

DISCURSO DE INGRESO

**Impacto de la ciencia en la sociedad:
Desde la prehistoria hasta la crisis energética medioambiental actual***
**Impact of Science on Society:
From Prehistory to the Current Energetic-Environmental Crisis**

Bernardo Herradón García

Académico Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España.

b.herradon@csic.es

RESUMEN

En esta conferencia de toma de posesión como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España, el autor reflexiona sobre el papel de la ciencia como parte de la cultura y de la importancia de la historia de la ciencia para explicar y difundir ciencia. También se abordan algunos avances de la ciencia que benefician al ser humano.

En una segunda parte, se hace un breve repaso a algunos hitos en la historia de la química, haciendo especial énfasis en los beneficios que la química aporta a nuestro bienestar.

Por último, se presentan resultados de nuestro grupo de investigación en el estudio de compuestos bioactivos (relación química-biomedicina), toxicidad de sustancias químicas (relación química-ciencias medioambientales) y en el desarrollo de dispositivos electroquímicos de almacenamiento de energía (relación química-ciencia de los materiales-energía). Estos temas están relacionados con algunos de los retos generales de nuestra sociedad y que la ciencia y la tecnología tendrá que resolver en las próximas décadas.

PALABRAS CLAVE: Ciencia y sociedad, historia de la ciencia, historia de la química, biomedicina, materiales para la energía, impacto medioambiental.

ABSTRACT

In this lecture as Corresponding Academician of the Royal Academy of Doctors of Spain, the author reflects on the role of science as part of culture and the importance of the history of science to explain and disseminate science. Some advances in science that benefit human beings are also addressed.

In a second part, a brief review of some milestones in the history of chemistry is done, with special emphasis on the benefits that chemistry brings to our well-being.

Finally, results from our research group are presenting in the study of bioactive compounds (chemistry-biomedicine relationship), toxicity of chemical substances (chemistry-environmental sciences relationship) and in the development of electrochemical energy storage devices (chemistry-materials science-energy relationship). These topics are related with some of the main challenges of current society that, in turn, science and technology will be involved in solved in the next decades.

KEYWORDS: Science and society, history of science, history of chemistry, biomedicine, materials for the energy, environmental impact.

* Discurso pronunciado por el Dr. D. Bernardo Herradón García en su Toma de Posesión como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España el día 24-04-2024.

1. A MODO DE PREÁMBULO: LA QUÍMICA ORGÁNICA EN LA REAL ACADEMIA DE DOCTORES DE ESPAÑA (RADE).

Desde una perspectiva personal, uno de los principales atractivos de la Real Academia de Doctores de España (RADE) es que en ella se encuentran profesionales de todas las áreas del conocimiento. La RADE se estructura en 10 secciones, desde la Teología (Sección 1) a Veterinaria (Sección 10), con la Sección 5 dedicada a las Ciencias Experimentales (y las Matemáticas).

Rastreando en la historia de la RADE, he encontrado que tres profesores, importantes para el desarrollo de la química orgánica en España, fueron académicos (1).

La química orgánica es una de las principales áreas de la química, en la que se investigan los compuestos de carbono —el elemento químico con número atómico, $Z = 6$ —, que forma más compuestos que los otros 117 elementos juntos. Este hecho deriva de las propiedades del carbono. Debido a su configuración electrónica es capaz de formar enlaces muy fuertes con átomos de muchos elementos. Los enlaces entre dos átomos de carbono son muy estables; llegando, incluso, a formar cadenas muy largas (hasta de decenas de millones de átomos, el fenómeno de la *concatenación*). De esta capacidad de enlace y de concatenación surge la versatilidad de los compuestos del carbono, tanto en múltiples aplicaciones como en constituir el elemento fundamental para la vida. Las biomoléculas responsables de las funciones en la célula son compuestos carbonados (excepto el agua).

Toda mi vida científica (¡ya 44 años!) ha estado dedicada a la química orgánica. Por eso, con estas palabras quiero reconocer la labor científica y, especialmente, docente de tres académicos de la RADE: José Rodríguez-Carracido (1856-1928; ingreso en la RADE: 1923), José Giral (1879-1962; ingreso en la RADE: 1923) y Manuel Lora-Tamayo (1904-2002; ingreso en la RADE: 1970).

Carracido estudió Farmacia en Santiago de Compostela y completó su formación con una tesis doctoral en la Universidad de Madrid (conocida como Central). En aquella época era más habitual licenciarse en Farmacia que en Ciencias para realizar una carrera científica. Posteriormente, fue profesor de química orgánica y química biológica en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Madrid, de la que fue decano de su facultad y rector. Fue una figura muy relevante en su época, formando parte de la que se ha llamado la *generación de los sabios* —junto a Ramón y Cajal (1952-1934), Torres Quevedo (1852-1936) y Echegaray (1832-1916), entre otros—. Tuvo un papel destacado en política (fue senador designado por la Universidad de Granada y asesor de distintos gobiernos); periodista; escritor de libros de texto, de divulgación y de historia; ensayista; y prologuista de numerosos libros.

Fue académico de la RADE; de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; y de la Academia de la Lengua. También ostentó la presidencia del Ateneo de Madrid, una entidad con gran influencia cultural en la época de cambio de siglo. Fue uno de los fundadores de la Sociedad Española de Física y Química en 1903. Como rector de la Universidad de Madrid fue anfitrión de Albert Einstein (1879-1955) en su visita a España en 1923 (Figura 1). Por cierto, Einstein también fue académico correspondiente en la RADE (2).

De acuerdo con las condiciones científicas en España en su época, Carracido apenas hizo investigación original en química orgánica. Sus principales aportaciones fueron en la implantación de los métodos de enseñanza que se estaban usando en el resto de Europa, especialmente de las escuelas alemana —fundada por Justus von Liebig (1803-1873)— y francesa —impulsada por Marcellin Berthelot (1827-1907) (3).



Figura 1. Fotografía de la visita de Albert Einstein (sentado, en el centro) en Madrid. Carracido se encuentra a su derecha [Gentileza del profesor Francisco González-Redondo, (4)].

José Giral es más conocido por su labor política que por su carrera académica y científica; debido a que fue el titular de varios ministerios en los gobiernos de la II República y presidente de gobierno en el exilio (5). Sin embargo, antes de su incursión en política, Giral fue muy activo en el mundo académico y científico. Se licenció en Farmacia (siendo el titular de un establecimiento farmacéutico exitoso en Madrid) y en Química. Tras una estancia en París, en los laboratorios de Fournieu (1872-1949, un pionero en quimioterapia) regresó a España, siendo catedrático de Química Orgánica en las Universidades de Salamanca y Madrid (Farmacia). Fue uno de los fundadores de la Sociedad Española de Física y Química. Sus primeras investigaciones fueron en química analítica para, posteriormente, dedicarse a la química orgánica. En este campo, podemos destacar su investigación pionera en España en el uso de catalizadores —sustancias químicas que aumentan la velocidad de una

reacción— con aplicaciones sintéticas (desarrollo de métodos para obtener sustancias químicas) (6).

Lora-Tamayo es posterior a los dos científicos anteriormente citados. Nació en Jerez de la Frontera en 1904. Hijo único, en 1918 se trasladó a Madrid (sus padres le acompañaron) para completar el bachillerato (Instituto Cardenal Cisneros) y, posteriormente, Química y Farmacia (Universidad de Madrid). Como indica en su autobiografía (7), al terminar sus estudios, su objetivo era ser catedrático. Mientras accedía a este puesto, empezó a realizar oposiciones, obteniendo —casi simultáneamente— los puestos de farmacéutico militar, químico de aduanas y químico-farmacéutico en un hospital de Sevilla. Durante su estancia en Sevilla empezó a colaborar con José Pascual-Vila (1895-1979), profesor en la Universidad de Sevilla, con el que presentó dos tesis doctorales: en Química (1930) y en Farmacia (1933). En 1932 solicitó (y consiguió) una beca de la JAE (Junta para la Ampliación de Estudios), para realizar una estancia en la Universidad de Estrasburgo en el grupo del Profesor Nicloux (1873-1945) investigando en bioquímica analítica. Para conseguir los permisos laborales para la estancia en Estrasburgo solicitó la ayuda de José Giral —que había sido profesor suyo y que, en ese momento, era ministro de Marina—, que hizo las gestiones para que pudiera obtener la excedencia en sus trabajos. Tras su vuelta a España, accede a una cátedra de Química Orgánica en la Facultad de Medicina de la Universidad de Cádiz (adscrita a la Universidad de Sevilla) en 1933. En 1934, Pascual-Vila regresó a Barcelona y Lora fue nombrado catedrático de Química Orgánica en la Universidad de Sevilla. Este fue un hito en su carrera, pues le permitió realizar investigación en química orgánica, lo que no era fácil en Cádiz, debido a la formación de sus estudiantes (futuros médicos).

En 1942 se le asignó la cátedra de Química Orgánica de la Universidad Central de Madrid. Con este puesto también se le nombró jefe de la Sección de Química Orgánica en el recién creado CSIC (heredero de la JAE). Lora-Tamayo fue un trabajador incansable con gran visión de los caminos que la investigación en química orgánica estaba tomando en su tiempo y apoyando a sus colaboradores. Para mejorar la formación de éstos, empezó a establecer una serie de contactos con destacados químicos orgánicos europeos (algunos galardonados con el Premio Nobel), que fueron los anfitriones de estancias postdoctorales de sus colaboradores desde finales de los años 1940s. De esta manera, consiguió que sus discípulos fueran capaces de establecer líneas de investigación propias a su vuelta a España. También hay que destacar que estas iniciativas se realizaron en la época más duras del aislamiento del régimen franquista.

Lora continuó su docencia e investigación (en la Universidad de Madrid —posteriormente Universidad Complutense de Madrid— y el CSIC, creando el Instituto de Química Orgánica General, del que fue su director hasta su jubilación en 1974), incluso compatibilizando con

sus múltiples tareas. Lora fue una persona muy influyente en España, con importantes cargos políticos, universitarios, académicos y sociales.

Entre 1962 y 1968, fue ministro de Educación en el IX gobierno franquista. En su época se cambió el nombre del ministerio; y, lo que es más importante, se modernizaron los planes de estudio de todos los niveles. Debido a los incidentes de orden público en 1968, con una extrema represión en la universidad por parte del ministro de la Gobernación, presentó su dimisión; siendo uno de los dos únicos ministros de Franco que dimitieron (el otro fue el general Varela) de todos los gobiernos franquistas. También fue miembro del Consejo del Reino en 1975, cuando murió el dictador. Fue presidente del CSIC (entre 1967 y 1974), académico de la RACEFyN y de la RADE, presidente del Instituto de España y presidente de la RSEFQ.

Actualmente, el edificio que alberga a mi instituto (IQOG) del CSIC lleva el nombre de Centro de Química Orgánica Lora-Tamayo (CENQUIOR). En mi faceta de aficionado a la historia de la Química, hace unos años me invitaron a impartir una conferencia en un congreso de la Sociedad Española de Historia de la Ciencia y la Técnica y aproveché para hablar sobre la química orgánica en la JAE y en el primer CSIC, con un papel relevante de estos tres científicos. Un resumen de la conferencia se publicó en un artículo (8).

