberían ser conscientes de ello y no hacer los deberes a sus hijos, sino supervisar y guiar (en la medida de lo posible) su realización.

Hay otros elementos importantes del proceso de aprendizaje que se han perdido en estos meses y que debemos intentar reconstruir lo antes posible. En este sentido, podemos incluir en el balance negativo que la pérdida de presencialidad en las aulas implica un deterioro notable de la vida escolar. La escuela (tomando mejor este término genérico que el de centro educativo) es un espacio de socialización y de relación que permite conocer las realidades de los otros, desarrolla la empatía y contribuye a valorar lo propio y lo ajeno (ya sean valores materiales o afectivos), además de ser un factor desarrollador del equilibrio social (o al menos es lo que debiera pretender). También se ha perdido la colaboración y el trabajo en grupo (es bastante complicado generar tareas *online* de trabajo colaborativo, aunque no imposible), que posibilitan la compartición de recursos y habilidades entre varios alumnos, aumentando el grado de participación de todos y desarrollando capacidades de desarrollo cognitivo, incluyendo el reconocimiento de las limitaciones propias. Compartir y colaborar en un trabajo colectivo tiene el valor añadido de crear aportando cada uno sus propias experiencias y capacidades, enseñando y aprendiendo a la vez. En este sentido, los profesores sabemos que sólo se sabe bien algo cuando tienes que explicárselo a otro. Nuestra tarea diaria de explicar es también la tarea de seguir aprendiendo día a día, de buscar recursos para hacer comprensible a nuestros alumnos los conceptos y las ideas que hacen de la física y la química las áreas más importantes del desarrollo de la ciencia, ya que contribuyen al conocimiento de lo que nos rodea, la Naturaleza.

La pérdida de presencialidad (o la semipresencialidad) ha cambiado también la forma de comunicarnos con los alumnos, perdiendo gran parte de la espontaneidad en el aula. Cada clase es diferente y, aunque en muchos casos el profesor parece que repite la misma clase (en algunos casos no sólo se repite una vez, sino que pueden ser tres o cuatro grupos del mismo nivel), los que estamos en el aula día

a día sabemos que esto no es así. Cada grupo de alumnos es diferente, con sus peculiaridades, formado por alumnos diferentes, con sus problemas, sus aptitudes y sus actitudes, que construyen una realidad de aula única. Y el profesor debe saber manejar esa realidad, adaptando sus estrategias de comunicación para llegar mejor a sus alumnos.

Las secuelas de esta pandemia durarán algún tiempo y probablemente sus consecuencias se incorporarán a nuestra cotidianidad, pero no debemos perder de vista algunos aspectos importantes de la ciencia, por un lado, y de la enseñanza, por otro. En este sentido me atrevo a incluir dos fragmentos, uno de un científico (el primer premio Nobel español en el ámbito científico) y otro de un gran poeta del Romanticismo español.

Santiago Ramón y Cajal sobre la docencia:

Ni la ciencia, ni la técnica ni el arte prosperarán en nuestro país mientras los maestros no se esmeren, empleando toda clase de medios, en forjar discípulos que les aventajen.^[29]

Gustavo Adolfo Bécquer, Rima IV (fragmento):

Mientras la ciencia a descubrir no alcance
las fuentes de la vida,
y en el mar o en el cielo haya un abismo
que al cálculo resista,
mientras la humanidad siempre avanzando
no sepa a dó camina,
mientras haya un misterio para el hombre,
¡habrá poesía!^[30]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://phet.colorado.edu/es/simulations/filter?subjects=chemistry,physics&sort=alpha&view=grid> Último acceso 28/12/2020.
- [2] <http://www.kcvs.ca/cards.html?type=applets> Último acceso 20/12/2020.
- [3] <https://www.fislab.net/>
y también en: <http://www.xtec.cat/~ocasella/index2.htm>
Último acceso 28/12/2020.
- [4] <https://fisquiweb.es/> Último acceso 28/12/2020.
- [5] <https://www.orbitalesmoleculares.com/apps-para-aprender-quimica/>
Último acceso 28/12/2020.
- [6] Domenici, V. Distance Education in Chemistry during the Epidemic Covid-19. *Substantia*, **2020**, *4*(1), 961. <https://doi.org/10.13128/Substantia-961>
- [7] Rebecca L. Sansom. Pressure from the Pandemic: Pedagogical Dissatisfaction Reveals Faculty Beliefs *Journal of Chemical Education* **2020**, *97* (9), 2378-2382. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00657>
- [8] <https://mediateca.educa.madrid.org/usuario/aperez1/videos>
Último acceso 28/12/2020.
- [9] Aula Virtual de Física y Química 1.º Bachillerato (acceso invitado) <https://aulavirtual3.educa.madrid.org/ies.isabellacatolica.madrid/course/view.php?id=214> Último acceso 28/12/2020.
- [10] <https://www.youtube.com/channel/UCrxQ8lPnM7mpAlpQVpavug>
Último acceso 28/12/2020.
- [11] <https://www.youtube.com/channel/UCrxQ8lPnM7mpAlpQVpavug>
Último acceso 28/12/2020.
- [12] Tomás Serrano, Antonio y García Molina, Rafael. *Experimentos de Física y Química en tiempos de crisis*. Universidad de Murcia 2015. Disponible en: <https://publicaciones.um.es/publicaciones/public/obras/ficha.seam?numero=2421&edicion=1>
- [13] <https://www.ibo.org/programmes/diploma-programme/curriculum/sciences/chemistry/> Último acceso 28/12/2020.
- [14] <https://www.educa2.madrid.org/web/fisica-y-quimica-mmb/bachillerato-internacional> Último acceso 28/12/2020.
- [15] Cañizares Millán, Miguel. Investigar en física. Experiencia en el Bachillerato Internacional del IES Juan de la Cierva de Totana. *Comunicaciones [Jornadas [sobre] nuevas tendencias en la enseñanza de las ciencias y las ingenierías*. Consejo Escolar de la Región de Murcia, 2008. 159-176. Disponible en: <https://www.ibsurvival.com/applications/core/interface/file/attachment.php?id=7482>
- [16] Tortorella, S., Zanelli, A. y Domenici, V. Chemistry Beyond the Book: Open Learning and Activities in Non-Formal Environments to Inspire Passion and Curiosity. *Substantia*, **2019** *3*(2), 39-47. <https://doi.org/10.13128/Substantia-587>
- [17] *Nuevo Manual de la Unesco para la enseñanza de las ciencias*. Barcelona, Edhasa, 1978. Disponible también en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000005641_spa
- [18] <https://www.youtube.com/watch?v=f1BeOGnRB8U&feature=youtu.be>
Último acceso 28/12/2020.
- [19] <https://equusmedia.es/galerias/estudio> Último acceso 28/12/2020.
- [20] <https://www.youtube.com/watch?v=c8avgQpzNY&feature=youtu.be>
Último acceso 28/12/2020.
- [21] <https://www.youtube.com/watch?v=0VaQaeEAsgw&feature=youtu.be>
Último acceso 28/12/2020.
- [22] Babinčáková M. y Bernard P. Online Experimentation during COVID-19 Secondary School Closures: Teaching Methods and Student Perceptions. *J Chem Educ.* **2020** Sep 8; *97*(9): 3295-3300. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.0c00748>
- [23] <https://www.educa2.madrid.org/educamadrid/> Último acceso 28/12/2020.
- [24] <https://phet.colorado.edu/es/simulation/legacy/photoelectric>
Último acceso 28/12/2020.
- [25] <https://culturacientifica.com/2019/07/02/la-explicacion-de-einstein-del-efecto-fotoelectrico/> Último acceso 28/12/2020.
- [26] Aula Virtual para alumnos de 2 Bach, IES Isabel la Católica-Antonio Pérez (acceso invitado: faraday). <https://aulavirtual3.educa.madrid.org/ies.isabellacatolica.madrid/enrol/index.php?id=213>
- [27] <https://discursiones2.blogspot.com/2014/02/el-profesor-en-la-encrucijada.html?m=1> Último acceso 28/12/2020.
- [28] <https://discursiones2.blogspot.com/2020/10/la-importancia-de-las-emociones-en-el.html> Último acceso 28/12/2020.
- [29] Ramón y Cajal, Santiago. Charlas de café: Pensamientos, anécdotas y confidencias. *Fondo de Cultura económica*, 2016. 213 págs. ISBN 978-607-16-5117-4.
- [30] http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/rimas-y-leyendas-0/html/00053dfc-82b2-11df-facc-7002185ce6064_2.html#I_0 Último acceso 28/12/2020.

Propuesta didáctica para la obtención de una curva de calibración

Determinación de ácido acético con hidrogenocarbonato de sodio, lavavajillas y un agitador magnético

Otilia Val-Castillo

Resumen: Los procedimientos analíticos instrumentales de análisis cuantitativo suelen utilizar la proporcionalidad entre la concentración de una sustancia y una señal analítica. Generalmente implican construir una curva de calibración, optimizando los factores que influyen en dicha señal, para que, a partir de la señal de la sustancia problema, se pueda determinar su concentración por interpolación de la recta de calibrado. Para practicar este método de trabajo, en cursos de bachillerato, se muestra una experiencia que aplica el método de calibración a la determinación de ácido acético con reactivos baratos e instrumental disponible en los laboratorios de educación secundaria.

Palabras clave: Curva de calibración, ácido acético, química analítica cuantitativa, vinagre, agitador magnético.

Abstract: Instrumental analytical procedures for quantitative analysis usually use the proportionality between the concentration of a substance and an analytical signal. This generally involves constructing a calibration curve optimizing the factors that can influence the signal so that, from the signal of the analyzed substance, its concentration can be determined by interpolation of the calibration line. This article shows an experience that applies the calibration method to the determination of acetic acid with cheap reagents and instruments available in school laboratories to practice this working method in high school courses.

Keywords: Calibration curve, acetic acid, quantitative analytical chemistry, vinegar, magnetic stirrer.

INTRODUCCIÓN

La Química Analítica es la ciencia que estudia el conjunto de principios, leyes y técnicas cuya finalidad es la determinación de la composición química de una muestra natural o artificial.^[1] Se divide en química analítica cualitativa y cuantitativa.

La finalidad de la química analítica cuantitativa es hallar la cantidad de una determinada sustancia presente en una muestra, una vez que se conoce, o se ha identificado, su presencia mediante el análisis químico cualitativo.

Los métodos cuantitativos pueden determinar la masa o concentración del analito mediante diversos procedi-

mientos: volumétricos, gravimétricos, electroquímicos, espectroscópicos, potenciométricos, conductimétricos, cromatográficos... Hasta el año 1920, la mayoría de los análisis se basaban en medir masa o volumen, por este motivo los métodos gravimétricos y volumétricos se conocen como métodos clásicos de análisis, a diferencia de los demás procedimientos que se denominan métodos instrumentales.^[2]

En los laboratorios de los institutos, los métodos más utilizados son los volumétricos (para realizar valoraciones ácido-base, redox y de precipitación), ya que están relacionados con el temario impartido en educación secundaria obligatoria y Bachillerato,^[3] y el material que se necesita está disponible en los laboratorios escolares (bureta, soporte, vasos de precipitados o matraces erlenmeyer y reactivos).

Así, por ejemplo, para determinar el grado de acidez de los vinagres, expresado como los gramos de ácido acético por cada 100 ml en un vinagre, (según está publicado en el Real Decreto 661/2012 de 13 de abril por el que se establece la norma de calidad para la elaboración y comercialización de los vinagres),^[4] se mide el volumen de concentración conocida de hidróxido de sodio,^[5] necesario para reaccionar con un volumen conocido del vinagre, utilizando un indicador ácido-base,^[5,6] que nos indique cuando el ácido acético



O. Val-Castillo

Doctora en Químicas
Jefa del Departamento de Física y Química
IES Lluís Simarro Lacabra.
Av. País Valencià s/n 46800 Xàtiva (Valencia)
C-e: val_oti@gva.es

Recibido: 28/02/2021. Aceptado: 21/04/2021.

ha reaccionado completamente. A esta técnica se le denomina valoración. En general, se suelen hacer tres medidas para encontrar un valor medio del volumen. A partir de este dato se realizan los cálculos oportunos para la determinación de la concentración, que deberá coincidir con la mostrada en la etiqueta de la botella, según la norma establecida en el RD 661/2012 anteriormente mencionado.^[4]

Otros procedimientos analíticos instrumentales muy utilizados en análisis cuantitativo implican construir una curva de calibración.^[7,8] Estos métodos se basan en encontrar una proporcionalidad entre la concentración de una sustancia y una señal analítica. En general, se buscan relaciones lineales, al menos en un rango de trabajo. Medida esa señal, para nuestra sustancia problema o analito, se podrá determinar su concentración por interpolación en la curva de calibración o por despeje de la ecuación de la recta de calibrado.

Estos métodos instrumentales son más difíciles de aplicar en un laboratorio escolar, ya que, en general, no se dispone de instrumentación que requiera calibración. Sin embargo, si ello fuera posible o incluso si se diseñase algún dispositivo instrumental,^[9,10] sería conveniente conocer en qué consiste este método de trabajo.

OBJETIVOS

El principal objetivo de esta propuesta es mostrar una experiencia que permita construir una curva de calibración, utilizando reactivos baratos e instrumental disponible en los laboratorios de los institutos (un agitador magnético) y que se puede utilizar en cursos de Bachillerato.

A nivel didáctico permite relacionar conceptos químicos sobre estequiometría (reacciones químicas, reactivo limitante o en exceso), cinética química (velocidad de reacción y factores que influyen en la misma), la ecuación de estado de los gases ideales (leyes de los gases), aplicando el método científico: proponiendo hipótesis, desarrollando experimentos, representando los datos obtenidos y obteniendo conclusiones.

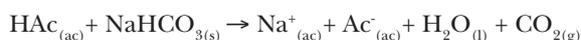
Permite abordar competencias básicas mediante el trabajo en grupo (competencias sociales y cívicas) en ciencia y matemáticas, competencia digital, comunicación lingüística, aprender a aprender, sentido de la iniciativa y espíritu emprendedor.^[11]

Por la limitación de tiempo no se profundiza en los contenidos que se imparten en la asignatura de matemáticas (errores, estadística) y la obtención de la recta de calibrado, el desarrollo de los cálculos estadísticos y las desviaciones estándar se realizan con calculadora o utilizando una hoja de cálculo (competencia matemática y digital) proporcionando directamente las fórmulas.

Se utiliza el teléfono móvil para grabar y compartir las experiencias, objeto muy motivador para los alumnos, lo que permite un control exacto sobre el tiempo de reacción.

PLANTEAMIENTO

Son muy conocidos los experimentos en los que el peróxido de hidrógeno se descompone, con ayuda de un catalizador, produciendo agua, oxígeno, y que con la adición de un lavavajillas generan mucha espuma.^[12] También son conocidos los experimentos, y numerosos los videos en Internet, en los que se infla un globo, colocado en el cuello de una botella, con el dióxido de carbono producido por la reacción entre un vinagre, introducido en la botella, al adicionarle el bicarbonato de sodio colocado en el globo,^[13] puesto que el ácido acético, CH₃-COOH abreviadamente HAC, que contiene el vinagre reacciona con el hidrogenocarbonato de sodio, NaHCO₃, produciendo acetato de sodio CH₃-COONa, dióxido de carbono CO₂, y agua H₂O, según la reacción ajustada:



Si se añade jabón a esta reacción, para estabilizar el dióxido de carbono formado:

- ¿Se podría utilizar el volumen de espuma como señal analítica?
- ¿Se podría utilizar este método para determinar el ácido acético presente en un vinagre?

La hipótesis es considerar que el volumen de espuma creado debe ser directamente proporcional a la cantidad de dióxido de carbono formado a partir del ácido acético inicial, siempre que el hidrogenocarbonato de sodio sea el reactivo en exceso. Para comprobar esto, se realiza el estudio experimental de la cantidad de espuma formada a partir de cantidades conocidas de ácido acético, estudiando las variables que puedan influir en el proceso.

Antes de empezar con el estudio de esta investigación se deben realizar unos cálculos previos:

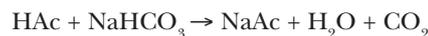
- Aplicando la conocida ecuación de los gases ideales se calcula el número de moles de CO₂ que teóricamente son necesarios para formar 6 ml y 100 ml de CO₂ (cotas inferior y superior de la probeta) a la temperatura ambiente del laboratorio:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \rightarrow$$

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 0,006}{0,082(273 + 18)} = 0,00025 \text{ moles CO}_2$$

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 0,100}{0,082(273 + 18)} = 0,00419 \text{ moles CO}_2$$

Teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción:



habría que estudiar inicialmente la reacción en un rango entre 0,0003 moles y 0,0040 moles de ácido acético.

- Por otra parte, 0,004 moles de HAc necesitan para reaccionar estequiométricamente 0,004 moles de hidrogenocarbonato de sodio (84 g/mol), por tanto, como mínimo una masa de 0,336 g. Para asegurar que en el instante final se tendrá esa cantidad se pesará 1,0 g.

REACTIVOS Y MATERIAL UTILIZADO

- Hidrogenocarbonato de sodio, NaHCO_3 .
- Ácido acético glacial, $\text{CH}_3\text{-COOH}$ (riqueza 99,5%, $d = 1,05\text{g/cm}^3$) con el que se prepara una disolución de ácido acético 1 M.
- Lavavajillas (marca Fairy).
- Balanza y espátula.
- Probetas iguales de 100 ± 1 ml.
- Vidrios de reloj, varilla y papel de filtro.
- Pipetas graduadas de $1 \pm 0,01$ ml, $2 \pm 0,02$ ml, $5 \pm 0,05$ ml, $10 \pm 0,1$ ml y succionador.
- Agitador magnético.
- Teléfono móvil.

En la Figura 1 se muestra el material utilizado:



Figura 1. Material utilizado: balanza, agitador magnético, ácido acético, hidrogenocarbonato de sodio, lavavajillas, probetas, pipetas graduadas, matraz aforado, succionador, espátula, papel de filtro

PRUEBAS PREVIAS

Formulada la hipótesis se debe comprobar a través de un procedimiento experimental si esta es verdadera o falsa.

Inicialmente, para comprobar si el volumen de espuma coincide con el volumen de CO_2 que se calcula con la ecuación de los gases ideales, se empieza con una experiencia que contiene: 1,6 ml de lavavajillas concentrado y 0,0020 moles de HAc, añadiendo agua hasta 10 ml. El volumen de la espuma resultó ser de 38 ml, medidos a los 30 s y 60 s después de haber añadido 1,0 g de NaHCO_3 , volumen menor al esperado, aproximadamente unos 48 ml.

Se hicieron, por ello, otras experiencias añadiendo 1,0 g de NaHCO_3 a 0,004, 0,006, 0,008 y 0,010 moles de HAc respectivamente y enrasando a 10 ml (valor que se sobrepasaba en la última experiencia). También se probó



Figura 2. Nivel de espuma para distintas cantidades de HAc, al rato de haber concluido los experimentos

con 5 ml de vinagre midiéndose la altura de la espuma a los 30, 60, 90 y 120 segundos (Figura 2).

