



Filosofía de la química II. Sobre el estilo de pensamiento de las prácticas químicas

Philosophy of chemistry II. About the thinking style of chemical practices

José Antonio Chamizo¹

Resumen

Utilizando como ejemplo las investigaciones que fueron galardonadas con los Premios Nobel de Fisiología, Física y Química en el año 2022, se caracterizan y discuten las prácticas químicas que han establecido un estilo de pensamiento, convirtiéndolas así en omnipresentes y al mismo tiempo invisibles para la mayoría de los científicos y de la sociedad en general. Dicho estilo de pensamiento, partiendo del método propio de las prácticas químicas (análisis y síntesis), se resume en las palabras: conocer haciendo.

Palabras clave

Prácticas químicas, Premios Nobel 2022, estilos de pensamiento, análisis y síntesis, conocer haciendo.

Abstract

Using as an example the investigations, which were awarded the Nobel Prizes for Physiology, Physics and Chemistry in 2022, the chemical practices are characterized and discussed. They have established a style of thought that make them omnipresent, and at the same time invisible, for most scientists and society in general. On the basis of the own method of chemical practices (analysis and synthesis), such a style is summarized in the words: knowing by doing.

Keywords

Chemical practices, 2022' Nobel Prizes, styles of thinking, analysis and synthesis, learning by doing.

¹ Facultad de Química-Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM.

Introducción

Inventando una historia, haciendo moléculas.
R. Hoffmann (2005)

En el presente artículo se defiende que desde el establecimiento de la química como una disciplina independiente (Chamizo, 2022), las prácticas químicas han establecido un estilo de pensamiento que las vuelve omnipresentes y al mismo tiempo invisibles para la mayoría de los científicos y de la sociedad en general, como se ejemplifica con el otorgamiento de los Premios Nobel de Fisiología, Física y Química de 2022. Esta paradoja es sostenida por las propias comunidades de químicas y químicos, de ingenieras químicas e ingenieros químicas, de bioquímicas y bioquímicos, de farmacéuticas y farmacéuticos, de profesoras y profesores de química en el bachillerato o en la licenciatura. En general nos interesa, trabajamos, enseñamos un asunto, aquel relacionado con el estilo de pensamiento de las comunidades químicas, pero decimos que es otro...

Las prácticas químicas y su estilo de pensamiento

Porque la química no tiene un territorio definido. A lo largo de su larga historia, se pueden rastrear los trabajos de los químicos en los talleres de artesanos y boticarios, en las facultades de medicina y las oficinas de las compañías mineras, en la agricultura y la industria, y hoy continúan trabajando en diversos dominios como la ciencia ambiental y la nanotecnología. La química cruza las fronteras entre lo vivo y lo no vivo, los cielos y la tierra y, particularmente hoy, lo macroscópico y lo microscópico. La química está en todas partes y en ninguna a la vez.

B. Bensaude-Vincent (2009, p. 366)

Actualmente, se reconoce que las comunidades científicas y tecnológicas son comunidades de prácticas, entendiendo por práctica la serie de actividades coordinadas y compartidas (procedimientos, propósitos, creencias) que se disciplinan mediante el cambio de normas o procedimientos "correctos" en el interior de una determinada comunidad, que es la que identifica y corrige los "errores" (Martínez y Huang, 2015). Así, una práctica tiene una estructura estable con capacidad de reproducirse a través de diferentes procesos de aprendizaje. Una práctica específica da por sentado conocer otras prácticas diferentes y, más en general, una serie de presupuestos culturales que permiten distinguir una práctica de otra (Olivé, 2008). La química fue la primera, de entre todas las demás ciencias, en dotarse de un laboratorio. Tanto entonces como ahora, el laboratorio sigue siendo el lugar privilegiado de práctica donde los químicos producen tanto modelo como sustancias (Morris, 2016). Las comunidades de prácticas químicas, herederas de milenarios oficios artesanales, son experimentales y crecieron con la incorporación de nuevos instrumentos que dieron lugar posteriormente a nuevas subdisciplinas (Chamizo, 2014; 2017; 2017a).