2. LA ENSEÑANZA Y DIFUSIÓN DE LA CIENCIA

Frecuentemente, en los libros (de texto, de divulgación, y de referencia), *la ciencia se presenta como si fuese una obra perfectamente acabada, que se conoce desde el origen de los tiempos*.

Sin embargo, la ciencia debe explicarse y exponerse teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Avances científicos. Pocas veces se recogen avances recientes en estos textos. Por supuesto, la ciencia es un proceso en constante progreso y, algunos de estos (los de mayor relevancia social y/o histórica) se deberían recoger en textos educativos y divulgativos.
- b) Difusión de la cultura científica. Este término es más adecuado que *divulgación científica*. Es una actividad con la que se pretende trasladar a todo tipo de público (a los más jóvenes, preferentemente) conceptos y avances científicos.
- c) Filosóficos. La relación entre la filosofía y la ciencia tiene importancia, tanto desde el punto de vista histórico, como para entender más fácilmente los fundamentos de una ciencia concreta. Toda ciencia se fundamenta en el *método científico*, que es una de las piedras angulares de la filosofía de la ciencia. Las ciencias con mayor fundamento teórico —matemáticas y física—, han tenido una estrecha relación con la filosofía.

- d) Historiográficos. Es importante poner de manifiesto que el desarrollo científico (y los conceptos fundamentales) ha evolucionado con el tiempo, que la ciencia la han hecho seres humanos, que ha habido errores, aciertos, rectificaciones, etc. Para entender una ciencia es importante conocer su historia. Sería conveniente que se impartiesen cursos de Historia de la Ciencia general y de la Ciencia particular en las carreras universitarias.
- e) Sociológicos. Referida a la faceta de cómo los avances científicos impactan en la sociedad, lo que servirá para fortalecer el vínculo entre los avances científicos y la sociedad.

Todos estos aspectos son, también, ciencia y, por lo tanto, deben regirse por los baremos de la ciencia: el rigor y la aplicación del método científico. Frecuentemente, en tareas de divulgación (y también en aspectos historiográficos) se simplifican mucho las explicaciones, llegando a utilizarse metáforas absurdas.

3. UNA SOCIEDAD AVANZADA

La Figura 2 representa esquemáticamente el progreso que ha llevado del ancestro de nuestra especie —capaz de controlar el fuego— a la sociedad avanzada científicamente y tecnológicamente, que nos proporciona algunas de las comodidades de las que disfrutamos en la actualidad; lo que se ha conseguido gracias a los avances en biología, geología, física y química. Estas son las únicas cuatro ciencias naturales. Todas las demás —como la química-física, la bioquímica, las ciencias medioambientales, la biotecnología, etc.— derivan de estas cuatro a través de aproximaciones interdisciplinares.

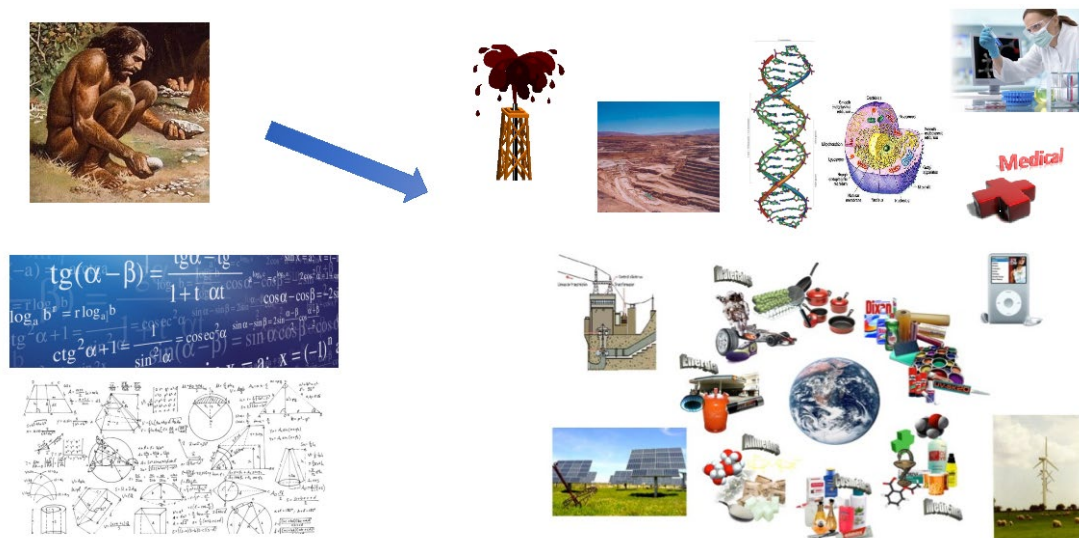


Figura 2. Imagen representativa de algunas de las comodidades de la sociedad actual y el papel que juegan la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas, desde el control del fuego.

Los avances básicos en las cuatro ciencias naturales permiten ahondar en el conocimiento y pueden explicar algunos de los fenómenos naturales. Desde el punto de vista del impacto de la ciencia en la sociedad, algunas facetas (entre muchas otras) que podemos mencionar son:

- La geología nos permite un mejor aprovechamiento de recursos naturales, proporcionando petróleo y otros materiales útiles obtenidos en la minería.
- La biología (y su aplicación al ser humano: la medicina y la biomedicina) es la principal ciencia responsable del cuidado de nuestra salud.
- La física (y sus aplicaciones tecnológicas e ingenieriles) permite una gestión eficaz de la energía y nos proporciona dispositivos electrónicos para las comunicaciones, el trabajo o el ocio.
- La química proporciona los materiales de partida con los que interaccionamos a diario: utensilios del hogar, productos de droguería y limpieza, materiales que cuidan de nuestra salud (medicinas, biomateriales) e imagen (cosmética), alimentos (todos los alimentos son una mezcla de centenares de sustancias químicas), y sustancias que nos proporciona energía.

Existe una quinta ciencia que no es natural: las matemáticas (si es o no una ciencia natural es un debate ‘filosófico’); pero que, sin ella, las otras ciencias no progresarían adecuadamente; pues las matemáticas nos proporcionan métodos y modelos para interpretar y predecir resultados.

4. BENEFICIOS DE LA CIENCIA PARA EL SER HUMANO

Algunos de los múltiples beneficios que la ciencia nos proporciona son (9):

- Vida más larga. En apenas un siglo, la esperanza de vida al nacer y la vida media del ser humano se han duplicado.
- Vida más saludable. Monitoriza nuestra salud. Proporciona medicinas que curan nuestras enfermedades, piezas de recambio para nuestro cuerpo, palia dolores y achaques.
- Nos suministra agua que podemos beber, usar para nuestra higiene o regar nuestras plantaciones. Este factor es fundamental para una vida más larga y saludable.
- Nos ayuda a tener más y mejores alimentos. Debido a la disponibilidad de agua de calidad, a la mejora en la gestión de los campos de cultivo (que es la base de nuestra alimentación) y a disponer de sustancias químicas que permiten cosechas más abundantes (con abonos y fertilizantes), cuidan las cosechas de ataques de otros organismos (productos fitosanitarios) y conservan mejor los alimentos (con agentes antioxidantes o que evitan la contaminación por microorganismos, entre otros).

- Cuida de nuestro ganado y animales de compañía, lo que se refleja en nuestra alimentación y en nuestro ocio.
- Nos proporciona energía para todo. Lo que implica que no pasamos frío en invierno, ni calor en verano. Permite iluminar nuestras viviendas, lugares de trabajo, o conseguir decoraciones espectaculares; además, con dispositivos que optimizan el uso de la energía. Hace que multitud de aparatos funcionen con corriente eléctrica. Nos permite el transporte en una variedad de vehículos. Con la energía en forma de calor somos capaces de crear obras de arte (por ejemplo, la cerámica) o instrumentos útiles (por ejemplo, utensilios del hogar). Los electrodomésticos facilitan las tareas del hogar. E ininidad de aplicaciones más que hacen nuestra vida mucho más comfortable.
- Una vida cotidiana más agradable y cómoda. Hace que nuestras ropas y sus colores sean más resistentes y atractivos. Mejora nuestro aspecto con perfumes, productos de higiene y de cosmética. Contribuye en la limpieza del hogar y de nuestros utensilios. Ayuda a mantener frescos nuestros alimentos. Prácticamente nos proporciona todos los artículos que usamos a diario.
- Facilita nuestro ocio proporcionando materiales con los que podemos hacer deporte, practicar la jardinería, nos permite leer interesantes obras literarias o cartas de amor; escuchar música, ver la televisión y multitud de actividades con las que disfrutamos.
- Nos permite estar a la última en tecnología. El ordenador más potente y ligero; el móvil más liviano, con la batería más duradera y las máximas aplicaciones; el medio de transporte adecuado que contamine poco, con alta eficiencia y eficacia; el material con el que los deportistas de élite baten marcas y conquistan títulos; y muchas aplicaciones más.

5. CIENCIA BÁSICA (ACADÉMICA) CIENCIA APLICADA. LAS APLICACIONES DE LA CIENCIA

Sin embargo, en muchos casos, es frecuente escuchar las quejas de muchas personas sobre la tardanza con que los avances científicos llegan a sus vidas (si es que llegan).

Podemos mencionar tres razones por las que la ciencia desarrollada en instituciones académicas no llega (rápidamente) a la sociedad:

- Estructura actual de la ciencia. *Se publica muchísimo, se patenta bastante (especialmente, patentes que no pasan del ámbito nacional), pero se transfiere muy poco*. Para que la ciencia académica llegue rápidamente a la sociedad es fundamental el papel de la industria. Para que esto ocurra, es necesario que los resultados patentados sean de interés para las empresas capaces de hacer realidad estos avances.

- Papel de los científicos y de los gabinetes de prensa. *No dejes que la realidad te estropee un buen titular.* Cuando se publica un artículo importante (generalmente, usando el factor de impacto de la revista más que el propio valor de la investigación), es frecuente que estos se difundan en los medios de comunicación. Cuando se leen ciertos titulares (por ejemplo, “un nuevo tratamiento para curar la enfermedad de Alzheimer” o “un material que permitirá desarrollar baterías para automóviles con una autonomía de mil kilómetros”) se piensa que estos avances llegarán en poco tiempo a nuestras vidas. Sin embargo, pasan los años y estos no llegan, creando la sensación de que ‘realmente pocas veces nos beneficiamos de la ciencia’. Esta situación es consecuencia de la exageración con la que presentan los avances científicos a la sociedad: no se deja claro que son resultados de investigación básica, aun distantes para impactar en la sociedad.
- Desarrollo tecnológico actual. Disponemos de multitud de bienes de consumo basados en la ciencia y la tecnología. Estos se producen en fábricas diseñadas y construidas para ese objetivo. Aunque haya un avance científico-tecnológico que mejore el objeto, es difícil que los empresarios desmantelen o modifiquen la factoría en uso para atender estas mejoras.