De estas primeras experiencias se pudo concluir que:

- A mayor concentración de ácido acético se forma mayor volumen de espuma, pero menor al esperado con la ecuación de los gases ideales. La formación de la malla de espuma es un aspecto complejo en el que no solo interviene el CO_2 formado en la reacción, ya que tiene que subir venciendo fuerzas de cohesión, arrastra lavavajillas, etc. También influye la homogeneización de la muestra y se considera necesaria la utilización de un agitador magnético que, además, hará la reacción más rápida.
- El volumen de espuma formado varía con el tiempo transcurrido desde la adición del bicarbonato de sodio. El máximo volumen se obtiene en tiempos diferentes, dependiendo de los moles de ácido acético, de forma que en algunas muestras a los 60 s aún está subiendo, pero en otras ya está bajando. Consideramos que grabar con un móvil el transcurso de la reacción nos permitirá estudiar cuál es el tiempo más apropiado para realizar la medición.
- El uso del vidrio de reloj no resulta cómodo para echar rápidamente el hidrogenocarbonato de sodio. Resulta más práctico utilizar un trozo de papel de filtro.
- El lavavajillas es muy viscoso y se considera que esa viscosidad alterará la exactitud de la medida del jabón. Es conveniente estudiar qué porcentaje será el adecuado.
- La representación de los datos obtenidos no sigue una línea recta (Figura 3).
- En estas experiencias previas se enrasaba a 10 ml antes de llevarse a cabo la reacción. Sin embargo, cuando estas se realizan, la espuma no solo se expande hacia arriba sino también por debajo y el agua añadida influye en la lectura del volumen de espuma. Por ello se decidió no enrasar y realizar las medidas considerando los moles de HAc añadidos en vez de su concentración molar.

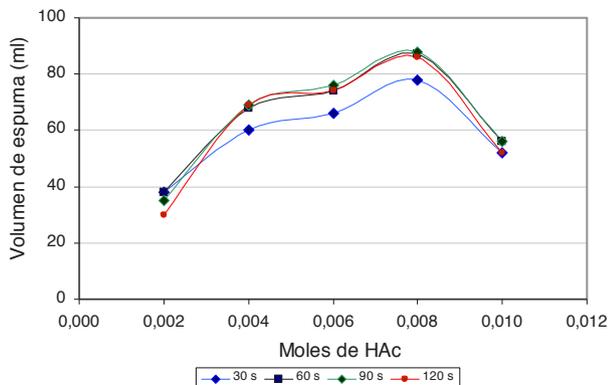


Figura 3. Volumen de espuma, medido a los 30 s, 60 s, 90 s y 120 s, formado en función de los moles de HAC, con 1,6 ml de lavavajillas (100%) y 1,0 g de NaHCO_3 a temperatura ambiente (18°C) y sin agitación ($n = 1$)

Teniendo en cuenta lo observado, se repiten las experiencias utilizando un agitador magnético, (graduado de 0 a 10) eligiendo inicialmente la velocidad 2 y un lavavajillas preparado al 50%. Se piensa que quizá con el agitador se puede producir más volumen de espuma y se utilizan menos moles de HAC, reduciéndose, por ello, la cantidad de bicarbonato de sodio a 0,8 g.

Las nuevas disoluciones contienen: 2,0 ml de lavavajillas al 50%, y de 0,0004 a 0,0040 moles de HAC. Se empieza a grabar con el teléfono móvil cuando se añaden los 0,8 g de NaHCO_3 . Una vez grabadas todas las experiencias, se miden los mililitros de espuma a los 30 s y 60 s (Figura 4) y se representan los datos en una gráfica (Figura 5).

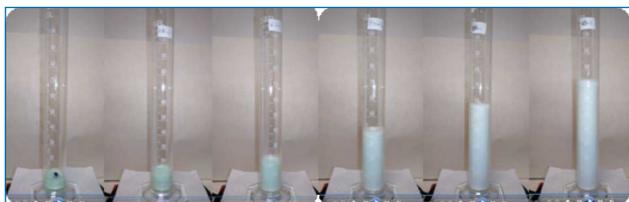


Figura 4. Volumen de espuma formado en función de los moles de HAC, con 2,0 ml de lavavajillas al 50%, a los 60 s de añadir 0,8 g de NaHCO_3 con velocidad 2 del agitador magnético a temperatura ambiente (18°C)

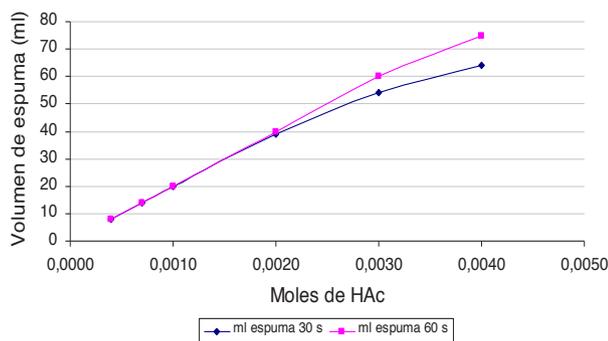


Figura 5. Representación gráfica del volumen de espuma, formado en función de los moles de HAC, con 2 ml de lavavajillas al 50%, a los 30 s y 60 s de añadir 0,8 g de NaHCO_3 , con velocidad 2 del agitador magnético a temperatura ambiente (18°C). ($n = 1$)

A la vista de estos resultados, comprobamos que:

- La agitación es fundamental para homogeneizar la muestra.
- El rango de linealidad está por debajo de los moles de HAC que se habían adicionado en las primeras experiencias, observándose linealidad entre 0,00040 moles y 0,0030 moles a los 60 s de adicionado el NaHCO_3 (Figura 5).

EFFECTO DE LAS VARIABLES EXPERIMENTALES

Estos resultados resultaron muy alentadores. Se procedió a estudiar los posibles factores que podrían influir en la formación de la espuma, para una determinada cantidad de ácido acético:

- Porcentaje de jabón.
- Influencia de la velocidad de agitación.
- Temperatura.

Porcentaje de jabón

Se utilizan 2,0 ml de lavavajillas al 10, 30, 50, 70 y 90% respectivamente, con 0,0020 moles de HAC. Se utilizó la velocidad 2 del agitador. Sin añadir el lavavajillas la espuma subió rápidamente alcanzando 20 ml a los 7 s, 7 ml a los 30 s y 6 ml a los 60 s. Exceptuando estos datos (0% de lavavajillas), que demuestran la necesidad de añadir el lavavajillas para estabilizar la espuma, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6.

Aunque el lavavajillas no es un reactivo, ni un catalizador de la reacción, a mayor porcentaje de lavavajillas, la espuma resulta más densa y tiene más dificultad para subir. A menores porcentajes, la espuma sube rápidamente, pero se mantiene menos tiempo. A la vista de los resultados se considera adecuado continuar con 2,0 ml de lavavajillas al 50%.

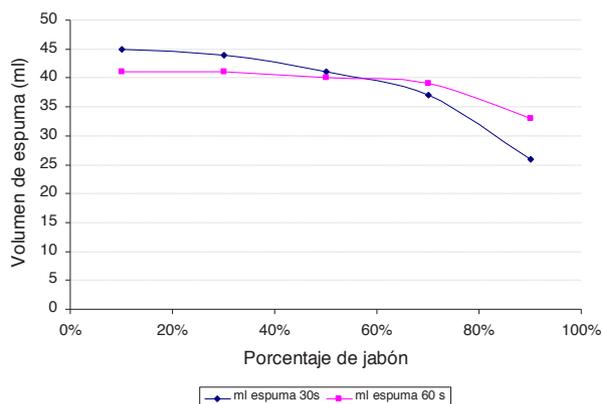


Figura 6. Volumen de espuma en función del porcentaje de lavavajillas, para 0,0020 moles de HAC, medido a los 30 s y 60 s de añadir 0,8 g de NaHCO_3 con velocidad 2 del agitador magnético a temperatura ambiente (18°C) ($n = 1$)

Influencia de la velocidad de agitación

La velocidad de agitación debe influir en la cinética de una reacción química, al aumentar el número de choques entre las moléculas de los reactivos y facilitar su contacto, pero no en la cantidad de CO_2 formado. Sin embargo, como la agitación podría producir espuma, independientemente de la concentración de CO_2 , se considera un factor a tener en cuenta.

Por ello, se prepararon muestras iguales conteniendo 0,0020 moles de HAc y 2 ml de lavavajillas al 50%. Se grabaron con el móvil y se determinaron los mililitros de espuma formados para las velocidades 0, 1, 2, 3, 4, 6 y 8 del agitador magnético (que está graduado de 0 a 10) al añadir los 0,8 g de NaHCO_3 a temperatura ambiente (18°C). Figura 7.

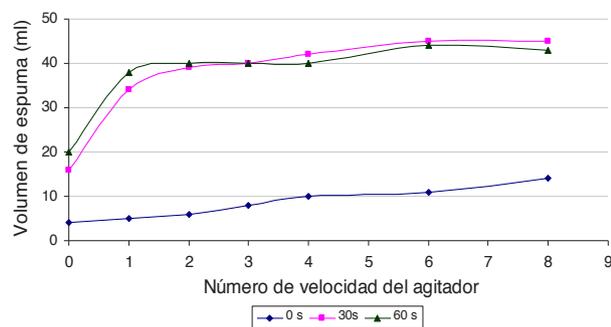


Figura 7. Volumen de espuma, en función de la velocidad del agitador magnético, para 0,0020 moles de HAc y 2,0 ml de lavavajillas al 50%, medido a los 0 s, 30 s y 60 s de haber añadido 0,8 g de NaHCO_3 a temperatura ambiente (18°C) ($n = 1$)

En este estudio la línea 0 s muestra la altura máxima alcanzada por la espuma antes de añadir el hidrogenocarbonato de sodio dejando un rato de agitación.

A la vista de los resultados se observa que lo importante es la homogeneización, ya que sin ella se obtiene poco volumen de espuma, pero no es necesaria una velocidad muy alta puesto que ello origina inicialmente espuma. Se considera la velocidad 2 como la más adecuada en este caso, pues proporciona más diferencia entre el volumen final y el inicial.

Estudio de la temperatura

Para asegurar la homogeneidad en la temperatura de la probeta, esta se ha introducido en un vaso con agua a diferentes temperaturas (Figura 8 a) y se ha dejado transcurrir tiempo para calentar el conjunto con 0,0020 moles de acético, 2,0 ml de lavavajillas al 50% y con una velocidad de agitación 2. Las temperaturas reales se midieron con el termómetro dentro de la probeta una vez terminada la reacción. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8 b).

No se observan grandes diferencias en el volumen de espuma obtenido al variar la temperatura. Como era de

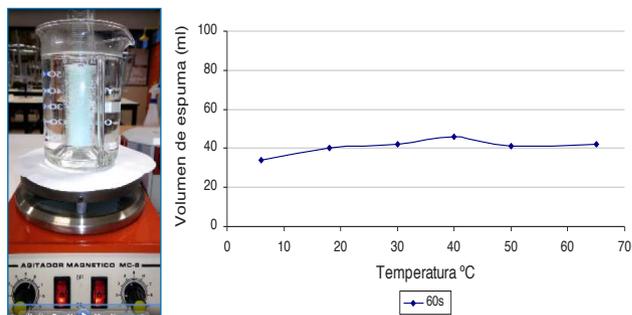


Figura 8. a) Medida del volumen de espuma a 50°C . b) Volumen de espuma, en función de la temperatura, medidos a los 60 s de añadir 0,8 g de NaHCO_3 , después de calentar, a 0,0020 moles de HAc, 2,0 ml de lavavajillas al 50% y con agitación 2 ($n = 1$)

esperar, sí se observa en la velocidad de reacción, ya que a mayores temperaturas la espuma sube inicialmente más deprisa. La dificultad que supone trabajar a temperaturas distintas de la ambiental y la poca variación observada condicionaron el seguir trabajando a temperatura ambiente.

DETERMINACIÓN DE ÁCIDO ACÉTICO

Influencia de la concentración y tiempo de reacción

Una vez estudiadas las variables anteriores, se realiza una recta de calibrado con las condiciones elegidas variando los moles de ácido acético.

Se observa que, para cantidades superiores a 0,0020 moles la espuma sigue subiendo después de los 30 s, y para cantidades superiores a 0,0040 moles la espuma sigue subiendo después de 60 s, por ello, se amplía el tiempo de reacción y también se tienen en cuenta los mililitros de espuma obtenidos a los 90 s (Figura 9).

No se pueden medir cantidades superiores a 0,0050 moles, pues el volumen de espuma supera la cota superior de la probeta.

Los factores de correlación y los intervalos analíticos, a diferentes tiempos de formación de espuma, se muestran en la Tabla 1.

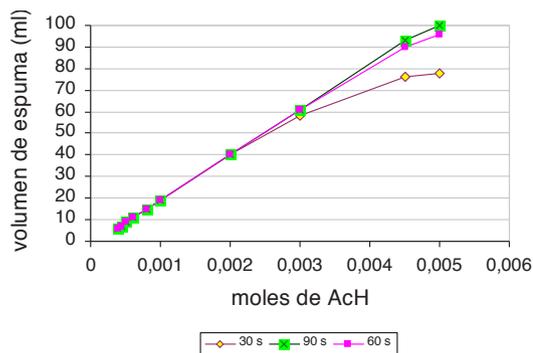


Figura 9. Volumen de espuma, en mililitros, formado en función de los moles de HAc, en un intervalo de concentración comprendido entre 0,0004 moles y 0,0050 moles, con 2,0 ml de lavavajillas al 50%, medido a los 30 s, 60 s y 90 s después de adicionar 0,8 g de NaHCO_3 , con velocidad 2 del agitador magnético, a temperatura ambiente (18°C) ($n = 1$)

Tabla 1. Rectas iniciales de calibrado a diferentes tiempos de formación de espuma

Tiempo (s)	Factor correlación r	Intervalo analítico (moles ACh)
30	0,9986	0,00040 - 0,0030
60	0,9997	0,00040 - 0,0045
90	0,9998	0,00040 - 0,0050

Estudio del intervalo analítico

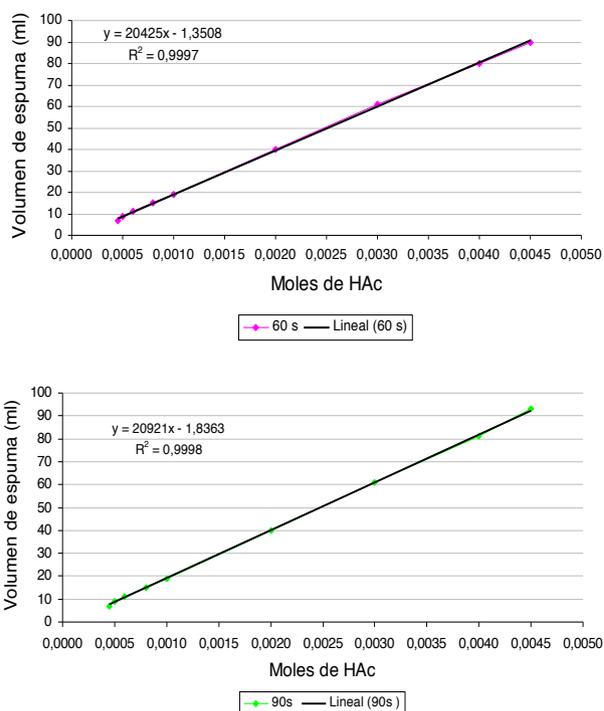
La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), en 1975, definió el límite de detección (término introducido por Karl Pearson en una comunicación a la Royal Society en 1894)^[14,15] como un número que expresa el más bajo nivel de concentración (o cantidad) de una sustancia que puede determinarse como estadísticamente diferente del blanco analítico. La American Chemical Society (1980) considera este límite como la más baja concentración de un analito que un procedimiento analítico puede detectar fidedignamente.^[16] Posteriormente, la IUPAC reformuló la definición “Es la menor concentración de analito que puede ser detectada con un cierto nivel de confianza”. Va en aumento la tendencia a definir el límite de detección, como la concentración de analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco más tres veces la desviación estándar del blanco, pero esta definición es muy arbitraria y está totalmente abierta a cualquier analista para que proponga una definición alternativa para un propósito concreto.^[17]

El límite de cuantificación instrumental (LCI) o límite de determinación (LOQ) se puede definir como la cantidad más pequeña de un analito que se pueda cuantificar confiablemente por el instrumento. Generalmente se considera como el valor del blanco de la muestra más 5, 6 o 10 desviaciones estándar de la media del blanco.

En el estudio que nos ocupa, el blanco queda por debajo de la cota inferior de la probeta (2 ml de lavavajillas más el imán más el hidrogenocarbonato de sodio), por ello no se puede calcular la desviación estándar del blanco. Se ha supuesto que el límite de detección y cuantificación viene determinado fundamentalmente por la cota inferior de la probeta y su error: 6 ± 1 ml y, por tanto, se ha considerado el límite de detección y cuantificación instrumental como los moles de acético que producirían 7 ml de espuma, que corresponderían a 0,00042 moles de acético con las rectas de calibrado anteriores. Se elimina entonces el valor de 0,00040 moles de la recta de calibrado por considerarse el de menor confianza. En probetas con cotas inferiores de 10 ± 1 ml se deberán eliminar los moles de HAc cuyo valor de espuma se encuentre por debajo de ese valor.

Rectas de calibrado

Las rectas de calibrado, teniendo en cuenta el tiempo de reacción, son las que se muestran en la Figura 10 a (60 s) y Figura 10 b (90 s). Los factores de regresión y los intervalos analíticos entre los que se pueden utilizar dichas líneas de calibrado se resumen en la Tabla 2. Con estas curvas de calibrado se pueden determinar los moles de ácido acético presentes en una disolución a partir de los mililitros de espuma formados.

**Figura 10.** Rectas de calibrado del volumen de espuma formado en función de los moles de HAc, en un intervalo de concentración comprendido entre 0,00045 moles y 0,0045 moles con 2 ml de lavavajillas al 50%, a los 60 s (a) y 90 s (b) de haber adicionado 0,8 g de NaHCO_3 con velocidad 2 del agitador magnético a temperatura ambiente (18°C) ($n = 1$)**Tabla 2.** Rectas de calibrado a diferentes tiempos de formación de espuma

Tiempo (s)	Factor correlación r	Intervalo analítico (moles HAc)
30	0,9991	0,00045 - 0,00300
60	0,9997	0,00045 - 0,00450
90	0,9998	0,00045 - 0,00450

Procedimiento experimental

A una probeta de 100 ml se le adicionan: 2,0 ml de lavavajillas al 50%, un volumen adecuado de ácido acético (estándar o muestra), de forma que el número de moles

oscile entre 0,00045 y 0,00450 moles, y un pequeño imán. El móvil está preparado y colocado. A continuación se coloca la probeta sobre el agitador, ya en marcha, se pone a grabar el móvil y se adicionan 0,8 g de NaHCO₃, trabajando a temperatura ambiente (18°C). Se registra hasta sobrepasados los 90 s y, después, se anotan los volúmenes alcanzados por la espuma a los 60 s y 90 s.