Se puede identificar el inicio de la química como una disciplina independiente cuando el holandés H. Boerhaave publicó el libro *Elementa Chemiae*, en 1732, y con ello consolidó, por primera vez, la enseñanza de la química en la Universidad de Leiden. Desde

luego, antes de esta fecha no se enseñaba química en las universidades y menos en un laboratorio específicamente dedicado para ello. Previamente a la invención, construcción o consolidación de la química, esta consistía en una serie de prácticas artesanales cuyos practicantes seguían recetas (que era lo que publicaban) con muy limitado, si lo tenían, contenido teórico. *Elementa Chemiae* introdujo una didáctica específica para la química incorporando las ideas mecanicistas de R. Boyle. Tuvo más de cuarenta ediciones, además de las traducciones al latín, inglés, francés, alemán y ruso. Dejó de imprimirse en 1791. Con Boerhaave la química se volvió una actividad académica respetable y transmisible a través de libros de texto. Uno de los lectores de *Elementa Chemiae*, médico como Boerhaave, fue el escocés J. Black, quien perfeccionó la balanza analítica, estudió el calor y aisló, en 1754, el dióxido de carbono a partir del carbonato de magnesio en la que pudo reconocerse como la primera reacción química cuantitativa:

Sin embargo, el mayor impacto de la química didáctica fue su capacidad para transmitir el conocimiento químico más allá del círculo de los químicos artesanales. Los mismos principios pedagógicos que hicieron que la química didáctica fuera atractiva para los químicos novatos consiguieron hacerla accesible a los no químicos. A mediados del siglo XVII, la audiencia de la química didáctica se había expandido para incluir médicos, filósofos naturales, escritores, artistas, mecánicos y sabios caballeros (Powers, 2016, p. 43).

En el periodo que va de 1732 a 1818, en Europa, la química surgió como ciencia independiente, con sólidas prácticas compartidas: didácticas, industriales y académicas. En el periodo mencionado, la producción industrial de ácido sulfúrico mediante el proceso de las cámaras de plomo fue patentada por J. Roebuck y S. Garbett. El aceite de vitriolo, conocido hoy como ácido sulfúrico, se convirtió en un producto químico muy importante, y su producción nacional se utilizó posteriormente como un buen indicador de la fuerza industrial de cada país. Además, N. LeBlanc patentó el método para la producción a gran escala de carbonato de sodio, utilizando ácido sulfúrico y cloruro de sodio, entre otros reactivos. El carbonato de sodio se utilizó principalmente en la fabricación de jabones, vidrio y papel. La producción de cientos de toneladas de las sustancias patentadas al año significó el comienzo de la química industrial, y con ella la búsqueda de soluciones para remediar su impacto en el medio ambiente. A pesar de que muchas de las actividades experimentales poco cambiaron, la incorporación y el perfeccionamiento de instrumentos utilizados ampliamente por A. Lavoisier, como la balanza y el calorímetro, su enunciación de la ley de conservación de la materia, su empeño en establecer un nuevo lenguaje para la química (Crosland, 1978), su propuesta de poco más de una treintena de elementos, además de las importantes aportaciones de A. Volta, J. Dalton y J.J. Berzelius, marcaron el inicio de la química tal y como hoy la conocemos.

Desde su consolidación e independencia, las prácticas estabilizadas de la química han sufrido cuatro grandes transformaciones (Chamizo, 2022) caracterizadas por la apropiación de nuevos objetos epistémicos o “entidades ocultas” que siguen utilizándose hoy en día y que le proporcionan una continuidad ontológica, como los átomos, las moléculas, los electrones, los iones o las nanopartículas. Lo anterior acompañado por el surgimiento de nuevas subdisciplinas como la química orgánica, la físicoquímica, la química instrumental, la biología molecular, la química organometálica, o la nanoquímica, entre otras.

A través de sus actividades de laboratorio, tanto académicas como industriales, centradas en el análisis y la síntesis, los químicos desarrollaron una forma específica

de pensar y adquirieron puntos de vista específicos sobre la transformación de las sustancias, en lo que puede reconocerse como "una manera de conocer" tecnocientífica. Es decir, los hechos emanados de los pequeños laboratorios de investigación, amplificadas enormemente a través de los procesos industriales, han transformado la faz del planeta. Así, estamos hablando de pluralismo (Chang, 2012). Tanto en las prácticas químicas de ayer como en las de hoy, al aceptar el pluralismo de propósitos, que para unos consiste en sintetizar una nueva sustancia, para otros en producirla en grandes cantidades, y aun para otros verificar que no contamina el medio ambiente, se rechaza la idea propia del monismo identificado con un único método científico.