6. NEGOCIOS LUCRATIVOS BASADOS EN LOS AVANCES DE LA CIENCIA BÁSICA

Podemos mencionar muchos negocios lucrativos basados en la ciencia y la tecnología, la mayoría de los avances que se han indicado en la Figura 2 tienen algún desarrollo comercial.

Dos negocios multimillonarios basados en la ciencia básica: el buscador Google y el desarrollo de la vacuna contra el coronavirus causante de la enfermedad COVID-19.

Originalmente, las búsquedas a través de Google daban como resultado una serie de sitios en la web que estaban ordenados por relevancia (actualmente, esta buena práctica ha sido sustituida por intereses económicos). Para hacer esta clasificación, Google usaba un algoritmo (*PageRank*) desarrollado por Page y Brin (fundadores de Google) que eran dos estudiantes de Ciencias de la Computación en la Universidad Stanford. Este algoritmo está basado en matemáticas fundamentales: el álgebra lineal (10).

En marzo de 2020, la OMS declaró la pandemia de COVID-19. Fueron unos años terribles con millones de fallecidos y muchísimos afectados. Todos estábamos esperanzados en una vacuna que pudiera servir para evitar el contagio o paliar los síntomas de la enfermedad. La vacuna fue desarrollada en un tiempo récord. Las primeras vacunas estaban basadas en la tecnología del ARN mensajero. La rapidez en el desarrollo y eficacia de esta vacuna se debieron al hecho de que se estaba avanzando rápidamente en la ciencia básica en la que se basa este tipo de vacunas; que se fundamenta en avances científicos y tecnológicos en bioquímica, biología molecular y biomedicina (Figura 3) (11).

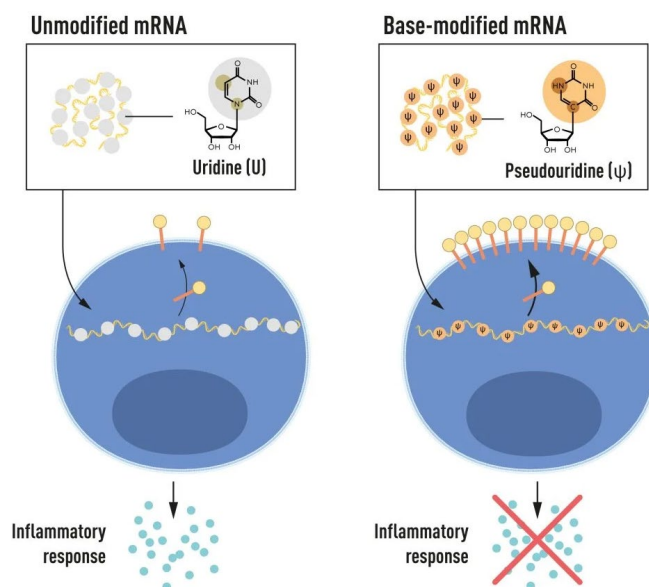


Figura 3. Modificación de nucleótidos que se usan en la estrategia de vacunas basadas en el RNA mensajero y que evitan la respuesta inflamatoria (fuente: NOBEL) (12).

7. BREVES APUNTES SOBRE HISTORIA DE LA CIENCIA: REVOLUCIONES CIENTÍFICAS/TECNOLÓGICAS Y CIENTÍFICOS “REVOLUCIONARIOS”

Frecuentemente en mis ponencias sobre historia de la ciencia suelo usar las revoluciones científicas (y sus implicaciones tecnológicas) como hilo conductor. En la Figura 4 se muestran algunos hitos que considero fundamentales en la historia de la ciencia, relacionados con las llamadas revoluciones científico/tecnológicas.

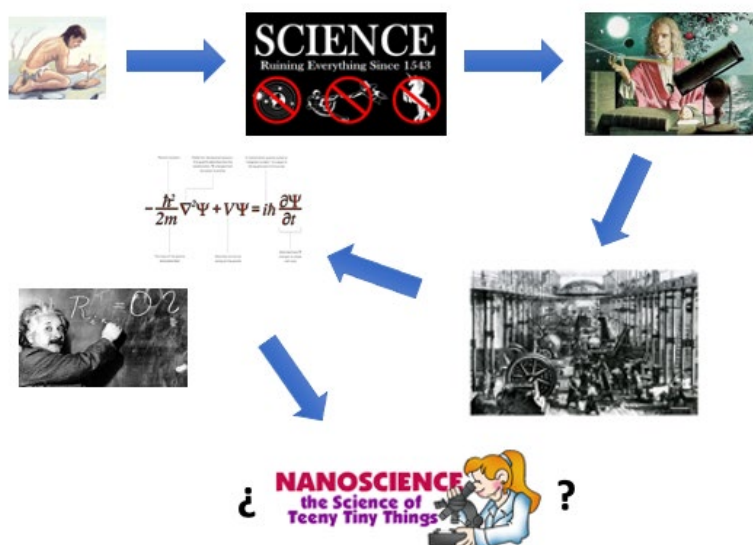


Figura 4. Las diferentes revoluciones científico-tecnológicas.

La primera revolución se produjo cuando el ancestro del ser humano fue capaz de controlar el fuego. Este hecho supuso un cambio radical en nuestro modo de vida (ver más adelante).

Se tardaron centenares de miles de años para encontrar un segundo hito. Este se produjo en 1543, con la publicación del libro *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre las revoluciones de los orbes celestiales*) escrito por Nicolás Copérnico (1473-1543), donde se exponía un nuevo modelo del universo (en aquella época se limitaba al Sol, la Tierra, la Luna, cinco planetas y las estrellas ‘fijas’). Del título de este libro usamos la palabra *revolución* como un término general que desborda los límites de la ciencia; aunque en su origen simplemente significa ‘dar vueltas, girar’.

En la propuesta copernicana, el Sol ocupa el centro en lugar de la Tierra del modelo de Eudoxo-Aristóteles-Tolomeo, vigente desde el siglo IV antes de nuestra era. Desde el punto de vista científico y práctico (útil para la navegación), este cambio de modelo solo supuso una ligera mejora respecto al geocéntrico. El modelo heliocéntrico fue aceptado gracias a las investigaciones de Galileo Galilei (1564-1642), a partir de sus observaciones con su telescopio (los satélites de Júpiter, y las fases de Venus, principalmente), y de Johannes Kepler (1571-1630), con sus tres leyes del movimiento planetario (sencillas y bellas, expresadas en lenguaje matemático).

El siguiente hito en la historia de las revoluciones científicas es Isaac Newton (nacido a caballo entre 1642 y 1643, según usemos el calendario juliano o el gregoriano, fallecido en 1727) que, él solo, constituye una revolución científica. Con él se llega a la cumbre del periodo conocido como *La Revolución Científica*; especialmente con su obra *Los principios matemáticos de la Filosofía natural*, del 1687, en la que expone las leyes que rigen el movimiento de los planetas y la caída de los objetos sobre la superficie de la Tierra. Esto lo expresó en forma matemática y hay que destacar que Newton también creó y desarrolló las matemáticas necesarias para su explicación del universo (13).

El año 1687, con la obra de Newton, se puede considerar el final del Renacimiento y el comienzo de la Ilustración en ciencia. La Ilustración es una de las épocas más brillantes de la historia de la cultura. La descripción y enumeración de los muchos científicos de esta época quedan fuera del alcance (y extensión) de este artículo (excepto el caso de Lavoisier y algunos de sus coetáneos, ver más adelante).

La Ilustración duró hasta el final del siglo XVIII, en la que se produce la tercera revolución científico-tecnológica: la Revolución Industrial; en la que se empiezan a desarrollar multitud de equipamientos, máquinas, materiales, etcétera, que mejoran considerablemente la calidad de vida del ser humano.

El siglo XIX se ha considerado *El siglo de la Ciencia* y, dentro de estas, la química jugó un papel fundamental, pues proporcionó multitud de sustancias que mejoraron nuestras vidas, con avances en la alimentación, medicamentos, productos de higiene y limpieza, colorantes, metales y aleaciones, fuentes de energía, entre otras (ver más adelante). Las ciencias biológicas (y sus aplicaciones en salud humana, la biomedicina) avanzan considerablemente en el estudio de microorganismos y su papel en patologías (así como combatirlas), la identificación de los componentes de los seres vivos, los procesos bioquímicos y, un aspecto fundamental, la *teoría de la evolución*, inicialmente desarrolladas simultáneamente por Darwin (1809-1882) y Wallace (1823-1913). En geología se estudian fenómenos naturales (terremotos, erupciones volcánicas, formación de diversas estructuras geológicas, etcétera) estableciéndose teoría que los explican (plutonismo, neptunismo). A nivel fundamental, la física se interesa por la estructura de la materia (y su interacción con la energía), culminando con el descubrimiento del electrón, la existencia de átomos como entes reales (fundamental en química), y fenómenos naturales como la radiactividad y la generación de rayos X, entre otros. Para interpretar estos resultados (así como para predecir otros nuevos) las matemáticas son la base en la que se sustentan el resto de ciencias, especialmente, la física. Además, en matemáticas también se progresó en el establecimiento de sus fundamentos: desde la lógica al análisis (cálculo).

La explicación de los fenómenos naturales relacionados con la materia y la interacción con la energía no se podía explicar con las teorías de la física de momento; por lo que hubo que desarrollar una ‘nueva física’: la mecánica cuántica. Ésta constituye la quinta revolución científica indicada en la Figura 4, en la que Albert Einstein (1879-1955) fue uno de sus pioneros. También, por lo que supuso de ruptura con el conocimiento previo, tenemos que incluir en esta revolución científica de comienzos del siglo XX, a las teorías de la Relatividad (la especial o restringida, de 1905; y la general, a partir de 1918) desarrolladas, principalmente, por Einstein.

Posiblemente, en la actualidad estamos viviendo la sexta revolución científico-tecnológica; basada en el mundo de la nanociencia y la nanotecnología; con las múltiples aplicaciones que tendrán los materiales nanoestructurados en nuestras vidas en un futuro próximo. Que esta sea realmente una revolución se evaluará en las próximas décadas.

Según Thomas S. Kuhn (1922-1976) —historiador, filósofo y sociólogo de la ciencia, con formación como físico— en su celebrado e influyente ensayo *The Structure of Scientific Revolutions* explica lo que él considera una revolución científica, restringiendo este hecho (14). Kuhn postula que solo han existido solo cuatro revolucionarios de la ciencia: Copérnico, Newton, Einstein y Lavoisier y considera que solo este último es un ‘auténtico’ revolucionario de la ciencia; pues aparte de haber cambiado la manera de investigar e

interpretar resultados en química (ver más adelante), fue consciente de que estaba haciendo una revolución.

8. LA QUÍMICA, LA CIENCIA DE LO COTIDIANO

La química es la ciencia que estudia la composición, estructura, propiedades y transformaciones de la materia, especialmente a nivel atómico y molecular.

Los términos clave de esta definición son *atómico* y *molecular*. La materia que conocemos está formada por partículas muy pequeña: átomos, moléculas e iones (especies químicas cargadas eléctricamente); por lo tanto, podemos decir que *Todo es Química*.