Para construir la recta de calibrado se relaciona el nivel de espuma, alcanzado a los 60 s o 90 s de tiempo de reacción, con la concentración de las diversas disoluciones.

Estudio estadístico de los resultados

Toda medición está bajo la influencia de un gran número de incertidumbres, las cuales se combinan para producir una dispersión en los resultados, por ello, es de gran importancia estimar la confiabilidad de los datos experimentales cada vez que se obtienen resultados en el laboratorio. No existe un método simple y de aplicación universal para determinar con absoluta certeza la confiabilidad de los datos de un análisis.^[18]

Para revelar la presencia de errores aleatorios se pueden aplicar pruebas estadísticas a medidas repetidas.^[17] Para ello, se van a aplicar los siguientes parámetros estadísticos a series de ocho ensayos iguales de tres cantidades distintas de moles de ácido acético:

- El valor promedio o media aritmética: $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$
- Desviación estándar (muestra): $S = \pm \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
- Desviación estándar de la media $S_m = \frac{S}{\sqrt{n}}$,
- Coeficiente de variación o desviación estándar relativa CV = DER = $\frac{S}{\bar{x}} \cdot 100$
- Error del método % E = $\pm \frac{t_{n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}}{\bar{x}}$

Se encuentra en las tablas de Fisher, para siete grados de libertad y 95% de probabilidad, el valor de $t = 2,36$.

El intervalo de confianza de una distribución muestral ($n < 30$) se encuentra comprendido entre:^[17]

$$\bar{x} - t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

La exactitud del método se puede determinar por la comparación de los resultados obtenidos con un patrón de referencia. De este modo se pone de manifiesto la existencia o no de errores sistemáticos. Llamando x_{verd} al valor de referencia y \bar{X} al valor medio encontrado se calculan t_{exp} y t'_{exp} :

$$t_{\text{exp}} = \frac{|x_{\text{verd}} - \bar{X}|}{S} \quad t'_{\text{exp}} = \frac{|x_{\text{verd}} - \bar{X}|}{S_m}$$

- Si $t_{\text{exp}} < t_{\text{tabulado}}$ en las tablas estadísticas de Fisher ($t = 2,36$) el método es reproducible.

- Si $t'_{\text{exp}} < t_{\text{tabulado}}$ no existen errores sistemáticos.^[19]

Al no disponer de disoluciones patrón se ha preparado una nueva disolución de HAc 1 M que se ha tomado como valor de referencia.

En las Tablas 3 y 4 se resumen los valores de los parámetros estadísticos calculados.

Tabla 3. Estudio estadístico para diferentes cantidades de ácido acético a los 60 s de tiempo de reacción

Tiempo = 60 s			
n_{AcH}	8,0·10 ⁻⁴ mol	2,0 · 10 ⁻³ mol	4,0·10 ⁻³ mol
\bar{n}_{AcH}	8,13·10 ⁻⁴ mol	2,04 · 10 ⁻³ mol	4,00·10 ⁻³ mol
S	3,42·10 ⁻⁵	2,59·10 ⁻⁵	8,43·10 ⁻⁵
S_m	1,21·10 ⁻⁵	9,15·10 ⁻⁶	2,98·10 ⁻⁵
DER	4,21%	1,27%	2,11%
% E	3,52%	1,06%	1,76%
Intervalo confianza	(8,13 ± 0,29)·10 ⁻⁴ mol	(2,04 ± 0,02)·10 ⁻³ mol	(4,00 ± 0,07)·10 ⁻³ mol
t_{exp}	0,383	1,497	0,015
t'_{exp}	1,082	4,235 [#]	0,042

Tabla 4. Estudio estadístico para diferentes cantidades de ácido acético a los 90 s de tiempo de reacción

Tiempo = 90 s			
n_{AcH}	8,0·10 ⁻⁴ mol	2,0 · 10 ⁻³ mol	4,0·10 ⁻³ mol
\bar{n}_{AcH}	8,05·10 ⁻⁴ mol	2,03 · 10 ⁻³ mol	3,97·10 ⁻³ mol
S	2,56·10 ⁻⁵	2,58·10 ⁻⁵	5,82·10 ⁻⁵
S_m	9,07·10 ⁻⁶	9,15·10 ⁻⁶	2,06·10 ⁻⁵
DER	3,18%	1,27%	1,47%
% E	2,66%	1,06%	1,22%
Intervalo confianza	(8,05 ± 0,21)·10 ⁻⁴ mol	(2,03 ± 0,02)·10 ⁻³ mol	(3,97 ± 0,05)·10 ⁻³ mol
t_{exp}	0,195	1,208	0,472
t'_{exp}	0,551	3,416 [#]	1,335

Se puede observar que el método es reproducible y con menor error para 90 s de tiempo de reacción, aunque la determinación de 0,00200 moles presenta peor reproducibilidad y error sistemático ya que el valor de t'_{exp} tiene un valor mayor que el tabulado (2,36).

SELECTIVIDAD. INTERFERENCIAS

Todos los ácidos reaccionarán con el hidrogenocarbonato de sodio produciendo CO_2 , por tanto este método no presenta selectividad y serviría para medir todos los moles de ácido presentes en una muestra.

No se ha realizado estudio de iones interferentes.

APLICACIÓN DEL MÉTODO A MUESTRAS REALES

Para comprobar la validez del método propuesto en casos reales, la curva de calibración se ha aplicado a la determinación del ácido acético en diversos vinagres. No se requiere preparación especial. Un pequeño volumen de vinagre se vierte sobre un vaso de precipitados de donde se toman entre 2 y 3 ml.

En función de los datos aportados por el estudio estadístico se han utilizado tiempos de reacción de 90 s. Los resultados encontrados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Determinación de ácido acético en diversos vinagres

Muestra* [20]	Valor etiqueta**	Valor encontrado
Vinagre de Jerez D.O.P. Reserva Sherry	8%	(8,10 ± 0,11)% (n = 2)
Vinagre balsámico de módena Hacendado botella 1	6%	(5,99 ± 0,04)% (n = 3)
Vinagre balsámico de módena Hacendado botella 2	6%	(6,07 ± 0,00)% (n = 3)
Vinagre de vino blanco Hacendado	6%	(6,05 ± 0,00)% (n = 2)
Vinagre blanco de vino en sobre sin marca	6%	(6,12 ± 0,08)% (n = 3)
Vinagre de sidra Kania	5%	(5,02 ± 0,07)% (n = 3)

n = número de determinaciones.

* Según Real Decreto 661/2012, de 13 de abril, por el que se establece la norma de calidad para la elaboración y comercialización de los vinagres. (BOE de 26/04/2012, páginas 32031-32036):

Artículo 3. Definiciones.

1. Vinagre: Es el líquido apto para el consumo humano resultante de la doble fermentación alcohólica y acética de productos de origen agrario.
2. Grado de acidez de los vinagres: Acidez total expresada en gramos de ácido acético por 100 mililitros.
3. Vinagre de vino: Es el producto obtenido exclusivamente por fermentación acética del vino.
5. Vinagre de sidra: Es el producto obtenido a partir de sidra, mediante fermentación acética.
10. Vinagre balsámico: Es el producto obtenido por adición de mosto de uva, mosto de uva concentrado o mosto de uva concentrado rectificado al vinagre de vino, dando lugar a un vinagre dulce, con un contenido mínimo de azúcar total de 150 g/l, procedente exclusivamente de los mostos indicados.

**Artículo 11. Etiquetado.

3. Se indicará el grado de acidez, seguido del símbolo «%» o «°».

Con respecto al grado de acidez reflejado en la etiqueta, se admitirá, siempre que el vinagre cumpla con el mínimo establecido en el artículo 8.2.a), una diferencia, en más o en menos, de 0,2°.

IMPLEMENTACIÓN Y TEMPORALIZACIÓN DE LA PROPUESTA DIDÁCTICA

La temporalización vendrá marcada por la forma en la se decida abordar este estudio.

La opción que implica menos tiempo es la de trabajar con tres grupos, si se dispone de tres agitadores magnéticos, para repartir tareas:

- En la primera sesión se realiza el planteamiento inicial, por el profesor o la profesora, con el material y reactivos ya preparados.
- En la segunda sesión, elaboradas las hipótesis de trabajo, cada grupo realiza el estudio de una de las variables a tener en cuenta: porcentaje de lavavajillas, agitación y temperatura.
- En la tercera sesión, una vez elegidas las condiciones más favorables, cada grupo realiza las experiencias para su gráfica de calibrado, la repetición de una concentración y la aplicación del método a las muestras de vinagre. Según la organización y destreza del alumnado del grupo podrían ser necesarias dos sesiones o una sesión algo más larga.

Cada alumna y alumno del grupo, a partir de las experiencias grabadas, elaborará en casa, con ayuda de la calculadora o una hoja de cálculo, las gráficas correspondientes, la recta de calibrado, el estudio estadístico y los informes pertinentes.

La otra opción, si se tienen más sesiones disponibles, es que todos los grupos realicen todos los estudios.

CONCLUSIÓN

Se ha diseñado una práctica que permite aplicar, de forma muy sencilla en el laboratorio escolar, el método de calibración utilizando reactivos baratos y fácilmente disponibles, usando como instrumentación un agitador magnético.

Se han seguido los pasos elementales que se deben dar en el proceso de calibración de un instrumento analítico:^[7]

- Diseñar los experimentos.
- Hacer las medidas.
- Representar los resultados.
- Obtener la función de calibrado.
- Usar la función de calibrado para estimar la incertidumbre asociada a valores de muestras de prueba.
- Comprobar la validez de la curva aplicándolas a muestras reales de concentración conocida. En nuestro caso se ha aplicado con éxito a la determinación de ácido acético en diversos vinagres.

Una vez realizada la calibración el método resulta muy rápido para la determinación de ácido acético.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Burriel Martí, F.; Lucena Conde, F.; Arribas Jimeno, S.; Hernández Méndez, J. *Química Analítica Cualitativa*, Paraninfo, Madrid, 1985.
- [2] Skoog, D. A.; West, D. M. *Análisis instrumental*. Interamericana, México, D. F. 1987.
- [3] Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato. BOE de 03/01/15, 169-546. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2014/12/26/1105/>
- [4] Real Decreto 661/2012, de 13 de abril, por el que se establece la norma de calidad para la elaboración y comercialización de los vinagres. BOE de 26/04/2012, 32031-32036. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2012/BOE-A-2012-5529-consolidado.pdf>
- [5] Connors, K. A. *Curso de Análisis farmacéutico: Ensayo del medicamento. Valoraciones de oxidación-reducción*. Ed. Reverté, Barcelona, 1981, 1-45.
- [6] Val-Castillo, O. Estudio de sustancias naturales como indicadores de pH: Una propuesta didáctica. *An. Quím.*, **2020**, *116*(2), 88-98.
- [7] Prichard, L., Barwick, V. *Preparation of Calibration Curves. A Guide to Best Practice*. **2003**. DOI: [10.13140/RG.2.2.36338.76488](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36338.76488).
- [8] Moosavi, S. M.; Ghassabian, S. Linearity of Calibration Curves for Analytical Methods: A Review of Criteria for Assessment of Method Reliability. In *Calibration and Validation of Analytical Methods: A Sampling of Current Approaches*. IntechOpen Limited, Londres, UK, 2018, 109-127. DOI: [10.5772/intechopen.72932](https://doi.org/10.5772/intechopen.72932).
- [9] Cid Manzano, R.; González-Fernández, D. Una aproximación a la espectrometría en Educación Secundaria. *An. Quím.*, **2020**, *116*(1), 25-29.
- [10] Tomás-Serrano, A.; Hurtado-Pérez, J. Experimentos cuantitativos de química, con materiales de bajo coste, para alumnos de Bachillerato. *An. Quím.*, **2019**, *115*(5), 421-428.
- [11] Orden ECD/65/2015, de 21 de enero, por la que se describen las relaciones entre las competencias, los contenidos y los criterios de evaluación de la educación primaria, la educación secundaria obligatoria y el Bachillerato. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2015, 25, 6986-7003. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2015/BOE-A-2015-738-consolidado.pdf>
- [12] Aguilar Muñoz, M.L.; Durán Torres, C. Química recreativa con agua oxigenada, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, **2011**, *8*, 446-453. <https://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/2737/2385>
- [13] National Geographic Partners LLC. *Química 1000*. Manual de experimentos, Bresser, Rhede. 2015. <http://archive.bresser.de/download/9130300/Espanol/Manual/ANL9130300ES1115NG.pdf>
- [14] Pearson, K. On the dissection of asymmetrical frequency curves. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **1894**, *185*, 71-110. http://www.quantresearch.org/1894_Pearson_Transactions_Royal_Society.pdf
- [15] Salkind, N. J. *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. SAGE Publications. 2006, 1416. <https://books.google.es/books?id=HJ91CgAAQBAJ&pg=PT902#v=onepage&q&f=false>
- [16] Quino, I.; Ramos, O.; Guisbert, E. Determinación del límite de detección instrumental (LDI) y límite de cuantificación instrumental (LCI) en elementos traza de agua subterránea. *Rev. Bol. Quím.* **2007**, *24*(1), 53-57.
- [17] Miller, J. N.; Miller, J. C. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. 4.ª ed. Prentice Hall, Madrid. 2002.
- [18] Skoog, D. A.; West, D. M.; Holler, F. J.; Crouch, S. R. *Fundamentos de Química Analítica*. 9.ª ed. Cengage Learning, México. 2014.
- [19] Val Castillo, O. *Sistemas fotoanalíticos estáticos y en flujo para la determinación de sustancias de interés biológico e industrial*. Tesis doctoral. Murcia. 1993.
- [20] León Gutiérrez, J. M.; Ramírez Pérez, P. *El Vinagre. Clases, Elaboraciones y Usos*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Córdoba. 2020. 1-25.

Los aceites esenciales y su actividad biológica

Una propuesta didáctica

Juan Antonio Llorens-Molina

Resumen: En este artículo se propone un modelo de actividad educativa basado en la investigación actual sobre la aplicación de los aceites esenciales como alternativa natural a productos obtenidos por síntesis química. Concretamente, se plantea y discute un experimento para la observación de las actividades antifúngica e inhibidora de la germinación, relacionadas con la investigación sobre aditivos alimentarios y herbicidas naturales alternativos. Su objetivo es contribuir al desarrollo de la sensibilidad medioambiental del alumnado a lo largo de las diferentes etapas del Sistema Educativo, así como de su valoración de la investigación científica.

Palabras clave: aceites esenciales, actividad antifúngica, germinación, sostenibilidad, educación medioambiental.

Abstract: A model of educational activity based on current research on the application of essential oils as a natural alternative to products obtained by chemical synthesis is proposed in this paper. Specifically, an experiment is proposed and discussed for the observation of antifungal and germination inhibitor activities, related to research on alternative food additives and natural herbicides. Its objective is to contribute to the development of students' environmental sensitivity over the different stages of the Educational System, as well as their contribution to the social appreciation of scientific research.

Keywords: essential oils, antifungal activity, germination, sustainability, environmental education.

INTRODUCCIÓN

El sistema educativo se enfrenta actualmente, entre otros, a dos importantes retos: promover una creciente sensibilidad medioambiental y contribuir a una mayor valoración social de la investigación científica. En cuanto al primero, es patente la existencia de una creciente concienciación sobre el respeto al medio ambiente y la necesidad de un desarrollo sostenible,^[1] que tiene su reflejo en los objetivos de la educación científica.^[2]

A pesar de las limitaciones que obstaculizan el desarrollo del trabajo experimental en los niveles educati-

vos no universitarios, no podemos renunciar a adoptar iniciativas para afrontar los citados retos. Para ello, un punto de partida puede ser el reconocimiento de las líneas de investigación que contribuyen a avanzar hacia un desarrollo sostenible. Un buen ejemplo puede ser la investigación sobre productos naturales como alternativa a los obtenidos por síntesis química.^[3] Esta línea de investigación ha sido impulsada además por la implantación de normativas cada vez más restrictivas por el carácter nocivo o tóxico de muchas de las sustancias empleadas y por la creciente aceptación por los consumidores de los productos procedentes de la agricultura y ganadería ecológicas. Esta alternativa está basada en los diversos tipos de actividad biológica que fundamentan su empleo como plaguicidas, herbicidas, aditivos alimentarios, etc.^[4] En este contexto cabe destacar la aplicación de los productos del metabolismo secundario de las plantas y concretamente de los aceites esenciales (AEs, en adelante).

Surge pues así una conexión entre enseñanza e investigación que contribuye a afrontar el segundo reto inicialmente planteado: promover la valoración social de la investigación científica. Pese a los esfuerzos realizados desde el sistema educativo para incorporar a los currícula aspectos básicos de la metodología científica,



J. A. Llorens-Molina

ETS de Ingeniería Agronómica y del Medio Rural
Universitat Politècnica de València
Camí de Vera, s/n, 46022, València
C-e: juallom2@qim.upv.es

Recibido: 06/03/2021. Aceptado: 11/054/2021.

cabe destacar un dato significativo: un 58,1% de la población española considera escaso el reconocimiento social de la profesión de investigador/a.^[5] El papel que el sistema educativo puede ejercer en este sentido puede ser notablemente relevante con la integración de pequeñas investigaciones en la docencia no universitaria. Es ésta una valiosa contribución en este sentido,^[6] que favorece además la alfabetización científica de sectores cada vez más amplios de la sociedad.^[7] Ahora bien, dicha integración exige la selección de contenidos susceptibles de una transposición didáctica accesible y adecuada a los diferentes niveles educativos.

¿POR QUÉ LOS AEs?

En este trabajo se proponen dos modelos de actividad basados en la actividad biológica de los AEs. El porqué de esta elección se basa en diferentes hechos que justifican su capacidad de transposición didáctica.^[8]

Una primera razón, de índole sociocultural, es que los AEs se obtienen principalmente de las plantas aromáticas. Desde un punto de vista etnobotánico, muchas de ellas se hallan vinculadas a nuestra vida cotidiana: desde el consumo de infusiones, al empleo de la albahaca o el clavo como repelentes de insectos, la lavanda y el laurel para preservar la ropa en los armarios, o la ajedrea y algunos tipos de tomillos para aderezar aceitunas de mesa, etc. Mención aparte merece la creciente popularidad de los AEs en aromaterapia.^[9]

Otra razón para su aplicación educativa, ésta de carácter práctico, es que son productos de elevada disponibilidad, tanto comercial como experimental, ya que existen métodos relativamente sencillos para su obtención. Asimismo, su caracterización química y el estudio de algunos aspectos de su bioactividad son susceptibles de un tratamiento experimental adaptable, en cuanto a metodología y recursos, a diferentes niveles educativos.^[10]

Por último, desde el punto de vista de su relación con los contenidos académicos, muchos de los compuestos mayoritarios de los AEs poseen una estructura molecular relativamente sencilla, con diversos grupos funcionales que son objeto de estudio en 4.º de la ESO, Bachillerato y primer curso de muchos grados universitarios.