Las prácticas químicas consideran un saber tácito (Polanyi, 1966) aquel que no puede expresarse en palabras, propio de diferentes actividades de investigación, y que poco a poco se ha ido reconociendo como fundamental en la filosofía de las ciencias experimentales. En su variante científica, pero más aún en la tecnológica e industrial, las prácticas químicas apelan al pragmatismo.

Las prácticas de la química son generalmente diferentes de las prácticas de la física. El químico y filósofo italiano L. Cerruti (1998) lo indicó así: *los fenómenos son generalmente aceptados y discutidos filosóficamente como los objetivos y el resultado de la experimentación en física; en general, las sustancias son los objetivos y los resultados de las prácticas experimentales más importantes de la química*. Es decir, las prácticas químicas, aquellas que tienen que ver fundamentalmente con las sustancias, tienen su propio método: análisis y síntesis, muchas veces en una combinación dialéctica. Las comunidades de físicos y químicos tienen prácticas y ambiciones diferentes. Hay que decirlo de nuevo, a diferencia del ideal del universalismo y la búsqueda de una única verdad (defendida por los físicos), la metodología de la química proporciona un tipo de conocimiento tácito y pragmático, que comparten la mayoría de las ciencias de laboratorio experimentales. Resuelven o intentan hacerlo, problemas. Una práctica no es mejor que otra. Si por ejemplo la mecánica cuántica se reconociera equivocada, los químicos seguirían sintetizando nuevas sustancias, como ya lo hacían antes de su surgimiento. Así lo indicó el ganador del Premio Nobel de química (1982) R. Hoffmann, por sus investigaciones en química cuántica en el epígrafe que inicia el presente artículo.

El análisis de las sustancias, asociado permanentemente al concepto de pureza, ha sido una obsesión para los practicantes de la química. Toda vez que las sustancias "naturales" no son puras, la separación de las partes que las constituyen, el aislamiento de lo que se quiere, ha sido una constante de las prácticas químicas, incluso desde que estas eran alquímicas. Una buena parte de la historia de la química se centra en el estudio de las técnicas de separación y purificación. Hoy queda claro que no hay tal cosa como sustancias puras. Lo que hay es un modelo de sustancia pura (Chamizo, 2013a; Fernández, 2013) que se ha venido construyendo en la interfase de la tecnoquímica (Chamizo, 2013b) a lo largo de los años. A lo que tenemos acceso directo es a una sustancia predominante, mezclada en cantidades menores, o muy menores, con otras sustancias diferentes. La pureza depende de nuestra posibilidad técnica de identificar impurezas. Diferentes técnicas indican diferentes niveles de pureza. Por ello, generalmente cuando se indica la pureza se menciona la técnica de análisis a través de la cual se ha reconocido. Además, hay que identificar, cuando se sabe, el tiempo de existencia de dicha sustancia. Con la incorporación de nuevos instrumentos pudieron medirse reacciones cada vez más rápidas y poco a poco se abandonó el concepto clásico y limitado de sustancia química por el más amplio de especie química (Chamizo,

2017). Al pasar de las sustancias a las especies químicas, el campo de estudio de la química creció y se complicó de manera considerable. Los mecanismos de reacción que tanto éxito tenían en la química orgánica y que se desarrollaron a partir de la primera transformación química (mecanismos que descomponían una reacción en una serie de rápidas reacciones sucesivas, considerando la existencia de varios intermediarios), pudieron estudiarse. Muchos de esos intermediarios, como los radicales, no eran otra cosa que especies químicas. Ante esta situación, el filósofo de la química belga J. van Brakel, al reconocer la fragilidad de la definición de sustancia por ignorar su dimensión temporal, agregó: *quizás debemos limitar la noción de sustancia a lo que puede existir independientemente en botellas* (van Brakel, 2012, p. 222). Los avances experimentales particulares de determinada práctica van redefiniendo la pureza y con ello el propio conocimiento químico, asunto que tiene particular importancia cuando nos referimos a sustancias potencialmente tóxicas, por ellas mismas o por los productos de su descomposición.