Sin embargo, esta ‘visión’ sobre la química debe matizarse, y acotarla, pues ‘no todo es química’, ya que algunos objetos y fenómenos relacionados con las estructuras enormes del universo (como las galaxias, la materia oscura y la energía oscura) o con fenómenos de muy altas energía, en los que se generan partículas subatómicas –excepto el electrón, el protón y el neutrón–, así como las interacciones que las gobiernan (fuerzas gravitatorias, nuclear fuerte y nuclear débil) quedan fuera del dominio de la química. Por esto es más correcto restringir la química al ámbito de los objetos cotidianos.

9. LA QUÍMICA, LA CIENCIA QUE CREA SU PROPIO OBJETO

La química es una ciencia natural. Sin embargo, muchos químicos pueden investigar a largo de su carrera sin haber trabajado con sustancias naturales. Los químicos tienen la capacidad de preparar sustancias químicas artificiales en un laboratorio, por eso *la química ha sido definida como la ciencia que crea su propio objeto*. Esta frase, acuñada por Marcellin Berthelot (1827-1907), capta perfectamente el espíritu creativo de la química. Los químicos preparan sustancias que nunca antes han existido y estudiamos sus propiedades y utilidades. El área de la química encargada de la preparación de compuestos químicos es la síntesis química, que dependiendo del tipo de moléculas sintetizadas (orgánicas o inorgánicas) se puede clasificar en síntesis orgánica o inorgánica, cuyas metodologías son diferentes.

La capacidad de obtener numerosas sustancias es la razón por la que la química nos proporciona la mayoría de materiales que usamos a diario (como los indicados en la Figura 2 y en el apartado 3).

10. LA ALQUIMIA, LA TEORÍA DE LOS CUATRO ELEMENTOS, Y EL ATOMISMO

La química es una de las actividades más antiguas del ser humano (y sus ancestros). Como mencionado anteriormente, consideramos el control del fuego como la primera revolución científica-tecnológica, ocurrida hace unos 300.000 años. El fuego se genera a través de reacciones químicas en las que una sustancia (el combustible) es oxidada por el oxígeno del aire (el comburente, agente oxidante). Como combustibles se usaron madera, carbón, alquitrán y materiales relacionados. Estas reacciones son exotérmicas; es decir, que generan energía, que puede ser calorífica y/o lumínica. Estas dos características sirvieron para cambiar las vidas de nuestros ancestros. Podemos mencionar: protección del ataque de depredadores; ayuda en la caza de animales como alimentos; calentarse; cocinar; iluminar cavernas, con lo que se protegían del frío y facilitaba la vida en comunidad.

Además, el fuego también se utilizó en aplicaciones prácticas, relacionadas con la manipulación de materiales naturales (principalmente de origen geológico): elaboración de minerales, obtención de metales y pigmentos, entre otros. Estas actividades dieron lugar a las primeras iniciativas industriales/artesanas: la cerámica, la alfarería, la decoración, la cosmética y las manifestaciones artísticas. Por desgracias, como ha ocurrido en muchos momentos de la humanidad, estas actividades también tuvieron su parte negativa: la elaboración de armas; que, aunque en principio podían servir para cazar, pronto se convirtieron en instrumentos de violencia contra otros individuos de la misma especie o de otra relacionada.

El comienzo de la civilización se manifestó por varios hechos: control de la agricultura, establecimiento en comunidades/ciudades, invención de la escritura, desarrollo de una aritmética adecuada para medir y para calcular, necesidad de medir el tiempo (predecir el comienzo de las estaciones —útil para las labores agrícolas), lo que estuvo relacionado con un incipiente comienzo de la astronomía, entre otras.

En esta época se empieza a desarrollar la alquimia. Posiblemente, su origen estuvo relacionado con prácticas religiosas y funerarias; que, posteriormente, evolucionó a actividades de carácter práctico, como la destilación para obtener bebidas alcohólicas y perfumes; la preparación de tintes, pigmentos y colorantes, o rudimentarios remedios sanadores; entre otros.

Posteriormente (principalmente, durante la Edad Media), la alquimia occidental evolucionó a la búsqueda de la piedra filosofal (el material capaz de convertir cualquier sustancia en un metal noble, especialmente en oro) y la oriental (en China, principalmente) hacia el elixir de la eterna juventud.

La búsqueda de la piedra filosofal se ‘fundamentó’ en las teorías de la materia en vigor hasta el siglo XVII y que procede de los filósofos griegos. Como sabemos, los sabios griegos no hacían experimentos, solo pensaban y especulaban.

Con Tales de Mileto (ca 624-546 a.C.) comenzó la filosofía natural (precursora de la ciencia). Tales y algunos de los filósofos posteriores —Anaximandro (610-545 a.C.), Anaxímenes (ca 588-524 a.C.) y Heráclito (ca 540-580 a.C.) — especularon sobre el constituyente fundamental de la materia, proponiendo que está formada por agua, apeirón (una sustancia ideal), aire o fuego. Las teorías sobre la composición de la materia fueron sintetizadas por Empédocles (ca 490-430 a.C.), que las recogió en lo que se conoce como *teoría de los cuatro elementos* (agua, tierra, aire y fuego), aunque Empédocles usó el término *raíz* en vez de *elemento*. Esta teoría fue apoyada y refinada por filósofos tan prestigiosos como Parménides (siglo V a.C.) y, especialmente, Aristóteles (384-322 a.C.), que la amplió con un quinto elemento ‘ideal’ (el éter o quintaesencia) (15).

Debido a la enorme influencia de Aristóteles, esta teoría fue la predominante hasta el siglo XVII. Como se suponía que todas las sustancias estaban formadas por estos cuatro elementos en proporciones diversas, se pensaba que modificando estos componentes se podía transformar la materia. Y el objetivo era transformar cualquier cosa en oro. Y esto se lograría con la piedra filosofal. Esta es la (equivocada) base en la que se apoyaron los alquimistas durante más de 2.000 años.

La teoría del atomismo es una alternativa a la de los cuatro elementos. Fue originada por Leucipo (siglo V a.C.) y desarrollada por su discípulo Demócrito (460-370 a.C.). Estos filósofos postularon que la materia solo podía ser continua o discreta. Si es continua no hay nada sobre lo que debatir; pero si es discreta, se podría dividir en partes hasta llegar a una situación en la que ya no es posible más divisiones. De esta manera, se llegaba a una partícula que era indivisible, a la que denominaron átomo, que significa ‘indivisible’ en griego antiguo. ¿Y qué había entre los átomos?: nada. De esta manera, todo en el universo eran átomos y vacío. La teoría atómica de Demócrito no tuvo el éxito que merecía y cayó en el olvido (como la práctica totalidad de los escritos de Demócrito); posiblemente, también influido por el hecho de que a los filósofos griegos no les gustaba el concepto de la nada/el vacío.

Aunque, con los parámetros actuales, la alquimia es una pseudociencia, es erróneo juzgar hechos y actividades del pasado con la perspectiva actual. Prefiero considerar a la alquimia como una protociencia que usó el conocimiento y equipamiento disponible en su época. Aunque partió de premisas equivocadas y uso métodos sin fundamentos (ausencia de método científico), realizó algún descubrimiento (especialmente práctico) que seguimos utilizando en la utilidad, como son las destilaciones, algunos tratamientos químicos y bastantes sustancias descubiertas o preparadas por los alquimistas.

11. LA QUÍMICA DEL SIGLO XVII: ROBERT BOYLE

A caballo entre los siglos XVI y XVII, el método científico se estableció firmemente en física. Gracias a los estudios y experimentos de Francis Bacon (1561-1626), Galileo, Kepler, William Gilbert (1544-1603) y René Descartes (1596-1650). Sin embargo, la química seguía sujeta a las prácticas alquimista, sin base científica.

La situación pudo cambiar a finales del siglo XVII con los trabajos de Robert Boyle (1627-1691) (16) al que podemos considerar como el último alquimista y primer químico. Boyle intentó aplicar el método científico a la química, pero sus investigaciones no progresaron adecuadamente; en parte, debido a la falta de equipamiento científico adecuado y la necesidad de una base teórica más sólida.

Boyle investigó en numerosas áreas en la frontera entre la física y la química. Con la colaboración de Robert Hooke (1635-1703) diseñó y construyó una bomba de vacío con la que realizaron experimentos con gases; con la que descubrió la relación inversa entre el volumen y la presión de un gas. Esta ley se complementa con la relación encontrada, en 1679, por Edmet Mariotte (1620-1684) de que el volumen y la presión de un gas son directamente proporcionales a la temperatura (ley de Boyle-Mariotte: PV es proporcional a la temperatura).

Hasta 1661, Boyle puede ser considerado un alquimista. Ese año publicó su libro *The skeptical chymist* —en el que utilizó el término híbrido entre ‘químico’ y ‘alquimista’—, con el que rompe con la tradición alquimista. En el texto, Boyle discute el concepto de elemento químico, que define como una sustancia que no puede ser separada en componentes, distinguiéndolo de la sustancia o cuerpo compuesto. Reconoció que este último está formado por la unión de dos o más cuerpos elementales y que difieren de éstos en sus propiedades. Sus estudios llevaron a la conclusión de que había muchos más que los escasos (entre tres y cinco) elementos de la práctica alquimista. Sin embargo, debido a los escasos medios experimentales, Boyle no pudo determinar el número exacto de elementos conocidos en su época. También reconoció la diferencia entre los compuestos químicos puros y las mezclas y avanzó en los métodos de análisis.

Boyle también hizo propuestas sobre reactividad química. Postuló que se produce una combinación química cuando se aproximan las partículas más pequeñas de materia (concepción atomista). Las descomposiciones químicas se producen cuando existe un tercer cuerpo (sustancia química en nuestra terminología moderna) que ejerce un efecto sobre algunas de las partículas que constituyen la sustancia que se descompone.

Estudió el carácter ácido, básico o neutro de las sustancias químicas, determinándolo por el sabor, el cambio producido en algunas sustancias (indicadoras) aisladas de fuentes

naturales (por ejemplo, de la lombarda), la reacción con roca caliza (carbonato de calcio) o por reacciones con otros ácidos o álcalis (de carácter básico) de origen natural.

Boyle conocía el hecho de que ciertos metales al ser calentados al aire forman sales —así conocidos en la época, hoy en día óxidos— y que aumentaban de peso. Por falta de instrumentación científica, Boyle no pudo reconocer la existencia de una sustancia en la atmósfera que pudiera ser la causante del aumento de peso al calentar metales; aunque en su obra *On the mechanical origin and production of fixedness* (1675) describió la formación de óxido de mercurio al exponer el metal al aire a alta temperatura, especulando sobre la existencia de alguna partícula ígnea que penetraría en los corpúsculos mercuriales.

Boyle (al igual que coetáneos suyos, como Descartes y Newton) usó la teoría atómica (en el sentido filosófico de Demócrito) para explicar los resultados de sus investigaciones.

12. LAVOISIER, EL PADRE DE LA QUÍMICA MODERNA

Indudablemente, la química moderna comienza cuando Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) empezó a aplicar el método científico.