¿QUÉ SON LOS AES?

Los AEs están constituidos por la fracción volátil y semivolátil de los productos del metabolismo secundario de las plantas. Estos compuestos pueden aislarse mediante numerosos métodos de extracción, dando lugar habitualmente a composiciones de elevada complejidad. No obstante, el concepto de aceite esencial se halla vinculado al uso concreto de determinados métodos de extracción, tal como se define a partir de la norma ISO 9235:2013(en), término 2.11, que define el aceite esencial como:

Producto obtenido a partir de una materia prima natural de origen vegetal, por destilación al vapor, por procesos mecánicos a partir del epicarpio de los cítricos, o por destilación en seco, después de la separación de la fase acuosa, en su caso, por procesos físicos.

En cuanto a su naturaleza química, los AEs contienen principalmente terpenos, moléculas formadas por unidades de isopreno (2-metilbuta-1,3-dieno) y concretamente por monoterpenos, sesquiterpenos y diterpenos, constituidos por dos, tres o cuatro unidades de isopreno, respectivamente, así como por sus derivados oxigenados: alcoholes, aldehídos y cetonas, ésteres y epóxidos, denominándose en general “terpenoides”. También forman parte de los AEs otros tipos de compuestos como los fenilpropanoides, así como alcoholes, aldehídos y cetonas alifáticos, etc.

Es muy importante precisar que, para una misma categoría taxonómica de la planta de origen, la composición de un aceite esencial puede presentar una gran variabilidad.^[11] En primer lugar cabe referirse a la presencia de quimiotipos o “razas químicas”, de naturaleza genética, a veces vinculados a procedencias geográficas específicas, pero también presentes en una misma población. De hecho, los AEs comercializados de calidad se presentan “quimiotipados”, es decir, indicando a qué quimiotipo corresponden. En segundo lugar, factores abióticos, relacionados con la temperatura, precipitación, luz, naturaleza del suelo, pH, salinidad, etc., variables que afectan a la fisiología de la planta y cuya influencia suele ser más cuantitativa que cualitativa. En tercer lugar, factores relacionados con la propia evolución de la planta a lo largo de su ciclo vegetativo, así como con el órgano considerado. Puede haber, por ejemplo, cambios muy notorios entre la fase de crecimiento vegetativo y el período de floración, así como entre las hojas, inflorescencias y semillas. Cabe considerar por último el método de extracción utilizado. Entre ellos destaca la hidrodestilación, la cual consiste en someter la muestra a ebullición en agua. El vapor generado arrastra consigo el aceite esencial, que puede separarse por su inmiscibilidad con el agua tras la condensación. Este proceso puede adaptarse al material disponible en los laboratorios de Educación Secundaria.^[12] Cabe citar también los métodos mecánicos utilizados en la obtención de AEs de cítricos, basados en el prensado o raspado del epicarpio (parte exterior de la corteza), que contiene las glándulas con el aceite esencial, y otros procesos más recientes como la destilación asistida por microondas o la extracción con CO₂ supercrítico.

ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE LOS AES

En las últimas décadas, los AEs han sido objeto de creciente atención, más allá de sus tradicionales aplicaciones en cosmética y aromaterapia, como consecuencia de su amplio espectro de actividades biológicas.^[13] Estas se hallan relacionadas principalmente con la medicina

y el sector agroalimentario, aunque también con aplicaciones tales como la protección de metales frente a la corrosión como en el caso del obtenido de la *Artemisia herba-alba* Asso, conocida popularmente como ontina.^[14] En cuanto a las aplicaciones agroalimentarias cabe destacar el empleo de numerosos AEs en la preservación y conservación de alimentos por su actividad antioxidante. De este modo, compuestos fenólicos como el timol o el carvacrol, pueden ser aplicados como alternativa al butilhidroxianisol (BHA, E-320) y al butilhidroxitolueno (BHT, E-321), aditivos con posibles efectos nocivos.^[15] Las actividades antibacteriana y antifúngica de numerosos AEs pueden ser también una alternativa a productos tales como el ácido benzoico (E-210) y el benzoato sódico (E-211) utilizado en refrescos, salsas, etc., o los nitratos y nitritos de sodio y potasio (E-251, E-252, E-250 y E-249, respectivamente), empleados en industrias cárnicas para prevenir el botulismo y estabilizar sabor, aroma y color.^[16]

Desde el punto de vista agronómico cabe citar también su aplicación como plaguicidas alternativos, representando en algunos casos la evolución de prácticas tradicionales.^[17] También puede citarse el carácter alelopático y fitotóxico de determinados AEs, que consiste en la capacidad de liberar compuestos químicos capaces de influir en la germinación, desarrollo o reproducción de otras plantas. Este es el fundamento de prometedoros ensayos en tratamientos de fitotoxicidad selectiva en malas hierbas, bien por su acción directa sobre las plántulas, bien por su capacidad para inhibir la germinación de sus semillas,^[18] constituyendo una alternativa a productos como el glifosato, de contrastado impacto medioambiental.^[19]

UNA PROPUESTA EDUCATIVA

El objetivo de este trabajo es proponer, mediante una adecuada transposición didáctica, un modelo de actividad inspirado en la investigación sobre la actividad biológica de los AEs en torno a dos problemas concretos: la conservación de los alimentos y el control de las denominadas “malas hierbas”. Su diseño parte de experimentos muy sencillos ampliamente utilizados a lo largo del sis-

tema educativo: la germinación de semillas y la observación del enmohecimiento del pan debido a hongos del género *Rhizopus*.^[20] Sobre esta base se plantea un proceso experimental que puede servir de base para proponer pequeñas investigaciones adaptadas a las distintas etapas educativas. Se han elegido estos dos tipos de actividad biológica porque sus efectos son claramente perceptibles en intervalos de tiempo apropiados para una actividad escolar y porque el material es accesible y de bajo coste. Además, no implican precauciones importantes de seguridad, salvo las inherentes al manejo de AEs y las propias de cualquier tarea experimental en química.

Desarrollo de la actividad. Materiales y método

Se han elegido los AEs de ontina (*Artemisia herba-alba* Asso.), salvia, (*Salvia officinalis* L.); orégano (*Origanum vulgare* L.) y alcaravea (*Carum carvi* L.). Estos se caracterizan por un amplio espectro de aplicaciones farmacológicas, antioxidantes, antifúngicas y antibacterianas, así como de inhibición de la germinación. Ejemplos significativos son la capacidad antioxidante del aceite de orégano, así como el empleo del aceite esencial de alcaravea, cuyo compuesto mayoritario, la *S*-carvona, inhibe la germinación de las patatas durante su almacenamiento.^[21]

Material y método de trabajo

Se enumeran a continuación los recursos para el desarrollo del experimento descrito y el modo de utilizarlos:

- Muestras de AEs, adquiridas en comercios especializados. En el experimento descrito se han utilizados los siguientes: Alcaravea (semillas de *Carum carvi* L.) de Pranarôm®, *Salvia officinalis* L., Namasté® y aceites de orégano (*Origanum vulgare* L.) y ontina (*Artemisia herba-alba* Asso.): ambos de Terpenic lab®. La estructura de sus compuestos mayoritarios se muestra en la Figura 1.
- Tarrinas de uso alimentario de plástico (PET) y papel absorbente de cocina. Las tarrinas se preparan

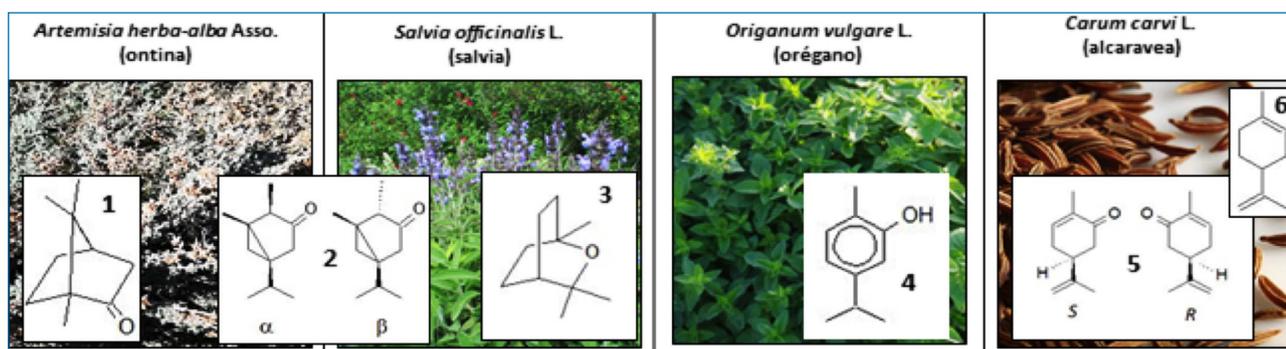


Figura 1. Aceites empleados y compuestos más representativos: 1. Alcanfor, 2. α y β -Tuyona, mayoritarios tanto en la ontina como en la salvia, 3. Eucaliptol, 4. Carvacrol, 5. Estereoisómeros S y R de la carvona (El S se halla en la alcaravea, el R en otras especies como en la *Mentha spicata* L), 6. Limoneno

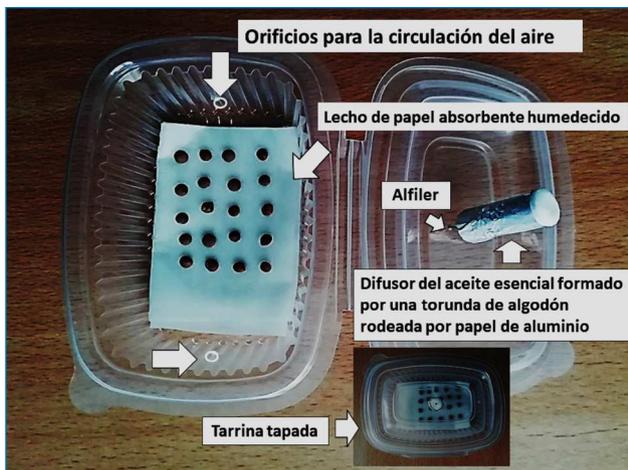


Figura 2. Tarrina para el ensayo de germinación con la torunda envuelta en papel de aluminio y fijada a la tapa

del modo mostrado en la Figura 2, practicando dos pequeños orificios a unos 2 cm de altura sobre la base para asegurar una mínima circulación necesaria de aire. Sobre la base de la tarrina se disponen tres o cuatro capas de papel de cocina que, convenientemente humedecidas, mantendrán las condiciones adecuadas para el crecimiento de los hongos sobre una pequeña rebanada de pan integral y para la germinación de las lentejas.

- Difusores del aceite esencial preparados con torundas de algodón de las usadas en odontología, envueltas lateralmente en papel de aluminio con objeto de conseguir una difusión lenta y progresiva de los vapores del aceite esencial en el interior de la tarrina.

Se añade gota a gota 1 mL de aceite esencial en el difusor y se tapa la tarrina. En la experiencia descrita las muestras han permanecido en oscuridad durante 8 días a una temperatura estable de 20°C, aproximadamente. Las muestras en las que se ensaya un determinado aceite esencial y sobre todo las pruebas en blanco deben permanecer lo suficientemente alejadas entre sí por la volatilidad de los AEs.

ORIENTACIONES DIDÁCTICAS

Sobre la base de este experimento pueden introducirse variaciones que afecten a los procesos estudiados. Estas pueden adaptarse en cuanto a complejidad y conocimientos previos a diferentes etapas educativas, indicadas a continuación, a título orientativo.

Inicial (2.º ciclo de Educación Primaria). Consistiría en una versión muy simplificada del experimento, centrada en los aspectos sensoriales, reconociendo algunos AEs y relacionándolos con plantas de su entorno que podrían tener en el aula. Tomillo, romero, lavanda o salvia son muy accesibles, tanto las propias plantas como

sus AEs y en ellos pueden observarse las actividades biológicas estudiadas. Al mismo tiempo, actividades centradas en la expresión oral o plástica sobre el desarrollo y resultado del experimento podrían ser también muy sugestivas. También sería la oportunidad de dar a conocer a este alumnado el significado de la fecha de caducidad de los alimentos y de prevenirles sobre la presencia de moho en ellos.

Intermedio (primer ciclo de la ESO). El experimento podría realizarse con el diseño completo, poniendo el acento en la organización y representación de los datos mediante posters o en formato digital, según las habilidades informáticas y medios disponibles del alumnado. Entraría en juego la comparación cualitativa y el papel del experimento en blanco, como introducción al diseño experimental. Podría incluso plantearse una primera aproximación cuantitativa en el experimento de germinación mediante la medida a lo largo del tiempo de la longitud de los tallos y raíces de las lentejas germinadas. Asimismo, también puede ser de interés la experimentación y comparación con otras semillas que germinan con facilidad como el trigo, cebada o soja.

En una etapa posterior (2.º ciclo de la ESO y Bachillerato), se abordarían procesos característicos de la metodología científica como el control de variables. Podrían someterse a comparación factores tales como la influencia de la luz, que permitiría la fotosíntesis una vez germinadas las semillas, el aporte de oxígeno, necesario para asegurar la respiración celular y, por tanto, el desarrollo de los procesos estudiados, así como el efecto de la temperatura, que es el factor habitualmente utilizado en la vida cotidiana (refrigeración) para la conservación de los alimentos. Algunos aspectos del diseño experimental propuesto cobrarían entonces protagonismo: papel de los orificios practicados en la tarrina, necesarios para asegurar el aporte de oxígeno, el control de la iluminación y la temperatura, así como el uso de difusores para una liberación controlada de los vapores del aceite esencial. A partir de 4.º de la ESO se podrían comentar las propiedades de algunos compuestos representativos de los AEs, identificando sus grupos funcionales, así como ejemplos de la importancia de la isomería, como el ya citado acerca de la diferente acción de los isómeros ópticos de la carvona. La lectura y discusión de algún artículo de divulgación sobre problemas medioambientales o relacionados con la conservación de alimentos aportaría significado sociocultural al experimento.

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO. COMENTARIOS

En la Figura 3 (germinación de lentejas) y la Figura 4 (enmohecimiento del pan) se muestran los resultados del experimento. Mientras la muestra en blanco muestra una vigorosa germinación alcanzando brotes de unos 10 cm y la aparición de pequeñas hojas al cabo de 8 días, las sometidas a los vapores de los AEs de alcara-

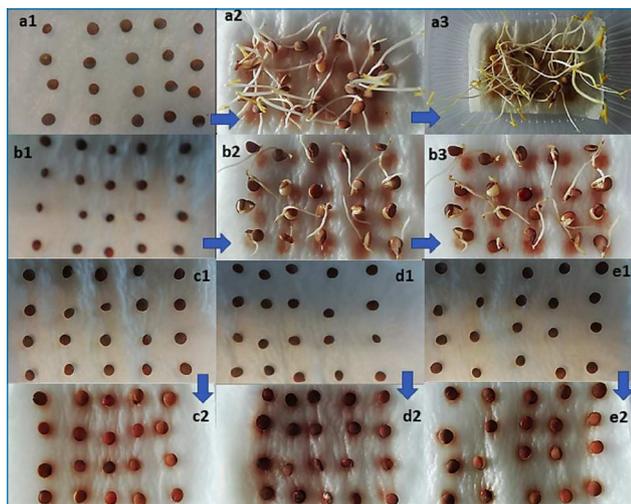


Figura 3. Germinación de las lentejas: Prueba en blanco (a1 -inicial-, a2 y a3 al cabo de 5 y 8 días respectivamente. AE de orégano: b1, b2 y b3, a los mismos intervalos de tiempo. AE de alcaravea: c1 – c2, ontina: d1-d2 y salvia: e1-e2. Se compara la muestra inicial y tras 8 días de ensayo

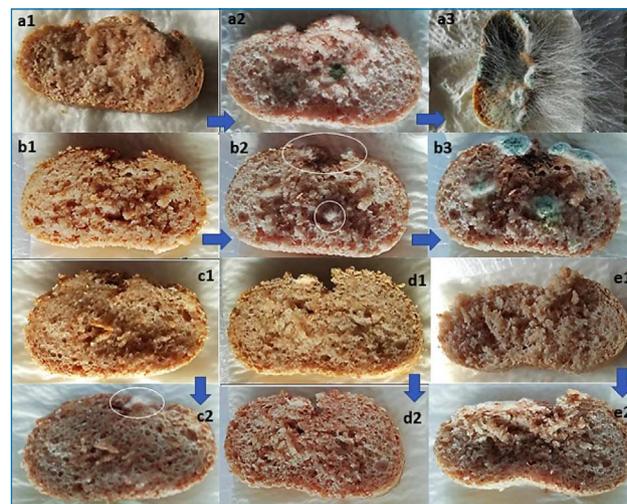


Figura 4. Enmohecimiento del pan. Prueba en blanco: a1 -inicial-, a2 y a3 al cabo de 5 y 8 días, respectivamente. AE de orégano: b1, b2 y b3, a los mismos intervalos de tiempo. AEs de alcaravea: c1-c2, ontina: d1-d2 y salvia: e1-e2. Se compara la muestra inicial y tras 8 días de ensayo

vea, ontina y salvia no han experimentado una germinación apreciable.

Al mismo tiempo, el AE de orégano ha mostrado un comportamiento diferente: en los 5 primeros días se observa una apreciable germinación (menor que en la muestra en blanco) que no progresa en los días restantes. Estos resultados muestran el poderoso efecto inhibitorio de la germinación de las cetonas monoterpénicas, compuestos mayoritarios en los tres AEs más activos, frente a un efecto mucho más débil del carvacrol, compuesto fenólico mayoritario en el AE de orégano.

La prueba en blanco muestra una evolución muy llamativa, por el desarrollo del hongo *Rizhopus stolonifer*. También se aprecia en la muestra sometida a los vapores del AE de orégano, aunque más lentamente. Al cabo de 5 días se aprecia una formación incipiente (zonas rodeadas con un círculo), para ser también muy notoria al cabo de 8 días. No se observa finalmente crecimiento del hongo en las muestras sometidas a los vapores de ontina y salvia, solo levemente en el caso de la alcaravea.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos han sido fácilmente observables y son coherentes, en líneas generales, con los estudios realizados sobre la actividad biológica de estos AEs. En ambos experimentos se observa la importante acción antifúngica y antigerminal de las cetonas monoterpénicas, compuestos comunes a los tres AEs más activos. El carvacrol (orégano) es activo en cuanto a su capacidad antioxidante, siendo un producto de referencia a la hora de evaluar la actividad antioxidante de otros AEs.