La síntesis química parece imparable. El número de sustancias y de aplicaciones comerciales de las mismas ha crecido de manera impresionante a lo largo de los últimos 200 años. Se ha pasado de unas centenas a principios del siglo XIX a más de 190 millones de sustancias diferentes en la actualidad, la mayoría de las cuales se comercializan, se usan y después muchas de ellas se desechan. Ya desde la Primera Transformación Química, en el siglo XIX, cuando M. Berthelot enunció su famosa frase: *la química crea su objeto*, se empezó a considerar cuántas sustancias, particularmente orgánicas, era posible sintetizar. Eso es lo que hoy se conoce como espacio químico, es decir, todas las posibles sustancias que a partir de los conocimientos de determinado momento histórico se pueden sintetizar. Así, en 2012 se enumeraron 166 mil millones de moléculas de hasta 17 átomos de C, N, O, S y halógenos, cubriendo un rango de tamaño que contiene muchas sustancias con propiedades medicinales (Ruddigkeit, 2012).

Hay una amplia discusión sobre las maneras de pensar, las maneras de conocer o los estilos de pensamiento científicos (Fleck, 1986; Crombie, 1995, 2000; Pickstone, 2000; Hacking, 2002; Bensaude-Vincent, 2009; Kwa, 2011). En todos ellos se clasifican diferentes formas de construir y practicar las disciplinas científicas, incluyendo a las matemáticas y las tecnologías. L. Fleck discute la reacción de Waseermann en el “establecimiento” de la sífilis, A. Crombie precisa el concepto de estilo y lo aplica a la historia de las ciencias europeas, J. Pickstone, I. Hacking y C. Kwa identifican maneras específicas que corresponden a las disciplinas experimentales, ejemplificando con la química e inclusive con la tecnociencia, pero es particularmente el artículo de la historiadora y filósofa de la química B. Bensaude-Vincent el fundamental (2009, p.370-71):

Así, la química se desarrolló en el laboratorio, y este nicho determinó una forma específica de conocer con tres rasgos distintivos.

- *En primer lugar, los químicos intentan conocer las sustancias naturales, transformándolas mediante manipulaciones y operaciones físicas, accediendo a la naturaleza a través de un desvío por el laboratorio. Esto no significa simplemente que ellos, como los físicos experimentales, utilicen la mediación de instrumentos para comprender los fenómenos naturales. Más bien, dan por sentado que sólo los productos artificiales hechos por el hombre brindan información sobre las sustancias naturales. Para conocer la naturaleza y propiedades de las sustancias, los químicos proceden por análisis y síntesis.*

- ... En segundo lugar, la práctica de la química es tanto una actividad física como un ejercicio mental. J. B. Van Helmont solía decir que "Dios vende las artes a cambio de sudor", lo que significaba que el conocimiento de la naturaleza sólo se obtenía a costa de arduos experimentos.
- En tercer lugar, la química, como la cocina, implica seguir recetas estabilizadas a través de un largo proceso de prueba y error. Los manuales, guías o manuales de los químicos del siglo XVII no eran libros de teoría. Más bien contenían instrucciones, recetas para realizar correctamente los cambios químicos.

Así, el laboratorio configuró una forma específica de conocer haciendo, de llegar a la naturaleza a través de los artefactos. Esta mediación requería tanto de destreza manual como de actividad intelectual y de un género discursivo y literario específico para la transmisión del saber.

Los Premios Nobel

A primera vista, la idea de que la naturaleza viene con algunos señalamientos que anuncian los límites de los objetos es una fantasía absurda, y el concepto correlativo de "el propio lenguaje de la naturaleza" es claramente una metáfora... Una vez más, quiero advertir contra la sobreinterpretación. Diferentes formas de dividir la naturaleza en objetos producirán diferentes representaciones de la realidad... Una vez más, la partición de la naturaleza concuerda con nuestros intereses y, de manera menos obvia, con nuestras capacidades.

P. Kitcher (2001, pp. 46,47,49)

Durante la Primera Transformación Química, los avances industriales, a partir del descubrimiento del colorante malva por W.H. Perkin, se aceleraron particularmente en Alemania. Por otra parte, en Reino Unido se publicó la *Alkali Act* para frenar las descargas en la atmósfera del ácido clorhídrico generado por el método LeBlanc. Poco a poco el modelo universitario alemán, basado en la tecnociencia, fue copiado por otros países de Europa. Se producía todo lo que podía ser sintetizado y comercializado. En Suecia, A. Nobel logró la estabilización de la nitroglicerina absorbiéndola en una roca sedimentaria muy porosa llamada "tierra de diatomeas". Al producto resultante, con el detonador adecuado (fulminato de mercurio) lo llamó dinamita y obtuvo la patente de su producción a nivel mundial. Para entonces, Nobel había perdido al menor de sus hermanos y cuatro de sus asistentes en una explosión en Estocolmo, al manipular nitroglicerina. De 1867 a 1872 la producción de nitroglicerina convertida en dinamita pasó de 11 a 1 350 toneladas. En 1873 Nobel tenía 15 fábricas de dinamita, trece en Europa y dos en los Estados Unidos. Desde 1901, los intereses financieros generados por su gran fortuna son repartidos por la Fundación Nobel, otorgando los famosos cinco premios Nobel a aquellas personas "que, durante el año anterior, han conferido el mayor beneficio a la humanidad" en los campos de química, física, medicina, literatura y la paz (Figura 1).