Entre Boyle y Lavoisier transcurrió un siglo, en el que la química seguía haciendo progresos importantes (a nivel experimental y con aplicaciones prácticas); pero, frecuentemente, los experimentos no estaban bien diseñados y los resultados no fueron adecuadamente racionalizados. Este estancamiento se produjo debido a que los químicos de la época aceptaron una teoría (la del flogisto) que, erróneamente, interpretaba mal las reacciones de combustión/oxidación (en terminología moderna). La teoría del flogisto suponía que las sustancias químicas tenían un componente (el flogisto) que era la responsable de que ardieran. Cuanto más flogisto tenía una sustancia, más capacidad tenía para arder. Un serio inconveniente de esta teoría es que el flogisto tenía peso (masa en la concepción actual) negativo; pues el hecho experimental es que cuando un metal arde, la sustancia química en la que se transforma tiene mayor peso que el metal original (ya observado por Boyle).

Posiblemente, si los resultados de Boyle hubiesen tenido continuidad por los químicos de la primera mitad del siglo XVIII, la teoría del flogisto habría sido derribada. Por desgracia, esto no fue así y supuso un retraso conceptual de un siglo para la química.

La teoría del flogisto no aguantaría el test del método científico... sin embargo, usando una base científica errónea, los químicos del siglo XVIII fueron capaces de realizar experimentos que dieron resultados impresionantes, como el descubrimiento y aislamiento de nuevos elementos y compuestos químicos; entre los que podemos citar: el hidrógeno, el nitrógeno, el cloro, el manganeso, el platino, el dióxido de carbono, monóxido de carbono, diversos

óxidos de nitrógeno, el wolframio, numerosos compuestos orgánicos de plantas, ... y el oxígeno. Este elemento químico —clave de la química— fue descubierto dos veces en los años 1772, por Carl Wilhem Scheele (1742-1786) (17), y en 1774 por Joseph Priestley (1733-1804) (18). Scheele y Priestley fueron dos de los más grandes científicos de la historia de la humanidad. Por desgracia para Scheele (que trabajaba como boticario en Upsala en 1772) sus resultados tardaron en ser publicados (en 1777), lo fueron en alemán y, apenas, tuvieron difusión; además, su trabajo como boticario tampoco le permitió profundizar en el estudio de ese gas que había descubierto. Por otro lado, Priestley interpretó mal los resultados que obtuvo con la sustancia que llamó *gas desflogistado* (¡tan apegado estaba a la teoría del flogisto!).

En sus comienzos científicos, Lavoisier también fue un seguidor de la teoría del flogisto; que abandonó cuando comprobó que esta teoría no era capaz de explicar resultados experimentales. Cuando Lavoisier abandona la teoría del flogisto y renombra al gas desflogistado como oxígeno (en griego, *generador de ácido*), él sabe que está empezando una ‘revolución en la química’.

Lavoisier nació en el seno de una familia acaudalada. Se licenció en leyes, pero nunca ejerció como abogado. Desde muy joven se interesó por la ciencia, aprendiendo diversas disciplinas. Lavoisier hubiese sido un gran científico en cualquier área que cultivase. Afortunadamente para la química se dedicó, principalmente, a esta disciplina.

Su trabajo (sustento económico) era el de funcionario de la *Ferme Générale* (una institución de carácter semi-feudal que recolectaba impuestos por mandato real), de la que llegó a ser un alto cargo. Su implicación en esta organización fue la que le condenó a ser guillotinado durante el Periodo del Terror de la Revolución Francesa.

En las investigaciones de Lavoisier hay que mencionar a su esposa Marie-Anne Pierrette Paulze (1758-1836), que colaboró en experimentos, ilustró sus publicaciones y tradujo numerosos textos escritos por los químicos ingleses y rusos.

La principal aportación de Lavoisier fue la de reconocer la importancia del oxígeno para explicar las reacciones químicas (1776). Puesto que él fue el que desveló su papel; frecuentemente se le considera su descubridor. La historia de la ‘paternidad’ del hallazgo lleva a la reflexión (filosófica) de lo qué es un descubrimiento científico (¿ser el primero en describirlo o ser el que lo interprete?). Este hecho es el punto de inflexión en la historia de la química y hace a Lavoisier merecedor del título de ‘padre de la química moderna’.

Aunque Lavoisier no hizo muchos experimentos originales, repitió una gran cantidad de ellos, los realizó con sumo cuidado e interpretó adecuadamente los resultados.

Algunas de las aportaciones de Lavoisier son las siguientes (19):

- Rigor en las medidas.
- Perfeccionó las balanzas para hacer pesadas precisas.
- En su libro *Réflexions sur le phlogistique* (1783) derribó la teoría del flogisto.
- Definición firme y rigurosa del concepto de elemento químico (en línea con lo propuesto por Boyle).
- Diferenciación entre elemento y compuesto químico (sustancia compuesta).
- Caracterizó inequívocamente algunas sustancias como elementos: oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, fósforo, mercurio, zinc y azufre.
- Comprobó que cuando un metal se oxida al aire, la ganancia de peso del material obtenido respecto al metal es igual al peso que pierde el aire.
- Realizó experimentos en sentido contrario. Liberó oxígeno de algunos compuestos como el óxido de mercurio y comprobó que el peso perdido por el óxido era igual al ganado por el ambiente que le rodeaba.
- Propuesta de la ley de la conservación de la masa (1775); que, cronológicamente, fue la primera ley fundamental en química.
- Identificó inequívocamente el papel del aire en la combustión y oxidación.
- Estudio de los componentes del aire. Identificó el nitrógeno y el oxígeno (previamente descritos, pero con resultados no bien racionalizados). Nombró a estos gases como oxígeno y nitrógeno (*azote*, que significa 'sin vida' en griego, y que actualmente es el término en francés para el nitrógeno).
- Propuso la teoría de que el oxígeno en una sustancia química producía la acidez de la misma; puesto que, en aquella época, todas las sustancias con carácter ácido contenían oxígeno. Décadas después, Humphry Davy (1779-1829, ver Figura 6) encontró que esta regla no es general (20).
- En 1783 anunció que el agua está constituida por la combinación de hidrógeno y oxígeno, redescubriendo el resultado obtenido previamente por Henry Cavendish (1731-1810). Renombró el gas inflamable de Cavendish como hidrógeno (generador de agua en griego) (21).
- En colaboración con el gran matemático, físico y astrónomo Pierre-Simon Laplace (1749-1827) realizó experimentos en calorimetría, que sirvieron para determinar la energía desprendida en las reacciones químicas; incluyendo las reacciones en seres vivos

- Propuso que las reacciones que se producen en el organismo cuando se consume un alimento es del mismo tipo que la combustión del carbón (carbono puro), generando energía en forma de calor y dióxido de carbono (CO_2). También comprobó que el CO_2 se forma en la respiración, que propuso que era una combustión lenta. Por estos experimentos y propuestas, se le considera uno de los pioneros de la química fisiológica y de la ciencia de la nutrición.
- Probó que la composición química del carbón (el combustible usado en la época) y el diamante era la misma: carbono puro. Esto lo realizó quemando ambas sustancias, comprobando que se formaba la misma sustancia química (dióxido de carbono) y en la misma cantidad.
- En colaboración con otros científicos franceses elaboró un sistema de nomenclatura, que se publicó en el libro *Méthode de nomenclature chimique* (1787). Para Lavoisier era fundamental que la química tuviera un lenguaje preciso e inequívoco, que facilitase el intercambio de información. La mayoría de la nomenclatura de Lavoisier está aún en uso.
- De manera rigurosa, sistematizó todos los conceptos químicos conocidos en la época, lo que publicó en su libro *Traité Élémentaire de Chimie* (1789).
- Colaboró en la instauración del Sistema Métrico Decimal.

Los numerosos resultados alcanzados por Lavoisier le proporcionaron gran prestigio entre la comunidad científica. Sin embargo, su vida y trayectoria científica fueron trágicamente segadas como consecuencia de la Revolución Francesa, que lo condenó por sus actividades como recaudador de impuestos. Hubo multitud de ruegos para que se perdonara su vida en consideración a sus grandes aportaciones científicas; pero la respuesta de los jueces fue que la Revolución no necesitaba sabios.

Lavoisier fue decapitado el 8 de mayo de 1794. Fue una gran pérdida para la ciencia. El gran matemático Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) dijo «*bastó un instante para separar su cabeza del cuerpo, Francia no producirá otra cabeza igual en un siglo*».

13. LA APLICACIÓN DEL MÉTODO CIENTÍFICO. LA QUÍMICA DEL SIGLO XIX Y PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

Tras el trabajo de Lavoisier comienza una nueva etapa en química, basada en el método científico. En las primeras décadas del siglo XIX se establecen algunas de las leyes y conceptos fundamentales de la química (leyes ponderales, volumétricas, átomos, moléculas, ecuaciones de la cinética, la termoquímica, la electroquímica, fundamentos de la termodinámica, desarrollo de la tabla/sistema periódico, entre otros avances), así como las aplicaciones

prácticas (desarrollo de baterías y aplicaciones de la electroquímica, detergentes y productos de limpieza, potabilización de agua, metalurgia, colorantes y sustancias relacionadas, fármacos —especialmente antibióticos—, avances en la producción de alimentos, polímeros y plásticos para usos cotidianos y tecnológicos, entre otros).

Para no hacer demasiado prolijo este texto, en las Figuras 5-12 se resumen algunos de estos avances y sus protagonistas.



Figura 5. Algunos de los químicos más relevantes de comienzos del siglo XIX, citando algunas de sus contribuciones.



Figura 6. Volta, inventor de la pila (precursora de la batería). Davy y Berzelius aplicaron la electricidad proporcionada por las baterías para obtener numerosos metales muy reactivos. Faraday dedujo las leyes de la electroquímica.

Las necesidades de la industria química a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX

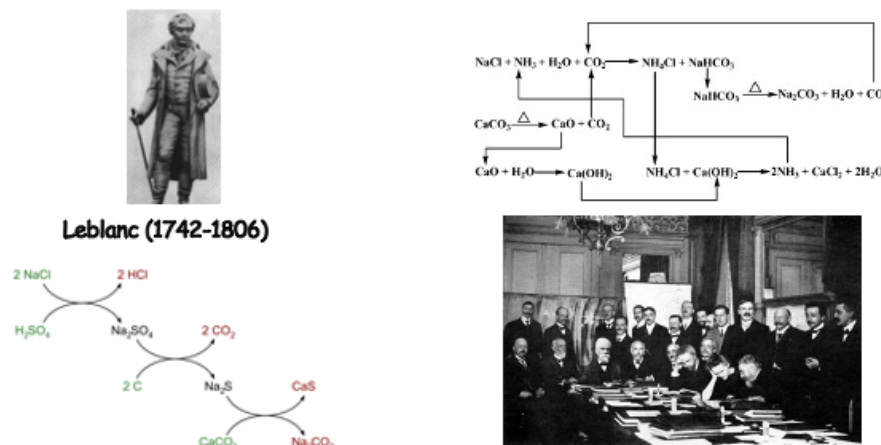


Figura 7. Esquema de las síntesis de la sosa (carbonato de sodio) desarrollada por Leblanc (izquierda) y Solvay (derecha).