Obviamente, estas conclusiones deben valorarse desde enfoque cualitativo y sencillo propio de un experi-

mento escolar; de hecho, también presentan cierta actividad otros compuestos importantes de estos aceites, aunque la actividad de las cetonas monoterpénicas está bien establecida en la bibliografía citada. En cualquier caso, estos resultados pueden constituir un punto de partida adecuado para los objetivos inicialmente propuestos: sensibilizar frente al uso alternativo de productos naturales y vincular una actividad escolar con una prometedora línea de investigación científica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] a) A. V. Sáiz, M. A. Maldonado, R. V. García, *Ciudadanía y conciencia medioambiental en España*, 2010 (núm. 67), CIS; b) J. Sureda-Negre, A. Catalán-Fernández, O. Álvarez-García, R. Comas-Forgas. *Estudios pedagógicos (Valdivia)* **2013** 39(1), 253-267; c) A. Vilches, D. Gil Pérez, D. *Educación química* **2013** 24(2), 199-206.
- [2] M. L. García, J. M. R. Vergara, *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 2000, 473-486.
- [3] a) C. R. Pye, M. J. Bertin, R. S. Lokey, W. H. Gerwick, R. G. Linington, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2017**, 114 (22), 5601-5606; b) G. D. Mogoşanu, A. M. Grumezescu, C. Bejenaru, L. E. Bejenaru, *In Food Preservation*, 2017, 365-411. Academic Press.
- [4] a) F. Bakkali, S. Averbeck, D. Averbeck, M. Idaomar, *Food and Chemical Toxicology* **2008** 46(2), 446-475; b) B. Adorjan, G. Buchbauer, *Flavour and Fragrance Journal* **2010** 25(6), 407-426.
- [5] https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/20/epsct2018_informe.pdf (acceso: 4/3/2021).
- [6] https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/678992/EM_42_2.pdf?sequence=1 (acceso: 4/3/2021).
- [7] V. Dragoş, V. Mih, *Procedia-Social and Behavioral Sciences* **2015** 209, 167-172.

- [8] https://www.terras.edu.ar/biblioteca/11/11DID_Chevallard_Unidad_3.pdf
- [9] F. Carbonnel, Naturalmente esencial. Introducción a la aromaterapia. Martorell, Ed., 1998, Barcelona.
- [10] a) J. A. Llorens-Molina, M. Verdeguer Sancho, D. García Re-llán, *Enseñanza y Divulgación de la Química y de la Física*, 2012, 283-292; b) J. A. Llorens-Molina, M. P. Santamarina Siurana, M. M. Verdeguer Sancho, J. Rosello Caselles, S. Vacas González, V. Castell Zeising, V. Innodot/18. International Conference on Innovation, Documentation and Education, Editorial Universitat Politècnica de València, 2019, 671-681.
- [11] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9235:ed-2:vi:en> (acceso: 4/3/2021).
- [12] A. C. Figueiredo, J. G. Barroso, L. G. Pedro, J. J. Scheffer, *Flavour and Fragrance Journal* **2008** 23(4), 213-226.
- [13] a) T. Tworowski, *Weed Science* **2002** 50(4), 425-431; b) S. Azirak, S. Karaman, *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, **2008** 58(1), 88-92; c) R. Amorati, M. C. Foti, L. Valgimigli, *J. Agric. Food Chem.* **2013** 61(46), 10835-10847; d) A. T. H. Mossa, *J. Environ. Sci. Technol.* **2016** 9(5), 354; e) S. Dwivedi, P. Prajapati, N. Vyas, S. Malviya, A. Kharia, *Asian J Pharma Pharmacol* **2017** 3(6), 193-199.
- [14] K. Boumhara, H. Harhar, M. Tabyaoui, A. Bellaouchou, A. Guenbour, A. Zarrouk, A. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion* **2019** 5(1), 1-9.
- [15] S. P. Anand, N. Sati, N. *Int. J. Pharm. Sci. Res.* **2013** 4(7), 2496.
- [16] C. Rangan, D. G. Barceloux, *Disease-a-month* **2009** 55(5), 292-311.
- [17] a) J. J. Beck, J. R. Coats, S. O. Duke, M. E. Koivunen (eds.), *Pest management with natural products*. American Chemical Society, 2013; b) R. Pavela, G. Benelli, *Trends in Plant Sci.* **2016** 21(12), 1000-1007.
- [18] N. Dudai, A. Poljakoff-Mayber, A. M. Mayer, E. Putievsky, H. R. Lerner, *J. Chem. Ecol.* **1999** 25(5), 1079-1089.
- [19] A. H. C. Van Bruggen, M. M. He, K. Shin, V. Mai, K. C. Jeong, M. R. Finckh, J. G. Morris Jr. *Sci. Total Environ.* **2018** 616, 255-268.
- [20] <https://www.youngliving.com/blog/essential-oils-in-the-classroom/> (acceso: 4/3/2021).
<https://natubeata.blogspot.com/2015/02/laboratorio-germinacion-de-una-semilla.html> (acceso: 4/3/2021).
<https://espaciociencia.com/experimento-educativo-moho/> (acceso: 4/3/2021).
- [21] a) R. K. Johri, *Phcog Rev.* **2011** 5(9), 63; b) E. De Falco, E. Mancini, G. Roscigno, E. Minola, O. Tagliatela-Scafati, F. Senatore c) E. de Falco, E. Mancini, E., Roscigno, G., Mignola, F. Senatore, *Molecules*, **2013** 18(12), 14948-14960; d) S. Bouajaj, A. Benyamna, H. Bouamama, A. Romane, D. Falconieri, A. Piras, B. Marongiu, *Nat. Prod. Res.* **2013** 27(18), 1673-1676; e) M. Abdelkader, B. Ahcen, D. Rachid, H. Hakim, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering, *International Journal of Biological* **2014** 8(11), 1231-1235; f) A. E. H. Mohamed, M. El-Sayed, M. E., Hegazy, S. E. Helaly, A. M. Esmail, A. M., N. S. Mohamed, *Rec. Nat. Prod.* **2010** 4(1).
- [22] J. A. Llorens-Molina, *Aust. J. Educ. Chem* **2011** 71, 6-12.

Fernando Cossío Medalla de Oro RSEQ, 2021

Fernando P. Cossío nació en 1960 en S. Martín de Villafuere (Cantabria) y creció en Monzón (Huesca), donde estudió hasta los 16 años de edad. Se licenció en Ciencias Químicas en la Universidad de Zaragoza en 1982 con una tesis de licenciatura sobre síntesis de N-formil aminoácidos α,β -insaturados, bajo la supervisión del profesor Carlos Cativiela. En 1986 se doctoró en la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU) con una tesis sobre síntesis y funcionalización de β -lactamas, dirigida por el profesor Claudio Palomo. Con posterioridad (1987-1988) realizó una estancia postdoctoral en el CNRS de Talence-Bordeaux, trabajando sobre química organosilícica en el laboratorio del profesor Jean-Paul Picard. Progresivamente se fue interesando también en química teórica y computacional, realizando en 1993 una estancia en el laboratorio del profesor Kendall N. Houk en UCLA. En 1988 obtuvo una plaza de profesor titular en la UPV/EHU, y posteriormente de catedrático en la misma Universidad.

Su trabajo ha estado centrado en el estudio de las reacciones pericíclicas y de formación de enlaces carbono-carbono, tanto computacionalmente como mediante metodologías experimentales. Además, trabaja en el diseño y síntesis química de moléculas bioactivas, con especial interés en el descubrimiento y síntesis de fármacos para el tratamiento del cáncer. Sus proyectos más recientes, teóricos y experimentales, se relacionan con la inhibición de enzimas epigenéticas (HDAC) y en colangiocarcinoma, en colaboración con el profesor Jesús Bañales (Biodonostia, Ikerbasque). Más recientemente, ha emprendido una nueva línea de investigación en colaboración con el profesor Juan J. Gómez-Cadenas (DIPC, Ikerbasque) y la profesora Roxanne Guenette (Harvard) relacionada con la física de partículas, a través de la reacción de doble desintegración libre de neutrinos de Xe-136 para generar el catión Ba^{2+} -136. La detección de este último isótopo permitiría demostrar que el neutrino es su propia antipartícula.



Dr. Fernando P. Cossío Mora

El profesor Cossío ha estado muy implicado en el avance y gestión de la ciencia en Euskadi, habiendo ocupado diferentes cargos, como decano de la Facultad de Ciencias Químicas (1999-2001) y vicerrector de Investigación y Relaciones Internacionales de la UPV/EHU (2001-2003), siendo en la actualidad y desde 2009 Director Científico de Ikerbasque, la Fundación Vasca para la ciencia

 <https://orcid.org/0000-0002-4526-2122>

Todas las noticias deberán enviarse a Elena Sáez Barajas elenasz@ucm.es
Su publicación es discrecional al Comité Editorial de *Anales*.

Premios de Reconocimiento a una Carrera Distinguida de la RSEQ, 2021

Carmen Mijangos Ugarte es Profesora de Investigación (PI) *ad honorem* en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP) del CSIC, vicepresidenta del Grupo Especializado de Polímeros de la RSEQ y académica de número de la Academia Vasca de Ciencias, Artes y Letras. Se licenció en Ciencias Químicas (1973) en la UPV/EHU, en la Primera Promoción. Hizo su doctorado en el Instituto ICTP defendido en la UPV/EHU en 1977. Ha desarrollado una intensa carrera investigadora con estancias prolongadas en distintas instituciones y países: País Vasco (UPV/EHU; POLYMAT y DIPC), Cataluña (UPC), Lyon (CNRS), Estrasburgo (CNRS) y Canadá (Universidad Toronto) y ha sido invitada en numerosos países: China, EE. UU., Italia, Latinoamérica (Argentina, Méjico, Perú y Chile). Toda su carrera investigadora se ha desarrollado en el ámbito de la Química y Química-Física de Polímeros, en particular, sobre las reacciones de modificación de polímeros; la síntesis y aplicaciones de geles polímeros y, en los últimos años, en la polimerización en confinamiento, incluyendo en el estudio la relación estructura/ propiedades. Su trabajo se ha recogido en 255 publicaciones científicas, la mayoría en el primer cuartil; 8 portadas de revistas y 15 capítulos de libros. Ha conseguido un total de 62 proyectos en convocatorias competitivas de la Unión Europea y nacionales y 14 contratos con empresas para la transferencia de tecnología (la mayoría multinacionales), además de 5 patentes. Ha formado 16 doctores y 55 especialistas procedentes de muchos países europeos o americanos. Ha impartido más de 100 conferencias y seminarios invitadas en congresos y universidades de Europa, Asia y América y ha sido presidenta de 5 congresos internacionales.

Ha compaginado su carrera científica con puestos de dirección y gestión: director del ICTP-CSIC (1996-2001); Gestor del Programa Nacional de Materiales (MICINN) (2001-2004) y coordinadora del Área de



Dra. Carmen Mijangos Ugarte

Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC (2004-2008). Además, ha formado parte de comités nacionales e internacionales: Miembro del Comité Científico Asesor del Gobierno Vasco (2019-2022); vicepresidenta de la Academia Vasca de Ciencias, Arte y Literatura (2012-20); miembro del Primer y Segundo Comité de Ética del CSIC (2008-2017), Miembro del Science Advisory Council (SAC) de la European Spallation Source (ESS), Lund-Suecia; miembro o presidenta de tribunales de tesis doctorales en 89 ocasiones, y otros nombramientos.

Nombrada Bilbaína Ilustre, por el Ayuntamiento de Bilbao (diciembre de 2014), reconociéndola como "Científica Internacional por Toda una Trayectoria en la Investigación". En marzo 2021 ha sido elegida Científica de Referencia en Mujeres Científicas de Ayer y de Hoy, en el día Internacional de la Mujer y de la Niña en la Ciencia.

 <https://orcid.org/0000-0003-3347-3181>

José Ramón Pedro Llinares (Sollana, Valencia, 1952), es licenciado (1974) y doctor en Ciencias Químicas (1977) por la Universidad de Valencia. Ha sido profesor adjunto interino (1977-1985), profesor titular (1985-1998) y catedrático de Química Orgánica de la Universidad de Valencia desde 1998, puesto que continúa desempeñando en la actualidad. Inició su labor investigadora con la realización de su tesis doctoral dirigida por el profesor Seoane sobre Síntesis de civetona, tema en el que continuó trabajando durante algunos años, sintetizando diversas cetonas macrocíclicas de interés en la industria de perfumería, como la propia civetona y la muscona. El profesor Pedro inició pronto una carrera investigadora independiente, inicial-

mente en el campo de la síntesis de productos naturales y más concretamente en la síntesis de sesquiterpenos. A finales de los años 90 empezó a desarrollar una nueva línea de investigación sobre la utilización de complejos de metales de transición en catálisis oxidativa, en la que hizo importantes aportaciones metodológicas. Hacia 2005, su línea de investigación evolucionó hacia la utilización de complejos metálicos y posteriormente organocatalizadores en diferentes reacciones enantioselectivas de formación de enlaces carbono-carbono, con importantes aportaciones a las reacciones de Friedel-Crafts, Henry y alquilaciones enantioselectivas entre otras. El profesor Pedro, con un h: 35 (Web of Science) es coautor de más de 200 artículos



Dr. José Ramón Pedro Llinares

y capítulos de libros, y ha dirigido o codirigido 16 tesis doctorales, muchas de ellas bajo la modalidad de doctorado europeo o internacional. Recientemente ha incorporado a su línea de investigación el desarrollo de nuevos métodos sintéticos basados en la catálisis fotoredox. Esta carrera científica de calidad y sostenida en el tiempo ha experimentado en los últimos años un ascenso notable. En los últimos cinco años ha publicado 46 artículos y ha recibido más de 300 citas anuales. Desde la creación del registro de grupos de investigación en la Universidad de Valencia es el director del grupo de investigación Asymcat.

 <https://orcid.org/0000-0002-6137-866X>

Premios a la Excelencia Investigadora

David Díaz Díaz (Tenerife, 1974), estudió Ciencias Químicas en la Universidad de La Laguna y obtuvo el doctorado en Química en la misma Universidad bajo la dirección del profesor Víctor Martín García. En 2002, se unió al grupo de investigación del profesor M. G. Finn como investigador postdoctoral en “The Scripps Research Institute” (TSRI) de San Diego (California, EE. UU.). Durante este periodo trabajó en estrecha colaboración con el premio Nobel profesor K. B. Sharpless. Su investigación se centró en la química de las amidinas, técnicas de bioconjugación, nuevas aplicaciones de la química “click”, desarrollo de polímeros funcionales y fabricación de materiales blandos. Desde 2006, ha ocupado diversos cargos en el mundo académico y en la industria, incluyendo los puestos de contratado “Ramón y Cajal” en la Universidad Autónoma de Madrid y Sr. Químico en la multinacional “The Dow Chemical Company” en Suiza. En 2010, obtuvo simultáneamente una plaza de Científico Titular en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y un puesto como Investigador Experimentado de la Fundación Alexander von Humboldt en la Universidad de Regensburg (Alemania), recibiendo así la doble afiliación científica y estableciendo su grupo de investigación independiente en la institución germana. En 2013, fue galardonado con la Cátedra Heisenberg (primer científico español con esta distinción) de la Fundación Alemana de Investigación Científica (DFG) y obtuvo la plaza de profesor asociado en la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de Regensburg. Ha recibido numerosos premios y reconocimientos internacionales, entre los que se encuentra el “Young Investigator Award” del “Polymer Network Group” en Japón. Es Editor Jefe de la revista *Gels* y miembro pleno del Consejo Editorial de *ScienceOpen*. En 2017, recibió cátedras adjuntas honorarias de las universidades de Jiangsu (Sociedad China de Materiales Avanzados) y Nigeria (Nanociencia Africana-Iniciativa de Nanotecnología); Membresía de Honor de la Sociedad Argentina de Química Orgánica; y el estado de



Dr. David Díaz Díaz

miembro permanente (venia legendi) de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de Regensburg en Alemania. Desde octubre de 2018 a diciembre de 2019, ha compaginado su cargo como científico titular del CSIC (España) y como Prof. Privatdozent en la Universidad de Regensburg (Alemania). Desde el 2019 es también Investigador Distinguido Senior “Beatriz Galindo” en la Universidad de La Laguna (Tenerife, España). Recientemente ha recibido la acreditación a la figura de Catedrático por la ANECA. Es miembro de varias sociedades científicas (ACS, RSC, RSEQ, GDCh, SSB), ha publicado más de 220 artículos y su investigación se centra en el desarrollo de materiales funcionales avanzados para aplicaciones principalmente biomédicas, catalíticas, de recubrimientos y energéticas.

 <https://orcid.org/0000-0002-0557-3364>



Dra. Eva Hevia Freire

Natural de Gijón, Eva Hevia es catedrática de Química Inorgánica en la Universidad de Berna (Suiza). Eva realizó su tesis doctoral en la Universidad de Oviedo bajo la dirección de Víctor Riera y Julio Pérez, seguida de una estancia postdoctoral en la Universidad de Strathclyde (Reino Unido) en el grupo de Robert Mulvey. En 2006 recibió una University Research Fellowship de la Royal Society que le permitió establecer su propio grupo de investigación en la Universidad de Strathclyde, llegando a catedrática en dicha universidad a los 36 años. En el 2019, Eva se trasladó a Berna donde se encuentra trabajando en la actualidad, investigando la química de compuestos organometálicos de los elementos representativos y sus aplicaciones en síntesis sostenible y catálisis. Su trabajo investigador ha sido reconocido con varios premios internacionales y ha sido elegida miembro de prestigiosas sociedades científicas como la Royal Society of Edinburgh y la European Academy of Science. Además de su intensa actividad científica, Eva es una apasionada de la divulgación, siendo una reconocida embajadora de Mujeres en Ciencia y Tecnología.

 <https://orcid.org/0000-0002-3998-7506>

Aurelio Mateo Alonso “Koke” (Madrid, 1976) es Profesor de Investigación Ikerbasque en POLYMAT y líder del grupo de Materiales Moleculares y Supramoleculares desde el año 2012. También es profesor visitante de la Universidad del País Vasco.

Koke obtuvo la licenciatura en Química Orgánica (1999) en la Universidad Autónoma de Madrid, donde realizó una tesina (2000) bajo la supervisión de Carmen Maestro y José Luis García Ruano. Después, se doctoró en Química (2004) en el Queen Mary College de la Universidad de Londres (Reino Unido) donde trabajó bajo la supervisión de James H. P. Utley y de Peter B. Wyatt. Durante 2004 y 2009, trabajó en la Universidad de Trieste (Italia) como Investigador Postdoctoral en el grupo de Maurizio Prato. Entre 2009 y 2012, fue Líder de Grupo en el Freiburg Institute for Advanced Studies (Alemania).

El grupo de investigación de Koke se enfoca fundamentalmente en la síntesis y en la química supramolecular de sistemas π -conjugados que se extienden en 1D, 2D y 3D. Entre ellos cabe destacar los hidrocarburos policíclicos aromáticos, nanografenos, nanocintas de grafeno, fulerenos y nanotubos de carbono, sistemas entrelazados mecánicamente, polímeros supramo-



Dr. Aurelio Mateo Alonso

leculares, polímeros conjugados, y redes covalentes orgánicas.