El uso extendido de la dinamita cambió la faz de la Tierra. Túneles, minas y presas empezaron a formar parte del paisaje cotidiano de muchos países. La capacidad de destrucción de los ejércitos aumentó considerablemente y con ello la necesidad de fabricar, en mayores cantidades, ácido sulfúrico y ácido nítrico, además de glicerina. Las prácticas químicas son tecnocientíficas, analizan y sintetizan, **conocen haciendo** y con ello, como se discute a continuación, transforman el mundo y la manera en la que nos entendemos y relacionamos con él.

Como lo indica el epígrafe de la presente sección, las diferencias académicas entre las diferentes disciplinas han sido construidas a lo largo de sus respectivas historias, las diferencias son culturales no naturales, por eso hay que conocer y enseñar la historia de las ciencias y las tecnologías. Los famosos premios Nobel obedecen, entre otros factores, a la particular decisión de su impulsor, al monto financiero que otorgan, a la neutralidad política y estabilidad económica de Suecia, a las guerras mundiales, al desarrollo de las ciencias y las tecnologías durante los siglos XX y XXI, a que una de las diez mayores empresas de productos químicos en la actualidad, la AkzoNobel, además de producir dinamita, es la mayor fabricante de pinturas del mundo, etcétera.

FIGURA 1. La medalla de la Real Academia Sueca de Ciencias de química y física representa a la Naturaleza en forma de una diosa parecida a Isis, emergiendo de las nubes y sosteniendo en su brazo derecho una cornucopia.

El velo que cubre su frío y austero rostro lo sostiene el Genio de la Ciencia. Aunque hay una tímida referencia a las creaciones, la mayoría de los premiados lo han sido por sus descubrimientos, es decir, por develar la Naturaleza y no por, de acuerdo con Berthelot, hacerla... hacerla de otra manera, como fue el caso de Perkin o del mismo Nobel.



1) El Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2022

La polimerasa es una enzima involucrada en el mecanismo de reparación de ADN defectuoso y la "Reacción en cadena de la Polimerasa" (PCR, por las siglas en inglés de Polymerase Chain Reaction), es una técnica experimental desarrollada durante la Cuarta Transformación Química que consiste en replicar *in vitro*, es decir sintetizar, de manera altamente específica y rápida, un fragmento del material genético millones de veces, por lo que así se podrá estudiar en mayor detalle. Teóricamente, se puede empezar con un sólo fragmento de ADN para llevar a cabo la reacción de polimerización, reacción conocida y ampliamente utilizada por los practicantes de la química cuyas industrias han cubierto de plástico el planeta. A finales del siglo pasado se desarrollaron reactivos específicos e instrumentos, como el termociclador, para comercializar esta técnica, lo que la volvió accesible en muchos laboratorios de química del mundo. Años antes, H. G. Khorana identificó el orden de secuencias de nucleótidos en los ácidos nucleicos, por lo que recibió el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1968 y posteriormente sintetizó químicamente oligonucleotidos. Paralelamente, F. Sanger identificó un método de secuenciación de ADN que involucraba ADN polimerasa y precursores de nucleótidos, por el cual recibió con P. Berg y W. Gilbert el Premio Nobel de Química en 1980.

Una década después del otorgamiento del Premio Nobel de Química a K. Mullis por la invención de la PCR, en 2003, era manifiesta su gran importancia:

El desarrollo de la PCR a menudo se ha comparado con el desarrollo de Internet, y aunque esto corre el riesgo de exagerar el impacto de la PCR fuera de la comunidad científica, la comparación funciona bien en varios niveles. Ambos inventos han surgido en los últimos 20 años hasta el punto de que es difícil imaginar la vida sin ellos. Ambos han crecido mucho más allá de los límites de su diseño simple original y han creado oportunidades inimaginables antes de su invención. Ambos también han generado un vocabulario completamente nuevo y profesionales alfabetizados en ese vocabulario (Bartlett y Stirling, 2003).