Las necesidades de la industria química a finales del siglo XVII

Síntesis del ácido sulfúrico



Método de las cámaras de plomo (Roebuck, 1746)

Método de contacto (Phillips, 1831)

Metalurgia: electrolisis

Proceso Bessemer de fabricación de acero (1854)

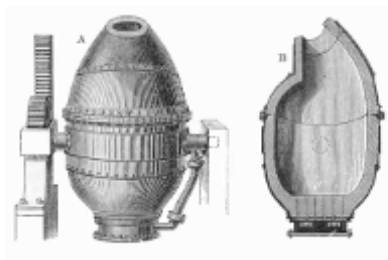


Figura 8. Algunas aplicaciones industriales de la química: la síntesis del ácido sulfúrico y procesos metalúrgicos.

Colorantes y síntesis orgánica. El origen de la industria química fina. El comienzo de la industria farmacéutica.



Figura 9. William Henry Perkin (1838-1907) sintetizó el primer colorante sintético (mauveína o malva de Perkin) cuando apenas tenía 18 años, trabajando en su casa durante las vacaciones de Pascua (1856). Este hallazgo fue el promotor de las investigaciones en la síntesis de compuestos naturales y no-naturales con utilidad práctica; siendo el origen de la industria química fina (los primeros productos de consumo fueron los colorantes y sustancias relacionadas) y, posteriormente, de la industria farmacéutica.

El comienzo de la industria farmacéutica. Primer agente quimioterapéutico.



Ehrlich (1854-1915)

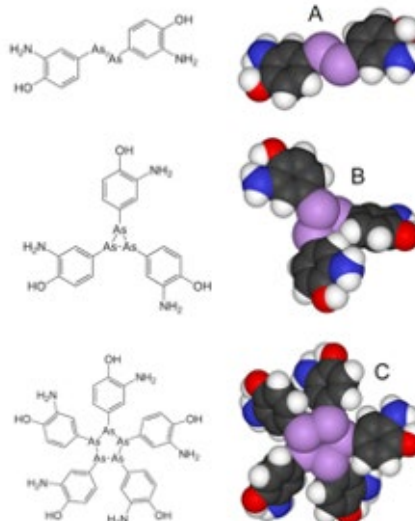


Figura 10. El primer agente quimioterapéutico fue el salvarsán (1910), desarrollado en el grupo de Paul Ehrlich (Premio Nobel de Medicina, 1908). Es un derivado orgánico del arsénico que, actualmente, se sabe que es una mezcla de tres compuestos.

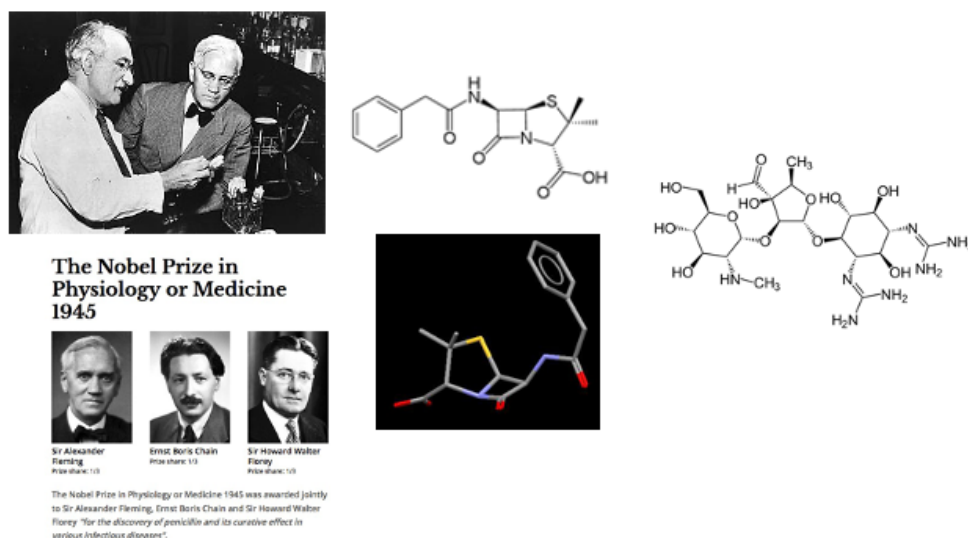


Figura 11. El descubrimiento de antibióticos, como las penicilinas y la estreptomicina, fueron enormes hitos científicos. En la figura se muestra a Alexander Fleming (1881-1951), descubridor fortuito de la penicilina (la estructura se muestra en las dos imágenes del centro) y Selman Waksman (1888-1973), director del grupo en el que se descubrió la estreptomicina (la estructura se muestra a la derecha). En la parte inferior se muestran las fotografías de Ernst Chain (1906-1979) y Howard Florey (1898-1968), que compartieron el Premio Nobel con Fleming, y cuyas investigaciones fueron fundamentales para aplicar las penicilinas en medicina.

EL PAPEL DE LA QUÍMICA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

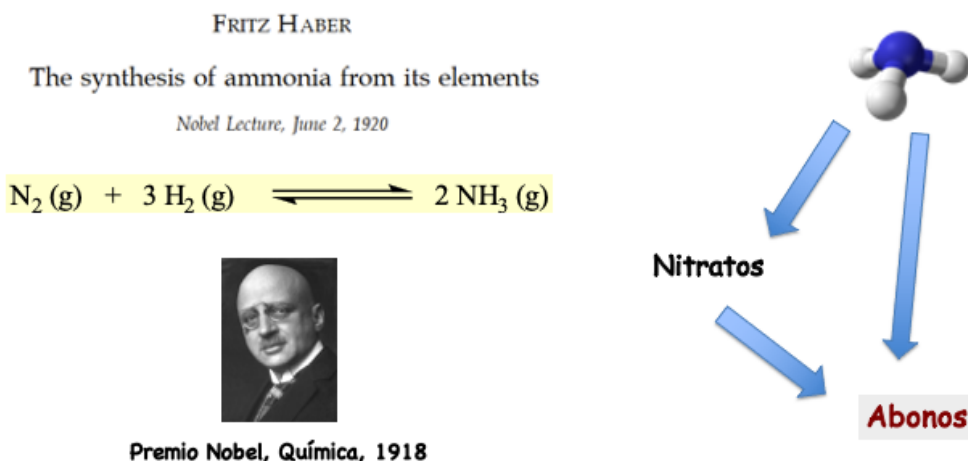


Figura 12. La producción de alimentos depende de que los campos de cultivo sean productivos. Un hito fundamental para conseguir este objetivo es la síntesis química del amoníaco, pues es el componente principal de los abonos y fertilizantes. Fritz Haber (1868-1934), basándose en aspectos fundamentales de la química (termodinámica, cinética y catálisis) desarrolló una síntesis eficiente del amoníaco a partir de sus elementos (el nitrógeno y el hidrógeno), que se implantó a escala industrial. La producción de alimentos, el desarrollo de antibióticos (Figura 11), la potabilización de agua (Figura 5) y las vacunas (Figura 3) son las cuatro actividades que más vidas han salvado en la historia de la humanidad.

14. LA CIENCIA DEL FUTURO

Los objetivos de los científicos del futuro son los mismos que los actuales: satisfacer las necesidades de la sociedad, lo que se traduce en retos en estas cinco áreas: salud (biomedicina), alimentación (incluyendo el agua), energía, medio ambiente, y materiales (tecnológicos/ingenieriles).

Además, considero que la ciencia del futuro también tiene que ser social, en el sentido de que el progreso científico tiene que contribuir a disminuir las barreras entre el bienestar de los seres humanos.

En mi grupo de investigación trabajamos en diversos aspectos relacionados con estos retos: compuestos biológicamente activos —potencialmente útiles en salud humana—, toxicología —aplicable a la protección medioambiental— y materiales para el almacenamiento de la energía —aspectos tecnológicos relacionados con la gestión de la energía.

15. INVESTIGACIONES EN QUÍMICA ORGÁNICA: GRUPO PEPARO

El nombre de mi grupo es PEPARO, que es un acrónimo de péptido + aromático. Estos dos tipos de moléculas son muy abundantes en la naturaleza y son, también, algunos de los compuestos químicos más utilizados en las múltiples aplicaciones de la química orgánica: desde compuestos bioactivos a materiales tecnológicos; incluyendo moléculas pequeñas y macromoléculas (ácidos nucleicos y proteínas) fundamentales para la vida

La investigación en el grupo PEPARO ha abarcado un amplio rango de temas en química y áreas relacionadas, incluyendo la síntesis orgánica, uso de biocatalizadores en química orgánica, transposiciones sigmatrópicas, heterociclos, nucleósidos, carbohidratos, productos naturales, compuestos bioactivos, péptidos, estructura e interacciones de compuestos aromáticos y péptidos, toxicología computacional, materiales nanoestructurados (preparación, caracterización y propiedades), diseño y preparación de líquidos iónicos para electrolitos de baterías y condensadores, y materiales *composites* derivados de grafeno.

16. INVESTIGACIÓN EN IMPACTO MEDIOAMBIENTAL Y TOXICOLOGÍA MOLECULAR DE SUSTANCIAS QUÍMICAS

En esta línea de investigación se ha estudiado el efecto que los compuestos aromáticos, heterociclos y compuestos halogenados tienen sobre el receptor de hidrocarburos aromáticos (AhR), del receptor de estrógenos (ER) y de los citocromos P450 1A (Figura 13) (22).

La metodología de la investigación incluye métodos basados en mecánica molecular (búsquedas conformacionales con diferentes algoritmos, simulaciones de dinámicas moleculares, etc.) y en química cuántica (métodos *ab initio* basados en la función de onda, en el funcional de la densidad, e híbridos). Los aspectos estudiados son la geometría (estática y dinámica), propiedades electrostáticas (potencial electrostático molecular — MEP—, polarizabilidades, momentos electrostáticos), electrónicas (energía y forma de los orbitales moleculares), índices de aromaticidad, índices de reactividad, estudios de similitud molecular y de relaciones estructura-actividad. También estudiamos las interacciones con compuestos modelos relacionados con las biomacromoléculas diana. El objetivo de esta investigación es profundizar en los factores responsables de la toxicidad de compuestos orgánicos, que pueden servir como remedios paliativos de sus efectos y/o avanzar en el diseño de compuestos con actividad farmacológica. Los resultados computacionales los completamos con estudios experimentales de actividad biológica realizados en el grupo del Dr. José María Navas (INIA).

Impacto medioambiental de sustancias químicas. Toxicología de compuestos orgánicos: Aproximación experimental/computacional.