 <https://orcid.org/0000-0002-5316-2594>



Dra. Isabel Pastoriza

La doctora Isabel Pastoriza Santos, es profesora titular del CINBIO y Departamento de Química Física de la Universidad de Vigo. Su investigación se centra en el diseño y fabricación de nanomateriales plasmónicos funcionales para el desarrollo de aplicaciones en las áreas de detección, imagen o catálisis. En 2011 fue galardonada con el premio L'Oréal-UNESCO "Por las mujeres en la ciencia". Es miembro del grupo especializado de Coloides e Interfaces de la RSEQ y gestora de la AEI del área científica de Ciencias y tecnologías químicas (CTQ). Es miembro del Comité Editorial de las revistas científicas, *ACS Applied Nanomaterials* y *Nanomaterials*.

 <https://orcid.org/0000-0002-1091-1364>

Premio Joven Investigador – Modalidad “Líder de Grupo”

Montse Casas-Cabanas es coordinadora científica del Área de Almacenamiento de Energía Electroquímica, líder del grupo de Materiales de Electroodos Avanzados en CIC energiGUNE e investigadora Ikerbasque. Sus intereses de investigación se centran en el diseño de materiales funcionales para el almacenamiento de energía a través de un enfoque multidisciplinario que enlaza la ciencia de los materiales con la electroquímica. Lidera y participa en varios proyectos nacionales, europeos e industriales, y es coordinadora local del máster internacional MESC+ Erasmus Mundus “Materials for Energy Storage and Conversion”, en colaboración con la Universidad del País Vasco y otras 4 universidades europeas. Participa también activamente en varias iniciativas europeas relacionadas con el almacenamiento de la energía (Batteries Europe, Battery 2030+, Alistore). Es autora de 75 publicaciones (>90% en Q1), de 3 patentes y del software FAULTS para el refinamiento de datos de rayos X de estructuras cristalinas con defectos planares. Ha impartido alrededor de 20 conferencias invitadas en los principales congresos de su temática.

 <https://orcid.org/0000-0002-9298-2333>



Dra. Montserrat Casas



Dr. Gonzalo Jiménez Osés

Gonzalo Jiménez-Osés se doctoró en Química por la Universidad de La Rioja (UR) en 2007. A continuación, se trasladó a la Universidad de Zaragoza como investigador postdoctoral y profesor ayudante doctor. Posteriormente trabajó como investigador postdoctoral en la Universidad de California Los Ángeles (UCLA). En 2015 comenzó su carrera independiente como investigador Ramón y Cajal en la UR y desde 2019 en CIC bioGUNE como Jefe de Grupo. En 2020 fue promovido a Ikerbasque Research Associate. Ha sido investigador principal de tres proyectos de investigación nacionales e internacionales. Como resultado de su investigación de marcado carácter colaborativo e

interdisciplinar, ha publicado cerca de 120 artículos científicos con numerosas contribuciones en revistas multidisciplinares de alto impacto (h-index 30) y ha sido invitado a impartir conferencias en instituciones de prestigio (Cambridge, Kyoto, CIQUS, EuChemS, ACS). Su trayectoria investigadora ha sido reconocida mediante la concesión de varios premios y menciones (Premio Suschem Postdoc, 2016; Premio Investigador Emergente, Universidad de La Rioja, 2016; Concesión contrato Investigador Ramón y Cajal, 2014; Concesión contrato Ikerbasque Research Fellow, 2014; Premio Amgen de Investigación Postdoctoral, UCLA, 2014; Premio MBI a la Excelencia Investigadora, UCLA, 2014). Asimismo, ha organizado varios eventos científicos, ha supervisado investigadores postdoctorales y estudiantes de grado, máster y doctorado, y ha participado activamente en actividades de divulgación científica. En 2019 fue seleccionado por la revista *ChemBioChem* como ChemBioTalent. Recientemente ha publicado un artículo en la prestigiosa revista *Nature Chemistry*, que ha supuesto un hito en el diseño computacional asistido por evolución dirigida de biocatalizadores. Ha sido presidente del Grupo de Jóvenes Investigadores Químicos (2017-2020) y es actualmente secretario del Grupo Especializado en Química y Computación de la Real Sociedad Española de Química. El Grupo de Química Computacional que lidera en CIC bioGUNE tiene como principales líneas de investigación: Ingeniería y evolución de enzimas, Química bioortogonal, Glicobiología, Desarrollo de fármacos.

<https://www.cicbiogune.es/people/gjoses>

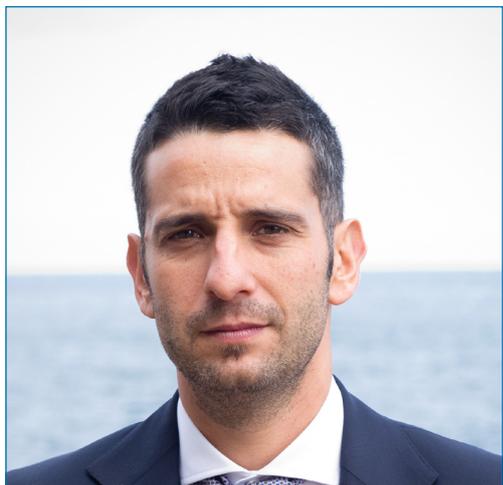
 <https://orcid.org/0000-0003-0105-4337>

Ana E. Platero-Prats obtuvo el doctorado en Química en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid bajo la supervisión del profesor Gutiérrez Puebla y doctor Snejko. En 2012 se incorporó a la Universidad de Estocolmo (Suecia) como investigadora postdoctoral, para trabajar con las profesoras Zou y Martín-Matute. En 2014, obtuvo un contrato Beatrui de Pinós y se incorporó al Laboratorio Nacional de Argonne (EE. UU.) trabajando con la doctora Chapman en el análisis de la función de distribución de pares (PDF) aplicado a redes metal-orgánicas porosas. En 2018 inició su carrera independiente en la Universidad Autónoma de Madrid primero gracias al programa Atracción de Talento Investigador (Modalidad 1) de la Comunidad de Madrid y, actualmente, como investigadora Ramón y Cajal.

 <https://orcid.org/0000-0002-2248-2739>



Dra. Ana Platero



Dr. Haritz Sardon

Haritz Sardon es profesor adjunto en la Universidad del País Vasco y líder del Catalysis and Sustainable Polymers Group en POLYMAT. Obtuvo su doctorado internacional en 2011 bajo la supervisión de la profesora M. J. Fernández-Berridi y la profesora Irusta, donde traba-

jó en el diseño racional y síntesis de poliuretano híbridos en base acuosa. Tras una breve incursión en la empresa HistoCell en Bilbao (1,5 años), se trasladó a IBM California bajo la supervisión del doctor Hedrick para realizar una estancia postdoctoral de 2 años trabajando en el uso de organocatálisis para polimerización. Tras la estancia postdoctoral, regresó a España con una beca Juan De la Cierva para trabajar en BERC POLYMAT. En el año 2017 obtuvo una beca IKERBASQUE para iniciar sus andaduras como líder de grupo antes de incorporarse a la UPV/EHU como profesor ayudante doctor en el año 2018. En estos años, además de trabajar en el diseño de nuevos materiales poliméricos considerando su sostenibilidad, el doctor Sardon se ha centrado en el desarrollo de catalizadores orgánicos para intentar solucionar el problema de la acumulación de plásticos. Así, ha avanzado significativamente en el área de despolimerización controlada de policarbonatos aromáticos y PET que le ha permitido preparar monómeros de valor añadido a partir de residuos y la creación de una empresa: POLYKEY.

 <https://orcid.org/0000-0002-6268-0916>

Premio Joven Investigador – Modalidad “Investigador Postdoctoral”

Mónica Giménez Marqués (Valencia, 1984) trabaja en el Instituto de Ciencia Molecular (ICMol) de la Universidad de Valencia como investigadora Ramón y Cajal. Obtuvo su doctorado en 2013 en el ICMol bajo la supervisión del profesor Coronado y el doctor Mínguez Espallargas en el campo del magnetismo molecular, obteniendo resultados pioneros en cuanto a la interacción de estos materiales magnéticos con gases. En 2014 movió sus intereses hacia diferentes usos de materiales híbridos porosos conocidos como MOFs, investigó su uso biomédico en el Institut Lavoisier de Versailles (Francia), bajo la supervisión del profesor Serre, la doctora Horcajada y el profesor Couvreur. En 2015, obtuvo una beca individual Marie-Sklodowska Curie para trabajar en el Institut des Matériaux Poreux de París, en las prestigiosas École Normale y École de Physique et Chimie Industrielles, para abordar el desarrollo de MOFs heterometálicos y su uso en catálisis heterogénea. En 2018 se incorporó al ICMol con una Juan de la Cierva Incorporación y en 2019 fue nombrada Junior Leader Incoming Fellow de la Fundación La Caixa. La doctora Giménez Marqués ha recibido diversas distinciones como la asistencia al 67.º Encuentro de premios Nobel Lindau (2017), el premio Talento Joven (2018) y el premio Científico y Técnico Ciudad de Algemés (2019).

Su principal interés se centra en el desarrollo de nuevos materiales híbridos porosos para estudiar propieda-



Dra. Mónica Giménez Marqués

des fundamentales y sus usos en campos relacionados con la biomedicina y el medio ambiente. Esta investigación está apoyada con proyectos de excelencia SEJIGENT de la Generalitat Valenciana y del Gobierno de España.

 <https://orcid.org/0000-0002-4931-5711>

Daniele Mantione estudió Ciencias Químicas en la Universidad de Pavia (Italia) y en 2013 finalizó su máster en la síntesis de antivirales en la misma universidad. En 2017 se doctoró en la Universidad del País Vasco, supervisado por el profesor David Mecerreyes y el doctor Haritz Sardon. Su trabajo de tesis consistía en polímeros conductores por bioelectrónica en el marco del proyecto europeo Marie Curie-ITN “Olimpia”. Tras una estancia en Estados Unidos, en el centro IBM Almaden en San Jose (CA) en el grupo del profesor James Hedrick, sus siguientes estancias postdoctorales fueron en la Universidad de Warwick en Inglaterra con el profesor Andrew Dove y en Francia, donde acaba de finalizar una beca Marie Curie-IF supervisada por el profesor Georges Hadziioannou. Ambas estancias tenían como tema principal la síntesis y caracterización de monómeros funcionales, polímeros y polímeros conductores. En junio se incorpora en la startup POLYKEY (www.polykey.eu) en el instituto POLYMAT en Donostia-San Sebastián con una beca europea Marie Curie-IF-SE. Sus conocimientos y pasiones son la química orgánica, los materiales conductores, especialmente politiofenos y los polímeros funcionales



Dr. Daniele Mantione

(baterías, placas solares...). Sus aficiones son los viajes, los atardeceres con los amigos y la cocina.

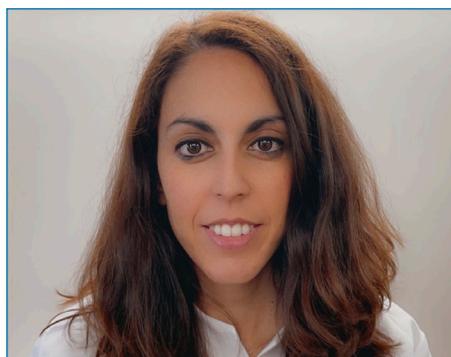
 <https://orcid.org/0000-0001-5495-9856>



Dr. Oriol Planas

Oriol Planas nació en La Jonquera, localidad fronteriza situada en el norte de Cataluña, España. Se licenció en Química en 2012 por la Universidad de Girona y realizó estudios de Máster bajo la supervisión del doctor Miquel Costas y la doctora Anna Company. En 2013, comenzó sus estudios de doctorado en el grupo del doctor Xavi Ribas y la doctora Anna Company en la misma universidad. Durante este período, centró su investigación en los pasos fundamentales de las transformaciones de activación de C – H catalizadas por cobalto. En 2016, realiza una estancia científica de tres meses en el laboratorio de la profesora V. y M. Dong en Irvine (California). Tras obtener su doctorado en 2018, se trasladó a Alemania, donde se incorporó al grupo del doctor Josep Cornellà en el Max-Planck-Institut für Kohlenforschung como becario postdoctoral Marie-Sklódowska Curie. En Mülheim an der Ruhr, actualmente trabaja en el desarrollo de transformaciones orgánicas catalizadas por bismuto.

 <https://orcid.org/0000-0003-2038-2678>



Dra. Diana Vilela

La doctora Vilela es una química especializada en nanomateriales y Química Analítica. Estudió en la Universidad de Alcalá (UAH) donde se licenció en Química en el año 2009 obteniendo el premio extraordinario de licenciatura. En 2009 consiguió una beca FPI y comenzó su doctorado en el departamento de Química Analítica de la UAH bajo la dirección de los profesores Alberto Escarpa y M.^a Cristina González. En 2014, tras una estancia predoctoral en

la Universidad de California San Diego (EE. UU.) bajo la dirección del profesor Joseph Wang, Vilela recibió el título de Doctor Internacional en Química Fina. Dicho doctorado obtuvo el premio extraordinario de doctorado de la UAH así como el premio a la mejor tesis presentada en 2014 por la sociedad de condeños de la UAH. Ese mismo año, comenzó a trabajar como investigadora postdoctoral en el grupo de Smart-Nano-bio devices dirigido por el doctor Samuel Sánchez en el Instituto Max Planck for Intelligent Systems (Alemania) donde posteriormente obtuvo una beca postdoctoral de la Fundación Humboldt. En 2017, tras ga-

nar una beca postdoctoral Marie Curie COFUND y Severo Ochoa, la doctora Vilela continuó trabajando en el mismo grupo de investigación en el Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC) en Barcelona. Actualmente, trabaja como investigadora postdoctoral Juan de la Cierva Incorporación en el grupo de Nanomáquinas y Nanosensores dirigido por el profesor Reynaldo Villalonga del departamento de Química Analítica en la Universidad Complutense de Madrid.

 <https://orcid.org/0000-0001-5005-7070>

Premio Tarea Educativa y Divulgativa a profesores de enseñanzas preuniversitarias

José Antonio Martínez Pons es doctor en Ciencias Químicas (Ingeniería Química) por la Universidad de Alcalá, licenciado en Ciencias Físicas (meteorología y geofísica) por la Universidad Complutense y en Ciencias Químicas (fundamental) por la UNED.

Es catedrático de Física y Química de IES y profesor asociado de universidad jubilado. Su experiencia docente es de más de 50 años en centros públicos y privados, como profesor de Física, Química, Informática, Matemáticas y Dibujo Técnico. Ha impartido más de 600 h en cursos para profesores y colabora en un máster para docentes de la Universidad de Alcalá en la que fue asociado, (departamento de Ingeniería Química), y profesor ad honorem. Como divulgador ha participado en eventos como Ciencia en Acción, Madrid es Ciencia etc. muchas veces colaborando con la RSEF. Tiene especial interés por los “mayores”, a su juicio los grandes olvidados y en este sentido es voluntario en el Centro de mayores Pérez Galdós de Madrid, donde imparte clases de informática e imparte charlas científicas, normalmente acompañadas de experimentos sencillos en los que hace participar a los asistentes. También es voluntario Cultural (guía) en el Museo del Ferrocarril de Madrid, donde ha dirigido algún taller de ciencia aplicada a los ferrocarriles, sobre todo Física y Química.

Ha publicado 70 artículos didácticos y científicos, en revistas como *Ciencia Abierta* de la universidad de Chile, a cuyo consejo de redacción perteneció, *Anales del RSEQ*, *Revista Española de Física*, *Alimentación*, *equipos y tecnología*, *Eduquim*. Ha escrito 10 libros, el último *Macromoléculas y plásticos, de la teoría al Aula* y ha firmado una docena de capítulos de libro y colaborado en una veintena de libros de actas de congresos y certámenes científicos.

Ha tenido alguna presencia en la televisión, siempre en cuestiones científicas.



Dr. José Antonio Martínez Pons

En la actualidad, es vicepresidente del Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y Química de las RSEQ y RSEF siendo socio de número de ambas instituciones.

Sus intereses además de la docencia, su principal vocación, es la Historia de la Ciencia, la Tecnología de los Alimentos, el caos determinista aplicado a la Química y la Informática en la enseñanza y al laboratorio.

Ha publicado artículos en revistas comerciales, como *Defensa*, *Boletín de Museo de Astronáutica* sobre cuestiones de Historia Militar y Aeronáutica.

Su biografía puede resumirse en una dedicación vocacional a la docencia, que además de su profesión, ha sido su pasión, con interés, y entusiasmo, inclusive cuando por razón de edad debió jubilarse oficialmente.

“No hay mucho que añadir a que soy un viejo profesor mallorquín con más de 50 años de experiencia que ha tenido la suerte de vivir de y para su vocación: La Enseñanza”.

Dr. João F. Mano Premio Madinaveitia-Lourenço, 2021

El doctor João F. Mano ha sido galardonado con el premio Madinaveitia-Lourenço 2021. Este premio, instituido conjuntamente por la Sociedad Portuguesa de Química y la Real Sociedad Española de Química, tiene como objetivo reconocer la investigación científica con proyección internacional que se realiza en Portugal y España en cualquiera de sus áreas.

João F. Mano es profesor titular del Departamento de Química de la Universidad de Aveiro (Portugal). Es el director del Máster y del Doctorado en Biotecnología de la Universidad de Aveiro.

Pertenece al laboratorio asociado CICECO - Instituto de Materiales de Aveiro donde dirige el Grupo de Investigación COMPASS. Sus intereses de investigación actuales incluyen el uso de biomateriales y células hacia el desarrollo de conceptos interdisciplinarios especialmente dirigidos a ser utilizados en la medicina regenerativa y personalizada.

João F. Mano es autor de más de 670 artículos en revistas internacionales. Ha registrado 8 patentes como inventor principal. Es cofundador y presidente de METATISSUE, una empresa que desarrolla hidrogeles de origen humano para el cultivo de células en 3D.

Es redactor jefe de *Materials Today Bio* (Elsevier) y forma parte del consejo editorial de unas 10 revistas internacionales. Ha coordinado numerosos proyectos de investigación nacionales y europeos, incluyendo dos becas avanzadas del Consejo Europeo de Investigación. Ha sido invitado a presentar más de 100 charlas en conferencias internacionales.



Dr. João F. Mano

João F. Mano ha recibido diferentes honores y premios, incluyendo un doctorado *honoris causa* de la Universidad de Lorena (2019) y fue elegido (2020) miembro de la Academia Europea de Ciencias (FEurASc) y de la Biomaterials Science & Engineering (FBSE).