Por su fiabilidad y precisión, la PCR se considera la prueba de referencia para investigaciones sobre clonación, filogenia, análisis funcional de genes, detección y diagnóstico de enfermedades infecciosas, como el COVID-19, y la paleogenética. El Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2022 se otorgó a S. Pääbo por el establecimiento de una nueva disciplina, la paleogenómica (Cuadro 1 y Figura 2), basada en el estilo de pensamiento de las prácticas químicas, atento a la pureza de las muestras y utilizando la PCR.

La Asamblea Nobel en el Karolinska Institutet ha decidido hoy otorgar el Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2022 a Svante Pääbo por sus descubrimientos sobre los genomas de los homínidos extintos y la evolución humana.

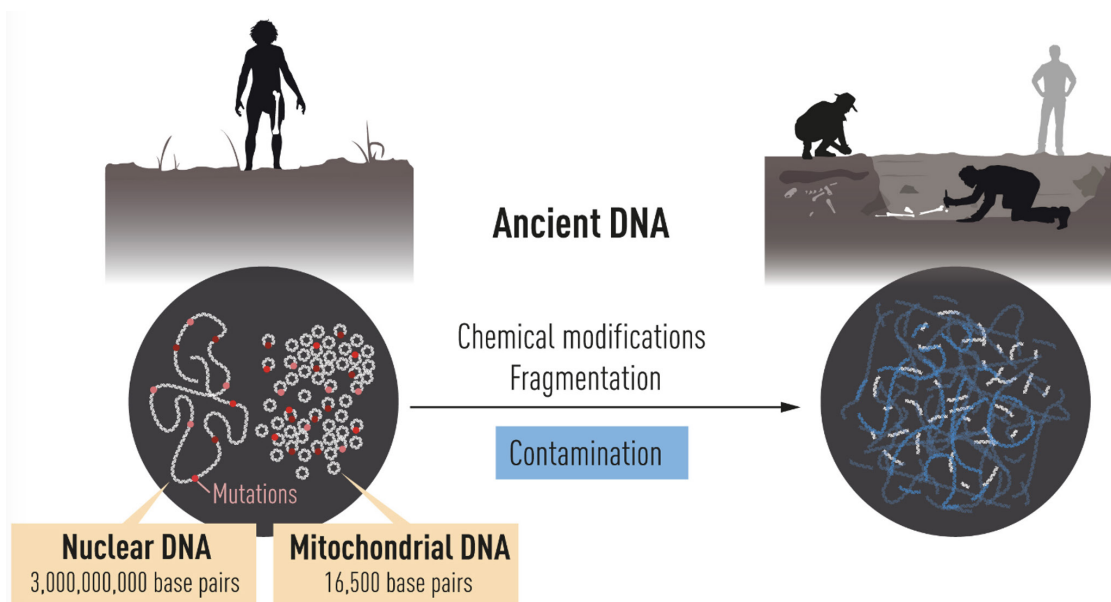
La humanidad siempre ha estado intrigada por sus orígenes. ¿De dónde venimos y cómo nos relacionamos con los que nos precedieron? ¿Qué nos hace a nosotros, ¿Homo sapiens, diferentes de otros homínidos?

A través de su investigación pionera, Svante Pääbo logró algo aparentemente imposible: secuenciar el genoma del neandertal, un pariente extinto de los humanos actuales. También hizo el sensacional descubrimiento de un homínido previamente desconocido, Denisova. Es importante destacar que Pääbo también descubrió que se había producido una transferencia de genes de estos homínidos ahora extintos al Homo sapiens tras la migración fuera de África hace unos 70.000 años. Este antiguo flujo de genes a los humanos actuales tiene relevancia fisiológica hoy en día, por ejemplo, afectando la forma en que nuestro sistema inmunológico reacciona a las infecciones.

La investigación fundamental de Pääbo dio lugar a una disciplina científica completamente nueva; paleogenómica. Al revelar las diferencias genéticas que distinguen a todos los humanos vivos de los homínidos extintos, sus descubrimientos proporcionan la base para explorar lo que nos hace únicamente humanos.