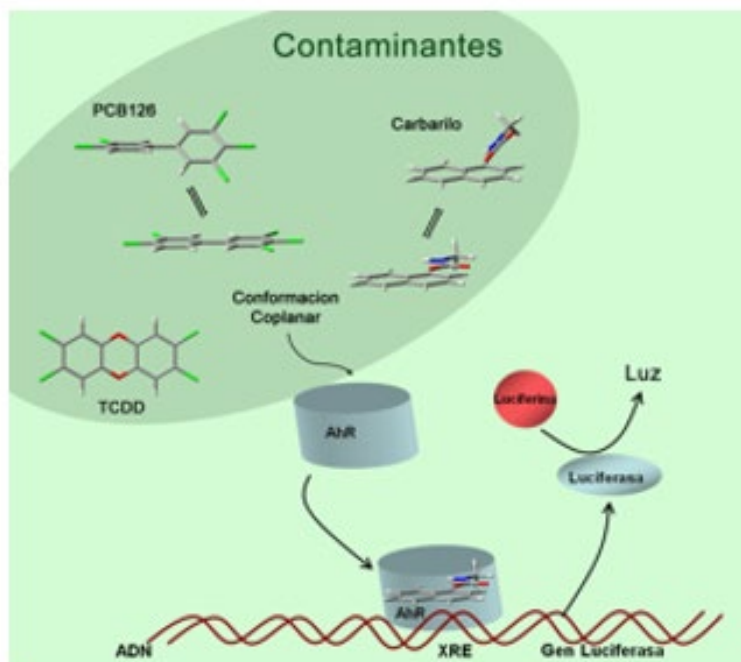


Figura 13. Esquema de investigación en el impacto medioambiental y toxicología molecular de sustancias químicas.

17. INVESTIGACIÓN EN BIOMEDICINA: INHIBIDORES DE CALPAÍNA

Las calpaínas son una familia de enzimas ubicuas en todos los organismos y en todos los tejidos de los mamíferos. Tienen un papel metabólico muy activo, catalizando la hidrólisis de una variedad de proteínas importantes en numerosos procesos fisiológicos. La sobreactivación de las calpaínas está implicada en numerosas enfermedades degenerativas (Alzheimer, Parkinson, ictus, isquemia cerebral, diabetes, cataratas, etc.) y su inhibición puede ser útil en el tratamiento de estas enfermedades, así como herramienta en el estudio de ciertos procesos fisiológicos (23).

Nuestro grupo es el más activo de España en el estudio de la inhibición de esta familia de enzimas. La aportación de nuestro grupo al área de inhibidores de calpaína se puede resumir en que hemos preparado y ensayado muchos inhibidores de calpaína (más de 500), con diversas estructuras (biarilos, heterociclos, carbohidratos y los híbridos péptido-molde relacionados), obteniendo inhibidores muy potentes con valores de IC_{50} en el rango nanomolar y picomolar. Las estructuras de algunos de estos inhibidores, con los valores de IC_{50} , se muestra en las Figuras 14 y 15.

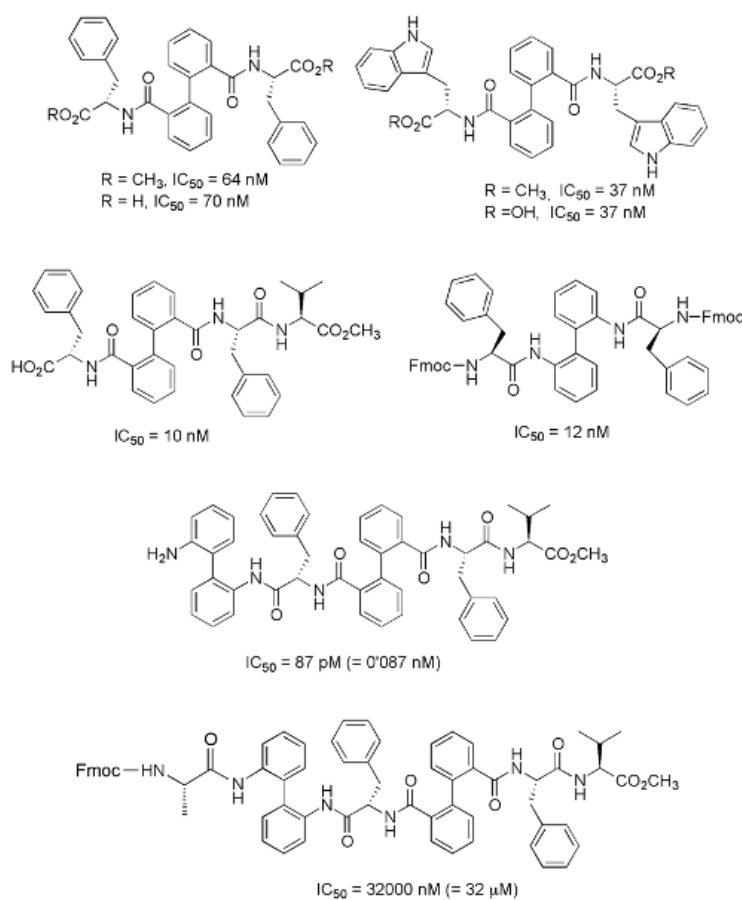


Figura 14. Híbridos péptido-bifenilos inhibidores de calpaína (24).

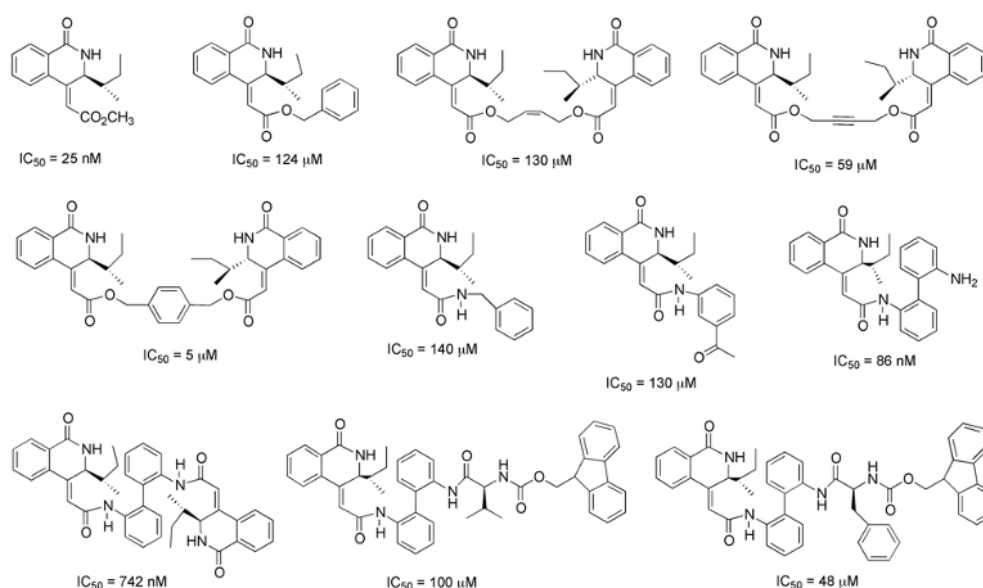


Figura 15. Derivados de isoquinolina inhibidores de calpaína (25).

18. LA GESTIÓN DE LA ENERGÍA: BATERÍAS RECARGABLES (SECUNDARIAS)

Uno de los aspectos más preocupantes de la sociedad actual es el cambio climático. Éste está ligado al excesivo consumo de energía, especialmente la derivada de materias primas de origen fósil (carbón, petróleo y sus derivados, y gas natural) que generan gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, pero también óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno) cuando se usan como combustibles. Además, estas materias primas son valiosas pues proporcionan numerosas sustancias químicas con la que se fabrican millones de materiales que hacen nuestra vida más cómoda.

La solución para reducir los gases de efecto invernadero y evitar el consumo de estas valiosas materias sería recurrir a fuentes de energías renovables (solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, etc.). Una característica de esta estrategia es que la generación de energía de fuentes renovables es intermitente y los picos de máxima producción pueden no coincidir con los de máxima demanda. Por lo tanto, hay que almacenar la energía producida para usarla cuando sea necesario.

La manera más eficiente de almacenar energía es usando dispositivos electroquímicos, especialmente pilas y baterías; cuyo fundamento científico son las reacciones de oxidación-reducción (reacciones redox) en las que se produce un intercambio de electrones entre el reductor (que cede electrones, oxidándose) y el oxidante (que capta electrones, reduciéndose). En estas reacciones se forman iones (especies químicas con carga, positiva o negativa). La especie reductora forma el ánodo y la oxidante, el cátodo. El ánodo y el cátodo

son los electrodos, que están separados por el electrolito (el tercer componente principal de una pila). En una pila, los dos electrodos están separados físicamente y conectados externamente con un cable conductor de electricidad. De esta manera, la energía generada en la reacción lo hace en forma de electricidad, que se puede utilizar para hacer funcionar un aparato eléctrico. La combinación de los dos electrodos y el electrolito (junto a otros componentes, como los colectores de corriente y los separadores) constituyen una célula electroquímica; cuyo voltaje depende de la energía de Gibbs del proceso redox.

Aunque podemos usar los términos pila y batería como sinónimos, no son exactamente lo mismo. Una pila es un dispositivo en el que hay solo una célula electroquímica. En una batería hay varias celdas, conectadas en serie (sumando los voltajes) o en paralelo (aumentando la intensidad de corriente, el amperaje). En general, es preferible el término batería.

La energía disponible (y de electricidad) de una batería depende de la cantidad y propiedades del material del ánodo. Si la batería es no-recargable (primaria), una vez que éste se ha consumido, la batería deja de funcionar.

Para solventar el problema del almacenamiento de electricidad es necesario el uso de baterías recargables, en las que el componente electroactivo del ánodo se gasta en el proceso de descarga y se regenera en el proceso de carga (Figura 16).

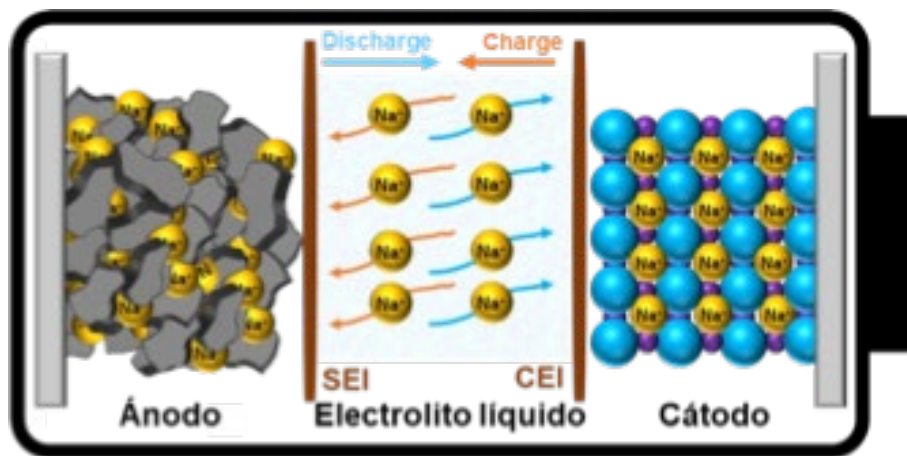


Figura 16. Representación esquemática de una batería recargable de ion sodio.

19. MATERIALES PARA BATERÍAS RECARGABLES DE ION LITIO, ION SODIO E ION POTASIO

El desarrollo y comercialización de las baterías recargables de ion litio desde comienzos de 1990s fue un hito científico-tecnológico que ha impactado positivamente en nuestras vidas con infinidad de aplicaciones; especialmente en equipamiento móvil.