Concesión de los Premios GEQOR, 2021

CARMEN CARREÑO MEDALLA FÉLIX SERRATOSA

Carmen Carreño estudió Química en la Universidad Complutense de Madrid y se doctoró en 1978 bajo la supervisión del Profesor Fariña en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). En 1984 obtuvo la plaza de profesora titular y desde 2005 es catedrática en la UAM. Ha sido profesora visitante en la Ecole Européenne de Chimie, Polymères et Matériaux (ECPM), Université Louis Pasteur, Estrasburgo (Francia) y University of East Anglia, Norwich (Reino Unido). Desde 1990 es profesora asociada de la ECPM. Ha dirigido 32 tesis doctorales y ha publicado más de 169 artículos científicos. En el año 2014 recibió la Medalla a la Excelencia Investigadora de la RSEQ.

Durante su dilatada carrera, la profesora Carreño ha desarrollado una actividad científica intensa y novedosa en diversas áreas de la Química Orgánica, tales como la síntesis total de productos naturales, el desarrollo de nuevas metodologías en síntesis asimétrica, utilizando el grupo sulfínico como auxiliar quirral, y su aplicación en la preparación de nuevos materiales quirales.



Dra. Carmen Carreño

CONCEPCIÓN GONZÁLEZ BELLO MEDALLA IGNACIO RIBAS

Concepción González Bello se doctoró en Química por la Universidad de Santiago de Compostela (USC) en 1994 bajo la supervisión de los profesores Guitián y Castedo. Realizó varias estancias pre- y postdoctorales en la Universidad de Gante, en el Scripps Research Institute y



Dra. Concepción González Bello

en la Universidad de Cambridge. A finales de 1996 se incorporó a la USC en el Campus de Lugo, donde alcanzó la plaza de profesora titular en 2003. En 2010 se trasladó al Centro Singular de Investigación en Química Biológica e Materiais Moleculares (CIQUS) en el Campus de Santiago. Es autora de más de 90 artículos científicos, 14 capítulos en libros y tres patentes europeas. Desde 2015 es editora académica de la revista internacional "PLOS ONE" y miembro del Consejo Editorial de *Advanced Therapeutics* (2018-), *ACS Omega* (2021-) y *ChemMedChem* (2010-2020). Desde mayo de 2019 forma parte del equipo de gestión del área de Química de la Agencia Estatal de Investigación.

Su investigación se centra en el desarrollo de nuevas terapias y diagnósticos para el tratamiento de enfermedades infecciosas causadas por las superbacterias, en particular, mediante el desarrollo de nuevas entidades químicas con mecanismos de acción novedosos. Tiene una amplia experiencia en el diseño de compuestos basado en la estructura, en la cristalografía de proteínas y en estudios computacionales con macromoléculas.

ROSA LÓPEZ
SECRETARIA G. E. Química Orgánica

MARIOLA TORTOSA, MEDALLA JOSÉ BARLUENGA

Mariola Tortosa se doctoró en Química por la Universidad Autónoma de Madrid en 2005 bajo la supervisión del profesor Fernández de la Pradilla. Su trabajo, centrado en el desarrollo de nuevos procedimientos asimétricos empleando sulfóxidos quirales fue reconocido con el Eli Lilly PhD award en 2004. Tras una estancia postdoctoral en el Scripps Research Institute de Florida regresó al Instituto de Química Orgánica General en 2008. En 2011 inició su carrera independiente con un contrato Ramón y Cajal en la UAM, donde actualmente es Profesora Contratada Doctor. En 2013 recibió una ERC Starting Grant y su trabajo fue reconocido en el año 2014 con el Premio Jóvenes Investigadores de la RSEQ, el Premio Lilly a Jóvenes Investigadores y, en 2015, con el galardón *Thieme Chemistry Journal*. Recientemente, en el año 2020, ha recibido una ERC Consolidator Grant. Es autora de 46 artículos científicos y ha dirigido 5 Tesis Doctorales. Desde 2019 es Editora Asociada de la revista *Organic Letters* de la American Chemical Society.

Su actividad científica se centra en el diseño de nuevos métodos catalíticos novedosos, con el doble objetivo de desafiar a la química sintética clásica y proporcionar



Dra. Mariola Tortosa

herramientas útiles para la preparación de moléculas biológicamente activas.

ROSA LÓPEZ
SECRETARIA G. E. Química Orgánica

Premios del Grupo Especializado de Química Organometálica, 2021

EDUARDO PERIS FAJARNÉS, MEDALLA RAFAEL USÓN

El doctor Eduardo Peris ha sido galardonado este premio en reconocimiento a su trayectoria y gran contribución a la química organometálica en el desarrollo de ligandos y complejos metálicos para aplicaciones innovadoras en catálisis, entre los que destacan sistemas heterobimetálicos y supramoleculares en espacios confinados. Eduardo estudió Química en la Universidad de Valencia, donde se doctoró en 1991 bajo la dirección del profesor Pascual Lahuerta. En 1994 se trasladó a la Universidad de Yale donde realizó una estancia postdoctoral de dos años en el grupo del profesor Robert Crabtree trabajando en el estudio de los enlaces de hidrógeno con hidruros metálicos. Desde 1995 realiza su investigación en la Universidad Jaume I (Castellón) donde es Catedrático de Química Inorgánica. En los últimos diez años ha orientado su trabajo al diseño de catalizadores heterometálicos para reacciones tandem, así como el diseño de agrupaciones bi y tridimensionales para el reconocimiento de compuestos orgánicos y su aplicación en catálisis. Es autor de más de doscientos artículos en revistas internacionales, que han recibido más de 14.000 citas, así como de diez libros o capítulos de libros. Ha dirigido 18 tesis doctorales. Eduardo Peris ha sido miembro del Comité Asesor de *Organometallics* (ACS) y ha sido distinguido previamente con el premio



Dr. Eduardo Peris Fajarnés

de Química Inorgánica de la RSEQ, así como el Humboldt Research Award. Ha sido presidente del GEQO (2014-2018).

ANA CARMEN ALBENIZ
Presidenta G. E. Organometálica



Dra. Cristina Tejel Altarrriba

CRISTINA TEJEL ALTARRIBA, PREMIO GEQO A LA EXCELENCIA INVESTIGADORA

Cristina Tejel (Zaragoza) recibe este premio por la originalidad y profundidad de sus estudios en aspectos muy fundamentales de química organometálica, entre

los que destacan complejos metálicos con enlaces múltiples, incluyendo geometrías inusuales y la aplicación de dichos complejos a la activación de moléculas pequeñas. Se licenció en Química en la Universidad de Zaragoza donde también se doctoró en 1986 bajo la dirección de Luis Oro y M.^a Teresa Pinillos. Tras una estancia postdoctoral en el CNRS (Laboratoire de Chimie de Coordination) en Toulouse (Francia) trabajando en superconductividad con Patrick Cassoux, consiguió una plaza permanente en el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA) en 1991. Desde 2003 es Investigador Científico en el ISCQH y dirige el grupo “Arquitectura Molecular Inorgánica y Aplicaciones”. Sus intereses en investigación pasan por la búsqueda de especies altamente reactivas que ha llevado a interesantes resultados como son la síntesis del primer complejo con enlaces múltiple Rh=N o de los primeros complejos de Rh tricoordinados en muy bajos números de oxidación. De especial interés son sus trabajos sobre la activación y transferencia de oxígeno con complejos metálicos, así como el desarrollo de sistemas para la activación de enlaces P-H de aplicación directa en reacciones de hidrofosfanación de olefinas. Es autora de más de 90 artículos en revistas de gran impacto y varios capítulos de libro. Ha sido invitada como conferenciante en congresos tanto nacionales como internacionales

NOEL NEBRA MUÑIZ, PREMIO GEQO A JÓVENES INVESTIGADORES

Noel Nebra (Pravia, Asturias, 1981) obtiene este premio por sus importantes aportaciones, en estos primeros años de su carrera investigadora independiente, al desarrollo de complejos organometálicos de metales de la derecha de las series de transición en altos estados de oxidación. Estudió química en la Universidad de Oviedo donde también completó su doctorado en 2009 trabajando en el IUQOEM bajo la dirección de los profesores J. Gimeno y V. Cadierno. Durante su doctorado trabajó en las aplicaciones catalíticas de complejos allyl-Ru. En el periodo 2009-2013 realizó una estancia postdoctoral en el LHFA (Toulouse) financiada por dos becas postdoctorales FPU y IEF Marie-Curie. Trabajó con los profesores D. Bourissou y B. Martin-Vaca y, utilizando una estrategia de diseño de ligandos, descubrió novedosos complejos de Pd de tipo 2- indenodiuro y estudió su reactividad en la que interviene el esqueleto del ligando. Posteriormente obtuvo una ICIQ-IPMP Marie-Curie Postdoctoral Grant para realizar una estancia en el ICIQ donde trabajó con el profesor V. Grushin y llevó a cabo la síntesis de complejos Cu(III)-CF₃ útiles en la trifluorometilación oxidante de ácidos arilborónicos. Desde octubre de 2014 el doctor Nebra trabaja en el “Laboratoire Hétérochimie Fondamentale et Appliquée” (LHFA, Toulouse) donde lleva a cabo su investigación independiente sobre complejos de



Dr. Noel Nebra Muñiz

metales en altos estados de oxidación (Ni(III) y Ni(IV) fundamentalmente) con ligandos perfluorados. Es autor de 31 artículos, además de 4 revisiones y 3 capítulos de libro. Ha recibido varias distinciones entre las que destaca el Young Investigator ICT Award 2020.

ANA CARMEN ALBENIZ
Presidenta G. E. Organometálica

Resolución del Premio “Salvador Senent 2021”

El 30 de abril de 2021, el jurado que valoró las candidaturas presentadas otorgó el Premio “Salvador Senent” al mejor trabajo científico especializado, de revisión o de carácter divulgativo, relacionado con la didáctica o con la historia de la física o de la química, a D. José Pastor Villegas y D. Jesús F. Pastor Valle, por su trabajo “En el bicentenario de la fundación del Museo Nacional del Prado”: “(I) Aspectos químicos de la Ilustración Española en la villa y corte de Madrid y en la Ciudad de México” “(II) Aspectos químicos de algunas pinturas relacionadas con la historia de la química”. Ambos artículos están publicados en los dos últimos números de *Anales de Química* (<http://analesdequimica.es/>).

El doctor José Pastor (Cáceres, 1945) estudió Magisterio, Licenciatura en Ciencias (Sección Químicas) y Doctorado en la Universidad de Extremadura. Actualmente jubilado, ha ejercido la docencia en todas las etapas educativas, desde educación primaria a enseñanzas universitarias (como catedrático de Química Inorgánica, en varias titulaciones de la Universidad de Extremadura). Ha impartido cursos de Física, Química, Didáctica e Historia de Ciencia y Tecnología, así como de Doctorado y de la Universidad de Mayores. Ha sido responsable del Grupo de Investigación de Materiales Porosos y Contaminación Ambiental de la Universidad de Extremadura, habiendo dirigido un buen número de tesis doctorales y trabajos de fin de titulación en esa área. Además, ha investigado sobre Historia de la Ciencia y la Tecnología, con atención especial a asuntos de Extremadura y América. Autor de multitud de trabajos, pertenece a varias asociaciones científicas y culturales, como la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) y la Asociación de Amigos del Centro de Cirugía de Mínima Invasión Jesús Usón (ASCEMI), de Cáceres, de la que es Socio Fundador y Socio de Honor.

Jesús Pastor (Cáceres, 1976), antes de sus estudios universitarios redactó el trabajo “Páginas científicas hispanoamericanas”, con el que participó en la Expedición Aventura 92 dirigido por Miguel de la Quadra-Salcedo y Gayarre, visitando diversos lugares de España y varios países hispanoamericanos. Obtuvo el título de Ingeniero Industrial en la Escuela de Ingenierías Industriales de Ba-



Jesús F. Pastor Valle y D. José Pastor Villegas

dajoz (Universidad de Extremadura). Ejerce la profesión de ingeniero y tareas docentes (como director de la Academia de Ingeniería Quark de Cáceres). Además, colabora regularmente con su padre (José Pastor) en trabajos de investigación sobre materiales de carbono y aplicaciones, así como en Historia de la Ciencia y la Tecnología.

El citado premio (<https://bit.ly/2CZFaID>), que ha constituido su 8.ª edición, se convoca con carácter bienal, en honor al profesor Salvador Senent, fundador (en 1986) y primer presidente del Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química, común a las Reales Sociedades de Física y Química, que agrupa a docentes de estas dos áreas de todas las etapas educativas. El premio consiste en 1.000 € y está prevista su entrega en el tercer trimestre del presente año.

Aparte de la felicitación a los premiados, se anuncia que, en unos meses, se procederá a convocar la 9.ª edición de este premio, ya ampliamente consolidado en las áreas de didáctica e historia de la física y de la química.

GABRIEL PINTO

Presidente G. E. Didáctica de la Física y la Química

Resolución del Premio Euskadi de Investigación 2020

El Premio Euskadi de Investigación 2020 ha recaído en el profesor Fernando Cossío, catedrático del Departamento de Química Orgánica I de la UPV/EHU desde 2002, y Director Científico de Ikerbasque.

El Departamento de Educación del Gobierno Vasco convoca anualmente el Premio Euskadi de Investigación. En el año 2020, el premio se convocó en el área de la Ciencia y Tecnología y tiene por objeto fomentar la actividad científica, y estimular, promocionar y valorar los esfuerzos de investigadores y equipos cualificados de la Comunidad Autónoma del País Vasco o de fuera de la Comunidad Autónoma, cuyo trabajo haya ejercido una influencia positiva destacada en Euskadi.

El profesor Cossío puede ser considerado como un referente internacional en Química Multidisciplinar. Su trabajo comprende áreas tan diversas como la química sintética, la computacional, la biotecnología, y la física, y ha contribuido de forma muy importante al avance del conocimiento y al desarrollo de metodologías novedosas para la investigación y desarrollo tecnológico. Siendo un químico orgánico sintético en su origen, el enfoque de los problemas científicos lo aborda bajo todas las perspectivas químicas posibles, buscando una mejor comprensión del mecanismo básico involucrado en la reacción y cómo es posible introducir cambios en la misma, con el objetivo de obtener el mejor resultado para el problema en cuestión, y buscando las posibles aplicaciones de la excelente ciencia que desarrolla. Consecuencia importante de esta actitud es la cantidad de patentes y el uso de éstas para crear spin-off's para la obtención de compuestos con posibles aplicaciones en diferentes tratamientos tumorales.



Dr. Fernando P. Cossío Mora

Por otro lado, el trabajo reciente del profesor Cossío tiene implicaciones fundamentales no solo en la Química sino en la Ciencia. Este trabajo dirigido a resolver una cuestión fundamental de la investigación actual en física ha sido galardonado con una Synergy grant del Consejo Europeo de Investigación (ERC) este año.

El profesor Cossío ha estado muy implicado en el avance y gestión de la ciencia en Euskadi, habiendo ocupado diferentes cargos, como Decano de la Facultad de Ciencias Químicas (1999-2001) y Vicerrector de Investigación y Relaciones Internacionales de la UPV/EHU (2001-2003), siendo en la actualidad y desde 2009 Director Científico de Ikerbasque, la Fundación Vasca para la ciencia.

ELENA SÁEZ

Jesús Campos, Premio Lilly Joven Investigador 2021

El Premio Lilly Joven Investigador 2021, entregado anualmente por la empresa Lilly y la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) ha sido otorgado a Jesús Campos del Instituto de Investigaciones Químicas (Sevilla).

El trabajo premiado se centra en la exploración de modelos inusuales de cooperatividad química con el objeto de descubrir nuevos mecanismos de activación molecular. “El fin último de estas investigaciones es la extensión de estos procesos moleculares al desarrollo de catalizadores cooperativos que sean eficientes en procesos de interés industrial y medioambiental”, explica Jesús Campos.

Para el Dr. Campos “Este prestigioso premio supone más entusiasmo para seguir trabajando en la exploración de nuevos retos en química organometálica y catálisis cooperativa. Es además un reconocimiento directo al esfuerzo de todos los estudiantes y colaboradores con los que he tenido la suerte y el privilegio de desarrollar mis investigaciones”.

El Premio Lilly Joven Investigador 2021 será entregado en una reunión telemática organizada próximamente por la RSEQ. En esa reunión, el Dr. Jesús Campos impartirá la conferencia “Unconventional Modes of Chemical Cooperation for Bond Activation and Catalysis”.

Jesús Campos realizó sus estudios de máster en la Universidad de Manchester (Reino Unido) y se doctoró en 2012 por la Universidad de Sevilla, llevando a cabo una estancia de investigación en la Universidad de North Carolina (EE. UU.). Tras realizar sus investigaciones posdoctorales en las Universidades de Yale (EE. UU.) y Oxford (Reino Unido), se incorporó como investigador



Dr. Jesús Campos

Marie Curie al Instituto de Investigaciones Químicas de Sevilla, donde es Científico Titular del CSIC desde 2018 y dirige su grupo de investigación en química organometálica y catálisis cooperativa bajo un proyecto ERC Starting Grant del European Research Council. Desde 2020 es Académico de Número de la Academia Joven de España.

A three-shell supramolecular complex enables the symmetry-mismatched chemo- and regioselective bis-functionalization of C_{60}

Nat. Chem. 2021 13, 420-427. <https://doi.org/10.1038/s41557-021-00658-6>

Ubasart, E., Borodin, O., Fuertes-Espinosa, C.

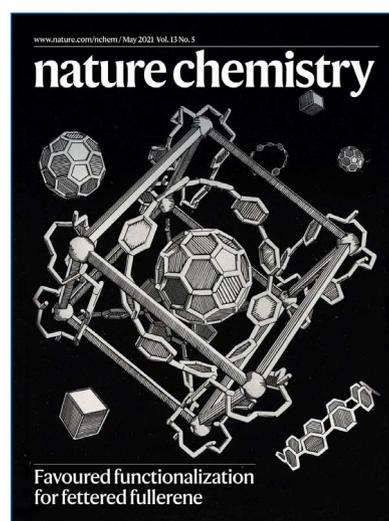
Youzhi Xu, Cristina García-Simón, Laura Gómez, Judith Juanhuix, Felipe Gándara, Inhar Imaz, Daniel MasPOCH, Max von Delius and Xavi Ribas

Una muñeca rusa molecular permite la síntesis exclusiva de bis-aductos de fullerenos de manera regioselectiva

En el marco del proyecto de tesis del doctorando Ernest Ubasart, hemos diseñado un complejo supramolecular de tres capas (C_{60} -[10]CPP-nanocapsula) para conseguir la funcionalización regioselectiva del C_{60} y formar exclusivamente el isómero *trans*-3 de bis-aductos en ciclopropanaciones tipo Bingel. El trabajo se ha publicado en el número de mayo 2021 de la revista *Nature Chemistry*.