CUADRO 1. Comunicado de prensa del Karolinska Institutet, 3 de octubre de 2022.

FIGURA 2. El ADN se localiza en dos compartimentos diferentes de la célula. El ADN nuclear alberga la mayor parte de la información genética, mientras que el genoma mitocondrial mucho más pequeño está presente en miles de copias. Después de la muerte, el ADN se degrada con el tiempo y, en última instancia, sólo quedan pequeñas cantidades. También se contamina con ADN, por ejemplo, de bacterias y humanos contemporáneos.



La obra de Pääbo es transdisciplinar, tras obtener un doctorado en inmunología, trabajó, al igual que su padre y también galardonado con el Premio Nobel en 1982, en bioquímica y biología evolutiva. Como director del Instituto Max Plank de Antropología Evolutiva, impulsó la transdisciplinariedad en su equipo de investigación, lo que requería amplios conocimientos de química, física y matemáticas. A partir de muestras antiguas de ADN provenientes de una momia egipcia aisladas en cantidades muy pequeñas y muchas veces contaminadas, publicó su primer trabajo en este campo en 1985. Dos de sus colaboradores relatan su manera de trabajar:

A principios de la década de los ochenta hay toda una serie de personajes que aparecen y desaparecen. Hacen publicaciones porque parece ser algo muy prometedor, pero nadie tiene en realidad las ganas de sentar las bases sólidas del campo, que esto es una tarea, dijéramos, desagradecida. Svante se pone en solitario durante diez o quince años, y se propone entender todas las características moleculares del ADN antiguo antes de ponerse a realizar protocolos al azar. Estudia en profundidad la fragmentación del material genético en el tiempo, las condiciones de degradación, los daños químicos post mortem, las posibilidades de aplicar diferentes sistemas de extracción, cuáles dan mejor rendimiento y cuáles menos y así hasta una obsesión técnica. Intenta entender qué ocurre para que haya material genético conservado en primera instancia y hasta dónde se puede llegar. Durante todo este proceso de al menos una década, estos otros pioneros desaparecen porque este tipo de trabajo metodológico no les interesa. A ellos les interesaba la novedad, la curiosidad y hacen algún trabajo como la recuperación de material genético de dinosaurio, por ejemplo, que se publica en el año 93 y que incluso por aquellos momentos no tuvo los estándares de calidad que se habían establecido en ese momento. Hoy sabemos que era una contaminación también... Es evidente, por tanto, que la contaminación fue (y sigue siendo) uno de los grandes problemas para el estudio del ADN antiguo. El hecho de que las muestras tengan tan poco ADN y que el operador (nosotros) y el ambiente (el laboratorio) está constantemente enriquecido por

ADN en la piel, en el pelo e incluso en el ambiente es un gran problema. Precisamente, gracias a las metodologías de Svante se establecen unos protocolos muy estrictos, tanto de recolección de las muestras, de la extracción de ADN y de la manipulación posterior, que hace que las contaminaciones sean muy difíciles (Lalueza y Marquès, 2023).

2) El Premio Nobel de Física 2022

En 2012 se otorgó el Premio Nobel de Física a S. Haroche y D.J. Wineland por sus extraordinarios experimentos en la manipulación de sistemas cuánticos individuales en lo que se conoce como 'enredo' (entanglement). Diez años después se volvió a entregar otro Premio Nobel a la investigación experimental en mecánica cuántica (Cuadro 2). Uno de los galardonados, el austriaco A. Zeilinger dirige el Instituto de Óptica e Información Cuántica de la Universidad de Viena, donde en 1999 se realizó el primer experimento de interferencia cuántica entre moléculas, es decir, con el principal objeto de las prácticas químicas.

La Real Academia Sueca de Ciencias ha decidido otorgar el Premio Nobel de Física 2022 a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger por sus experimentos con fotones entrelazados, estableciendo la violación de las desigualdades de Bell y siendo pioneros en la ciencia de la información cuántica

Estados entrelazados: de la teoría a la tecnología.