Sin embargo, el uso de litio como material activo no está exento de problemas; que, principalmente, proceden de su escasez y que se encuentra en zonas del planeta que están gestionadas por muy pocos países. Estos factores inciden negativamente en el precio y en la disponibilidad de los compuestos de litio. Para el futuro próximo necesitaremos el almacenamiento masivo de electricidad, usando baterías recargables con gran cantidad de material activo de electrodos. Debido a los inconvenientes planteados por la disponibilidad de litio se deben buscar metales más abundantes y baratas.

Las alternativas al litio son el sodio y el potasio, también metales alcalinos, con propiedades químicas similares. Aunque mucho del conocimiento adquirido en las baterías basadas en litio se puede usar para las baterías de sodio y potasio, hay que refinar algunos aspectos, como son: los materiales para electrodos, eficacia y seguridad de los electrolitos, voltaje y capacidad (cantidad de electricidad disponible), tiempo y eficiencia de las etapas de carga/descarga, entre otros factores.

Nuestra investigación en este campo empezó con las baterías de ion litio, pero en los últimos años, hemos investigado diversos aspectos en baterías de ion sodio e ion potasio (26).

Algunas de nuestras investigaciones recientes son las siguientes:

- Nuevos electrolitos para baterías de ión litio. Hemos sintetizado una amplia variedad de líquidos iónicos derivados de imidazolio, tiazolio, pirrolidinio, trialkilfosfonio y tetraalkilamonio, que se han usado como componentes de electrolitos en baterías de ion litio. En general, este tipo de compuestos son más seguros que los disolventes (carbonatos de dialquilo y éteres) usados más frecuentemente. Se han determinado las propiedades electroquímicas (conductividad iónica, estabilidad electroquímica, ciclabilidad, entre otras) y químico-físicas (viscosidad y estabilidad térmica) de estos compuestos (27).
- Aplicación de líquidos iónicos en baterías de ion sodio. Hemos aplicado nuestro conocimiento en líquidos iónicos para obtener electrolitos seguros y eficaces de baterías de ion litio.
- Aplicación de eutectoides en electroquímica. Hemos preparado, estudiado estructuralmente, caracterizado térmicamente y determinado las propiedades electroquímicas (como electrolitos para baterías de ion sodio) de mezclas eutectoides de sales de sodio y tetraalkilureas.
- Generación de materiales sólidos y cuasi-sólidos como electrolitos para baterías de ión litio y baterías de ion sodio. Hemos obtenido geles a partir del copolímero poly(fluoruro de vinilideno-hexafluoropropileno) [P(VDF-HFP)] con líquidos iónicos derivados de sales de tiazolio y de imidazolio, los cuales se han empleado en baterías de ion litio.

También se han preparado geles a partir de este polímero y mezclas eutéctoides de tetraalquileas y sales de sodio, los cuales se han empleado en baterías de ion sodio.

- Desarrollo de materiales de cátodo para baterías de ion sodio. Hemos encontrado que el dopaje de óxidos laminares de manganeso (conteniendo níquel y sodio) dopados con una pequeña cantidad de magnesio son excelentes materiales para preparar cátodos para baterías de ion sodio.
- Aplicaciones electroquímicas de derivados del ácido 9-oxo-fluoren-4-carboxílico. Hemos realizado la síntesis, el estudio estructural (en disolución y en fase sólida) y el rendimiento electroquímico de varios compuestos de este tipo, que prometen ser útiles en el desarrollo de electrodos para baterías de ion sodio e ion potasio.
- Iminas aromáticas con grupos carboxilo. Hemos preparado una serie de iminas aromáticas con grupos carboxilo como sustituyentes, que prometen ser materiales eficientes para la preparación de ánodos en baterías de ion sodio e ion potasio.

20. CONFERENCIA DE TOMA DE POSESIÓN

Esta es una versión ampliada de la conferencia de toma de posesión de la plaza de Académico Correspondiente en la RADE, impartida el 24 de abril de 2024. El video de la sesión (24 de abril de 2024) se puede ver en esta referencia (28).

21. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a los académicos de la RADE por permitirme formar parte de esta importante institución; especialmente al Dr. José María Teijón y a la Dra. Mónica De la Fuente que propusieron mi candidatura y a la Dra. Carmen Clemente que fue la primera persona que me puso en contacto con la RADE. Se agradece el apoyo financiero de la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia) a través de los proyectos *Dispositivos de almacenamiento eléctrico guiados por aspectos medioambiental: de los materiales a prototipos de baterías de ion-sodio* (RTI2018-095425-B-I00) y *Baterías avanzadas y sostenibles de ion sodio e ion potasio de estado sólido* (PID2021-127864OB-I00).

22.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. <https://www.rade.es/>. Visitada el 14 de enero de 2025.
2. <https://www.rade.es/academico.php?item=1471>. Visitada el 14 de enero de 2025.

3. A. Moreno González. José Rodríguez Carracido. Biblioteca de la Ciencia Española. 1991. ISBN: 84-86884-83-7.
4. <https://tribuna.ucm.es/news/exposicion-ciencia-ante-einstein-y-la-relatividad-quimicas-ucm>. Visitada el 14 de enero de 2025.
5. F. Giral. Ciencia española en el exilio (1939-1989). El exilio de los científicos españoles. Anthropos. 1994. ISBN: 84-7658-442-3.
6. P. Bosch Giral. Giral, paleta de mil colores. En *Protagonistas de la Química en España: Los orígenes de la catálisis*, 187-222. P. Bosch Giral, J. F. García de la Banda, J. Pérez Pariente y M. Toural Quiroga (editores). Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2010. ISBN: 978-84-00-09196-5.
7. M. Lora-Tamayo. Lo que he conocido. Recuerdos de un viejo catedrático que fue ministro. Federico Joly y Cia-Ingrasa. 1993. ISBN: 84-604-8191-3.
8. B. Herradón García. La química orgánica en la JAE y en los primeros años del CSIC: de Rodríguez Carracido a Lora Tamayo. En *Ciencia y Técnica en la Universidad. Trabajos de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*. Volumen I, 199-211. D. Ruiz-Berdún (editor). Universidad de Alcalá, servicio de publicaciones. 2018, ISBN: 978-84-16978-80-9.
9. B. Herradón García. Los avances de la química. Libros de la Catarata-CSIC. 2011. ISBN: 978-84-8319-647-2.
10. S. Brin, L. Page. The Anatomy of a Large-Scale Hypertextual Web Search Engine. Seventh International World-Wide Web Conference (WWW 1998). <http://infolab.stanford.edu/pub/papers/google.pdf>. Visitada el 14 de enero de 2025.
11. B. Herradón. Apuntes sobre las vacunas contra la covid-19. *Enlace de los químicos de Madrid. Revista del Colegio y Asociación de Químicos de Madrid* 2021, #45, 16-17 (ISSN: 2174-4653).
12. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2023/summary/>. Visitada el 14 de enero de 2025.
13. B. Herradón. A Hombros de Gigantes (una biografía de Isaac Newton). *Principia* 2015, episodio 1, 42-51.
14. T. S. Kuhn. The Structure of Scientific Revolutions. Chicago University Press. 1962. ISBN: 9780226458113.
15. Aristóteles. Metafísica. Editorial Austral. 2003. ISBN: 84-239-0399-0.
16. B. Herradón. Robert Boyle, el último alquimista. Publicada el 25 de enero de 2023. <https://principia.io/2023/01/25/robert-boyle-el-ultimo-alquimista.IjE2NDMi/>. Visitada el 14 de enero de 2025.

17. B. Herradón. Conmemoración científica del día: nacimiento de Carl Wilhem Scheele (1742-1786). Publicado el 9 de diciembre de 2024.
<https://educacionquimica.wordpress.com/2024/12/09/conmemoracion-cientifica-del-dia-nacimiento-de-carl-wilhem-scheele-1742-1786/>. Visitada el 14 de enero de 2025.
18. B. Herradón. Píldora química del 13 de marzo: Priestley. Publicado el 13 de marzo de 2015. <https://educacionquimica.wordpress.com/2015/03/13/pildora-quimica-del-13-de-marzo-priestley/>. Visitada el 14 de enero de 2025.
19. B. Herradón. Conmemoración científica del 26 de agosto: 279 años del nacimiento de Lavoisier. Publicado el 26 de agosto de 2022.
<https://educacionquimica.wordpress.com/2022/08/26/conmemoracion-cientifica-del-26-de-agosto-279-anos-del-nacimiento-de-lavoisier/>. Visitada el 14 de enero de 2025.
20. B. Herradón. El día que Humphry Davy corrigió (dos veces) a Antoine Lavoisier. Publicado el 21 de febrero de 2023. <https://principia.io/2023/02/21/el-dia-que-humphry-davy-corrigio-dos-veces-antoine-lavoisier.ljE2NTUi/>. Visitada el 14 de enero de 2025.
21. B. Herradón. Elementos químicos: el hidrógeno. Publicado el 3 de mayo de 2016.
<https://educacionquimica.wordpress.com/2016/05/03/elementos-quimicos-el-hidrogeno-2/>. Visitada el 14 de enero de 2025.
22. L. Fernández-Cruz, A. Valdehita, M. Alonso, E. Mann, B. Herradón, J. M. Navas. Biological and chemical studies on aryl hydrocarbon receptor induction by the p53 inhibitor pifithrin- α and its condensation product pifithrin- β . M. *Life Science* 2011, 88, 774-783. DOI: [10.1016/j.lfs.2011.02.019](https://doi.org/10.1016/j.lfs.2011.02.019).
23. B. Herradón. Química y biomedicina. Búsqueda de inhibidores de calpaína, una proteasa con múltiples actividades. *Acta Científica y Tecnológica* 2018, 9-17.
24. A. Montero, F. Albericio, M. Royo, B. Herradón. Solid-Phase Combinatorial Synthesis of Peptide-Biphenyl Hybrids as Calpain Inhibitors. *Org. Lett.* 2004, 6, 4089-4092. DOI: 10.1021/ol048216j.
25. M. Alonso, R. Chicharro, C. Miranda, V. J. Arán, M. A. Maestro, B. Herradón. X-Ray Diffraction, Solution Structure, and Computational Studies on Derivatives of (3-sec-Butyl-2,3-dihydro-1H-isoquinolin-4-ylidene) acetic Acid: Compounds with Activity as Calpain Inhibitors. *J. Org. Chem.* 2010, 75, 342-352. DOI: 10.1021/jo902091u.
26. C. Santamaría, E. Morales, J. M. Amarilla, B. Herradón. Electrolytes from Alkoxyalkyl-substituted Imidazolium ionic liquids. Synthesis, characterization, properties and cell performance in LiFePO₄ half-cells. *Electrochimica Acta* 2024, 507, 145096. DOI: 10.1016/j.electacta.2024.145096.

27. C. Santamaría, B. Herradón. Aspectos históricos y sociales de las baterías y los líquidos iónicos. *Revista de Plásticos Modernos* 2021, 121, 27-34.
<https://digital.csic.es/handle/10261/264758>.
28. <https://www.rade.es/pagina.php?item=1577#video>. Visitada el 14 de enero de 2025.