Nuestro grupo de investigación QBIS-CAT ha estado trabajando en nanocápsulas supramoleculares durante casi una década. En 2014, diseñamos una nanocápsula prismática tetragonal capaz de encapsular los fullerenos de C_{60} a C_{84} . Este fue el comienzo de una fructífera historia a lo largo de estos años sobre el estudio de la química en el espacio confinado de las nanocápsulas, con especial interés en la purificación de fullerenos y metalofullerenos endoédricos (EMF). Más recientemente en 2020, las nanocápsulas supramoleculares se utilizaron como máscaras para la formación regioselectiva de tetraquis-aductos en el cinturón ecuatorial. Este fue un hito en el campo y nos impulsó a continuar la investigación de la estrategia de la máscara supramolecular.

En colaboración con el grupo del Dr. Max von Delius (Universidad de Ulm, Alemania) aunamos esfuerzos para sofisticar el sistema y combinar la estrategia de máscaras supramoleculares con anillos de cicloparafenilenos ([10]CPP). Así, divisamos la encapsulación de C_{60} -[10]CPP en una nanocápsula más grande y la funcionalización regioselectiva del C_{60} . Sintetizamos el complejo ternario tipo Matryoshka, y seguidamente observamos una regioselectividad exquisita de la ciclopropanación Bingel para bis-aductos *trans*-3 de C_{60} . Se obtuvieron buenos monocristales tanto de la Matryoshka sin reaccionar como del *trans*-3 bis-aducto-Matryoshka y logramos su difracción en el Sin-crotrón ALBA de Barcelona, gracias a la colaboración con el grupo del Prof. D. MasPOCH (ICN2) y del Dr. F. Gándara (CSIC-Madrid). Los datos cristalográficos fueron cruciales para comprender la reactividad precisa en dos enlaces [6,6] específicos de la esfera C_{60} , que dan exclusivamente el isómero *trans*-3 de bis-aductos en ciclopropanaciones tipo Bingel.



El conocimiento sobre cómo controlar la funcionalización regioselectiva de los fullerenos obtenidos con este nuevo sistema supramolecular, similar a las “muñecas rusas”, puede conducir a la implementación de los derivados puros de fullerenos en una amplia gama de dispositivos electrónicos y fotovoltaicos.

El artículo ha merecido la portada de la revista *Nature Chemistry* en su número de mayo 2021 (imagen).

Este hallazgo ha sido destacado en la revista *C&EN*, como se puede ver en este enlace:

<https://cen.acs.org/materials/nanomaterials/Nested-nanostructures-direct-fullerene-functionalization/99/i14>

El artículo es:

Ubasart, E., Borodin, O., Fuertes-Espinosa, C. Youzhi Xu, Cristina García-Simón, Laura Gómez, Judith Juanhuix, Felipe Gándara, Inhar Imaz, Daniel MasPOCH, Max von Delius and Xavi Ribas. A three-shell supramolecular complex enables the symmetry-mismatched chemo- and regioselective bis-functionalization of C_{60} . *Nat. Chem.* 2021 13, 420-427. DOI: 10.1038/s41557-021-00658-6.

Los artículos reseñados en esta sección deben dirigirse directamente al editor: sierraor@ucm.es
El Comité Editorial de *Anales de Química* seleccionará las reseñas para su publicación

Pureza

Javier de Mendoza

Para los químicos, una sustancia pura es aquella que presenta propiedades invariantes, independientemente de su origen. En una sustancia pura, todas las moléculas son idénticas, sin que ninguna de ellas “recuerde” cómo llegó allí, más allá de la composición isotópica más íntima de sus átomos constituyentes, añadido para los iniciados. Pero para buena parte de la población, al menos para una mayoría, lo de la pureza es otra cosa. Piensan, sencillamente y sin asomo de duda, que cualquier producto de origen natural es intrínsecamente mejor que otro igual pero sintetizado en un laboratorio. Para aclarar conceptos tomemos un ejemplo corriente, la sal común, uno de los productos químicos más sencillos que podemos encontrar en la naturaleza y del que todos, químicos y profanos de los matraces, saben que se trata de cloruro sódico. Entonces, ¿por qué hay tantas variedades? No me refiero a si sus cristales son grandes o pequeños, de flor de sal, pétalos o escamas, sino a las variedades que clasificamos según su origen, como sal marina, sal negra, sal gris, sal rosa del Himalaya, sal de Kosher, sal roja Hawaiana, o un sinfín de nombres más. Algunas incluso con categoría especial, como la sal marina de Trápani, inscrita desde 2011 en la lista de productos tradicionales sicilianos con denominación de origen. En nuestro país abundan también las sales alimentarias de calidad reconocida, y cerca de donde vivo es famosa la flor de sal d'ès Trenc, por cuya variedad más simple te piden algo más de 20 euros por 150 gramos, eso sí, magníficamente envasados. Es fácil adivinar que las distintas calidades se deben a aditivos que la sal contiene, más allá del cloruro sódico, por lo que deja de ser una sustancia pura, mal que les pese a quienes defienden la calidad de su producto por la extrema pureza y blancura de las salinas, originadas por evaporación de las cristalinas aguas de los mares, o por extracción de las minas excavando directamente su mineral, la halita. Lo más corriente es que contengan o se les añadan otros elementos, como yodo, calcio o magnesio. Si bien la sal ha sido históricamente un producto muy cotizado y origen de disputas, guerras y migraciones, su valor ha decaído por completo en los tiempos modernos, aunque alguno de los elementos que acompañan al sodio, como el litio, son ahora codiciados, por su explosiva demanda en la confección de baterías, la gran apuesta de la industria del transporte futuro. Eso ha hecho que países con grandes salares, como Chile o Bolivia, sean hoy oscuro objeto del deseo de las grandes potencias.

Hasta aquí un ejemplo típico de productos naturales supuestamente puros cuyo valor se incrementa por las impurezas que contienen. Lo habitual, sin embargo, es lo contrario, que las impurezas causen una pérdida de valor del producto. Cuando de jóvenes íbamos a Andorra para esquiar o de fin de semana, mi madre siempre me encargaba que le trajera aspirina francesa porque, según afirmaba, daba menos ardor de estómago que la española. Yo, por entonces estudiante de Farmacia en Barcelona, protestaba y la criticaba desde mis nacientes convicciones científicas, aunque la realidad es que me quejaba por la molestia de tener que hacer un recado no programado, y eso duró hasta que me tocó hacer prácticas de laboratorio de la asignatura de Farmacia Galénica (hoy llamada Tecnología Farmacéutica) y teníamos que preparar aspirinas con una máquina de comprimir a partir de ácido acetilsalicílico en polvo y un excipiente que creo que era almidón. Nos explicaron que si la aspirina se humedecía o conservaba en condiciones inadecuadas, tendía a hidrolizarse liberando ácidos acético y salicílico, lo que podría ser la causa de que nuestras aspirinas de entonces fueran peores que las francesas. Cierito o no, dejé de protestar ante los encargos de mi madre. También nos recomendaron masticarlas antes de tragarlas, para facilitar su digestión, y recuerdo que nos comíamos allí mismo algunas de las aspirinas que fabricábamos, por lo que me acostumbré desde entonces a su sabor amargo y peculiar. Me llegó a gustar...

Entre los medicamentos de origen sintético, no presentes en el entorno natural y fruto del diseño o de ensayos con miles de derivados de un candidato inicial, no todo consiste en que el nuevo producto sea activo frente a determinada enfermedad sino que, para garantizar la seguridad frente a su posible toxicidad y efectos secundarios a corto y medio plazo, se realizan numerosos ensayos clínicos, exhaustivos y rigurosos, en animales de laboratorio y en humanos, lo que con frecuencia dificulta, retrasa y a menudo llega a impedir su aprobación definitiva. De todos los candidatos ensayados, sólo un ínfimo porcentaje llega a las estanterías de las farmacias, y cuando nos quejamos, a menudo con razón, de las compañías farmacéuticas y sus beneficios, deberíamos de tener en cuenta sus cuantiosas inversiones en proyectos que acaban fracasando. Y a pesar de todas las precauciones, aparecen de tanto en tanto efectos secundarios que tan sólo son detectados en el largo plazo, cuando el mal ya se ha hecho. Algunos debidos a impurezas. El trágico ejemplo de la talidomida, un tranquilizante que se daba a las embarazadas a comienzos de los 60 para evitar el uso abusivo de barbitúricos, aunque muy conocido, es representativo de esos peligros. El producto posee un centro estereogénico (quiral), por lo que presenta dos formas enantioméricas no superponibles, reflejo una de la otra. El fármaco se suministraba como una mezcla a partes iguales de ambos enantiómeros (racémico), y sólo tras los efectos secundarios observados de teratogenia en los recién nacidos (producía focomelia) se



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

comprobó con horror que un enantiómero, el dextrógiro, tenía propiedades sedantes, mientras que el otro, el levógiro, era teratogénico, por lo que desde el punto de vista médico uno era “el bueno” y el otro “el malo”.

Por eso es tan importante un control exhaustivo de la pureza de los nuevos medicamentos, a menudo influido por el propio proceso de manufactura. Pequeñas trazas de un catalizador o un disolvente, procedentes del procedimiento sintético, pueden invalidar la distribución de un fármaco, como lo hacen otros contaminantes (isómeros, productos secundarios, reacciones indeseadas) o las condiciones de conservación, como por ejemplo hidrólisis (como en el caso de las aspirinas supuestamente malas de mi juventud), la oxidación, o la descomposición por efecto de la luz, entre otros. También cabe mencionar el polimorfismo, es decir, la capacidad de un compuesto para presentarse bajo distintas formas cristalinas. Un ejemplo bien conocido son los cuatro polimorfos del carbono (diamante, grafito, fullerenos y nanotubos), de propiedades completamente distintas entre sí. Por ello, las impurezas polimórficas, a veces difíciles de detectar, deben de ser también cuidadosamente investigadas.

En cuanto a las hierbas medicinales, no tengo mucho que criticar. Casi todas contienen principios activos perfectamente identificados, muchos de los cuales pueden sintetizarse también en un laboratorio, así como otras sustancias por lo general saludables que contribuyen a sus efectos benéficos. Sin embargo, a veces los productos de origen natural pueden ser más peligrosos que los de síntesis, de nuevo por un problema de pureza. Por ejemplo, los tratamientos con hormona de crecimiento se prefieren realizar con hormona sintética, ya que se han descrito casos de encefalopatía (como la enfermedad de las vacas locas) al emplear hormona procedente de extracciones de animales. Cuando la síntesis química estaba menos desarrollada que hoy en día, se acudía con frecuencia a la extracción de principios activos de especies naturales, o de algunos intermedios de estructura compleja que en pocas etapas sintéticas podían transformarse en el producto final (síntesis parcial). En algunos casos, eso creaba una dependencia geopolítica de los países que poseían las especies requeridas. La historia de las hormonas y antiinflamatorios esteroídicos son un buen ejemplo, por lo que de alguna manera se podría considerar la síntesis en laboratorio como un procedimiento más democrático y universal que el uso de fuentes naturales. No obstante, mi principal objeción al uso de productos de origen natural es que se contrapongan a los medicamentos de síntesis con el típico (y a menudo único) argumento de que no hay nada mejor que lo que la madre naturaleza ha puesto a nuestra disposición, sin evidencia experimental alguna que acompañe tales afirmaciones. Junto a ejemplos ampliamente documentados, conviven otros más cercanos a las pseudociencias que a la medicina.

Entre esas pseudociencias, mención especial merecen los productos homeopáticos, mal llamados comúnmente medicamentos, con escaso fundamento, pues ni siquiera contienen casi nunca producto activo, ya que se basan en la extrema dilución de sus preparados, más allá de la posibilidad de encontrar una sola molécula activa en la muestra considerada, a menos que no aceptemos el número de

Avogadro, que no es más que el número de moléculas que hay en un mol (la masa molecular expresada en gramos) de cualquier sustancia. Es una constante universal determinada experimentalmente, un número enorme ($k = 6,022 \times 10^{23}$ moléculas/mol), pero no infinito. Si vamos diluyendo, llegará un momento en que la probabilidad de que exista una molécula en un volumen determinado tenderá a cero. De otros procedimientos comúnmente empleados en la manufactura de productos homeopáticos, como la agitación violenta de las soluciones cada vez más diluidas, según rituales bien definidos (dinamización, potenciación e incluso “sucusión” son los términos empleados por esos aprendices de brujo), mejor no hablamos. Las teorías sobre la memoria del agua y otras “evidencias” nunca han sido demostradas fehacientemente y, cuando se ha intentado hacerlo, se ha comprobado que los experimentos no se podían reproducir de forma rigurosa. Hay muchos ejemplos, pero tal vez el más conocido fue la publicación de 1988, nada menos que en *Nature*, de un artículo del inmunólogo Jacques Benveniste en el que señalaba que anticuerpos humanos a una dilución casi infinita, muy por encima del número de Avogadro, eran reconocidos por basófilos como si estuvieran presentes. Ante la reacción de sorpresa de la comunidad científica, y las dudas de la propia revista al aceptar publicarlo (hasta incluyó un editorial preventivo de su editor John Maddox), se realizaron de nuevo los mismos experimentos en distintos laboratorios, al principio con resultados dudosos, pero finalmente refutados sin sombra de duda, en cuanto se aplicó el principio de doble ciego, es decir, ni los que miden las muestras ni los que las reparten conocen a priori la composición de cada una de ellas. Un buen contratiempo para la poderosa industria de la homeopatía, que desde entonces ha perdido buena parte de su credibilidad, a pesar del poderío de las empresas del ramo, en especial en Francia, Alemania y otros países centroeuropeos. Un detallado y clarificador artículo del profesor José Vicente Soler sobre el tema se puede encontrar en el número de *Anales de Química* que precede a éste [“Todo sobre la homeopatía”, *An. Quím.* 2021, 117(1), 53-60]. Muy recomendable para negacionistas, terraplanistas, conspiranoicos y demás creyentes, hoy en día tan abundantes, pero que curiosamente no se creen nada, aunque los datos sean apabullantes, pues se mueven más por la fe que por la evidencia.

Mis lectores se preguntarán aquí ¿qué tendrá que ver la pureza con la homeopatía? La respuesta lógica y obvia sería “nada”, a menos que veamos, como yo acabo de hacer, la máxima expresión de pureza en la total ausencia de moléculas activas, en la nada, como un espíritu sin materia, como un ángel en un mundo de seres vivos e impuros. ¡Ay, qué bien vendría que en su prospectos, todos los medicamentos de venta en las farmacias estuvieran obligados a indicar claramente (unas citas bibliográficas bastarían) qué experimentos los avalan, a ser posible con ensayos de doble ciego!

JAVIER DE MENDOZA

Catedrático jubilado de Química Orgánica (UAM)
Profesor Emérito, Instituto Catalán de Investigación Química
(ICIQ, Tarragona)

Fernando Castaño Almendral (1939-2021)

In memoriam

El profesor Fernando Castaño Almendral falleció el pasado 25 de abril de 2021 en Algorta (Bizkaia). Se licenció en Ciencias Químicas por la Universidad de Salamanca (1961) y obtuvo el título de doctor por la misma universidad (1964), en ambos casos con premio extraordinario. En 1963 se trasladó a la Universidad Complutense de Madrid, donde desarrolló la labor de Profesor Ayudante y posteriormente de Profesor Encargado de curso. En 1965 se incorpora al Instituto de Química Física Rocasolano del CSIC, en calidad de Ayudante Científico. Entre 1965 y 1967 llevó a cabo su etapa postdoctoral en la Universidad de East Anglia (Inglaterra), donde investiga sobre el dicroísmo circular y la actividad óptica aplicada al estudio de biomoléculas, bajo la dirección del profesor S. F. Mason. A su regreso al Instituto Rocasolano (1968-1973), trabaja con los profesores Herranz y Morcillo y obtiene una plaza de Investigador Científico. En 1973 se incorpora al Departamento de Química Física de la Universidad de Bilbao (actualmente Universidad del País Vasco, UPV/EHU) como Profesor Agregado, obteniendo en 1978 la Cátedra de Estructura Atómico-Molecular y Espectrografía. A partir de entonces da comienzo a una etapa de creación y liderazgo de un grupo de investigación, inicialmente junto con el profesor Ernesto Martínez Ataz. Nombrado Profesor Emérito en 2009, recibió un homenaje de la UPV/EHU en enero de 2010 (foto). Publicó cerca de ciento setenta artículos científicos y dirigió un total de veintisiete tesis doctorales, siendo también miembro fundador y luego presidente del Grupo Especializado de Física Atómica y Molecular (GEFAM) de la RSEQ y la RSEQ.

A lo largo de su carrera llevó a cabo numerosas estancias en universidades y centros de investigación extranjeros de Europa y Estados Unidos, algunas de ellas en sus últimos años de actividad profesional, contabilizando más de seis años en total. Poseedor de una curiosidad científica incansable, se interesó por diversas técnicas experimentales de vanguardia y su aplicación a problemas de química y física molecular, especialmente relacionadas con el uso de láseres y haces moleculares para obtener información detallada de propiedades moleculares y reacciones químicas,



El profesor Fernando Castaño Almendral en enero de 2010

tales como el estudio de procesos multifotónicos y su aplicación a procesos dinámicos, reacciones en complejos de van der Waals, espectroscopía de coherencia rotacional, pero también la física de superficies o la magnetorresistencia de materiales. Fruto de un afán constante por introducir técnicas innovadoras que contribuyeran a acercar la ciencia española a los estándares europeos del momento, catalizó en la Universidad del País Vasco la puesta en marcha de diversas líneas de investigación, varias de ellas pioneras en España, que prosiguen en la actualidad. Así, en el grupo de Espectroscopía de la UPV/EHU se desarrolló la fluorescencia inducida por láser de moléculas diatómicas y complejos de van der Waals, estudios cinéticos de átomos alcalino-térreos metaestables preparados por excitación láser, disociación multifotónica con un láser de CO₂, análisis de radiación emitida por el impacto de electrones con moléculas, espectroscopía de rotación pura en la región de microondas, procesos ultrarrápidos por láseres de femtosegundos y propiedades magnéticas de nanoestructuras.

FRANCISCO J. BASTERRETxea
Departamento de Química
Universidad del País Vasco
franciscojose.basterretxea@ehu.es

Sigma-Aldrich®

Lab & Production Materials

MERCK

Materials that Matter

for Your Research

**Your reliable supplier for
material science:**

- Nanomaterials
- Organic and Printed Electronics
- Polymer Science
- Drug Delivery
- 3D Bioprinting
- Materials Synthesis
- Literature and Resources
- Material Matters



For more information, visit
[SigmaAldrich.com/
materials-science](https://SigmaAldrich.com/materials-science)

STAY CONNECTED



Please visit
[SigmaAldrich.com/
stay-connected](https://SigmaAldrich.com/stay-connected)



The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the U.S. and Canada.

© 2020 Merck KGaA, Darmstadt, Germany and/or its affiliates. All Rights Reserved. Merck, the vibrant M, and Sigma-Aldrich are trademarks of Merck KGaA, Darmstadt, Germany or its affiliates. All other trademarks are the property of their respective owners. Detailed information on trademarks is available via publicly accessible resources.

MK_FL6026EN Ver. 1.0 31785 05/2020