Alain Aspect, John Clauser y Anton Zeilinger han realizado experimentos innovadores utilizando estados cuánticos entrelazados, en los que dos partículas se comportan como una sola unidad, incluso cuando están separadas. Sus resultados han despejado el camino para nuevas tecnologías basadas en información cuántica... Los efectos inefables de la mecánica cuántica están comenzando a encontrar aplicaciones. Ahora existe un gran campo de investigación que incluye computadoras cuánticas, redes cuánticas y comunicación cuántica cifrada segura. Un factor clave en este desarrollo es como la mecánica cuántica permite que dos o más partículas existan en lo que se llama un estado entrelazado. Lo que le sucede a una de las partículas en un par entrelazado determina lo que le sucede a la otra partícula, incluso si están muy separadas... Usando herramientas refinadas y una larga serie de experimentos, Anton Zeilinger comenzó a usar estados cuánticos entrelazados. Entre otras cosas, su grupo de investigación ha demostrado un fenómeno llamado teletransportación cuántica, que hace posible mover un estado cuántico de una partícula a otra a distancia.

CUADRO 2. Comunicado de prensa de la Academia Sueca de Ciencias, 4 de octubre de 2022.

Casi un siglo después de su incorporación a las prácticas químicas, la palabra átomo, asociada a una entidad física con características de indivisibilidad, continuó usándose por la comunidad científica a pesar de saber que su nombre no remitía a lo que indicaba. En 1897, el inglés J. J. Thomson descubrió el electrón, identificándolo como una partícula constituyente de los átomos. No deja de ser una ironía en la historia de las ciencias que treinta años después el hijo de J. J. Thomson, G. P. Thomson, junto con C. J. Davisson demostraran experimentalmente que el electrón no sólo se comportaba como una partícula, sino también como una onda y que, por lo tanto, podía difractarse, con lo que partir de ese momento se pudieron usar haces de electrones para "ver" sin luz, en lo que conocemos como microscopio electrónico (López y Chamizo, 2022).

Los electrones presentan un comportamiento material u ondulatorio cuando son sujetos del adecuado experimento. Este sorprendente resultado obtenido por los científicos modernos planteaba un problema de la mayor envergadura. La realidad material de los electrones podía ser comprometida a voluntad del experimentador. Uno de estos experimentos se conoce como el de la 'rendija doble'. Realizado a principios del siglo pasado, en él se hace pasar un haz de electrones a través de una pantalla que tiene un par de rendijas. Inicialmente, se tapa una de las dos rendijas y los electrones pueden pasar sólo a través de una de ellas. La manera clásica en la que se concebía el movimiento permitía suponer que los electrones viajan en línea recta. Así que cuando se coloca detrás de la pantalla una placa fotográfica se puede detectar el paso de los electrones por la rendija. Cuando se lanza el haz de electrones abriendo las dos rendijas, se espera que unos electrones pasen por una de las rendijas y otros por la otra, obteniéndose dos distribuciones de probabilidad separadas entre sí de igual modo que las rendijas (Cruz *et al.*, 1987). Sin embargo, el resultado del experimento fue el mismo que se obtiene cuando en lugar de electrones se lanza un haz de luz, que sabemos tiene propiedades ondulatorias y que es un tipo de energía. Quedó claro que el resultado no puede explicarse considerando que los electrones son corpúsculos clásicos, y puso en evidencia también sus propiedades ondulatorias. Como los electrones son muy pequeños y su masa es prácticamente despreciable (pero la tienen, es de 9.1×10^{-31} kg) al estupor inicial de la comunidad científica, particularmente la de los físicos, siguió la tranquilidad de que ese comportamiento "extraño" sólo se manifestaba cuando las entidades involucradas eran minúsculas. Como los electrones no son sustancias (no existen independientemente en botellas) este asunto de los físicos no modificó en nada las prácticas químicas que las comunidades químicas realizaba en aquellos tiempos, más interesadas en la producción industrial de baquelita, el amoníaco y en el control de la composición de las drogas que se consumían alegremente en todo el mundo, como fue el caso de derivados de heroína y cocaína, producidos por la compañía farmacéutica alemana Bayer, y que se vendían legalmente en las farmacias de Nueva York.

Pocos años después de este experimento con electrones, se pudo repetir con protones que tiene una masa dos mil veces mayor a la del electrón. Los resultados fueron semejantes, ante una 'rendija doble' los protones exhiben propiedades ondulatorias. Al poco tiempo se tuvo la posibilidad experimental de lanzar átomos, y de manera semejante a los electrones y protones, los átomos también se difractan ante una 'rendija doble'. Pero a los químicos los átomos aislados tampoco les importaban mucho.

Pasemos a las moléculas. A los clásicos alótopos conocidos del carbono: el carbón, el grafito y el diamante, se le sumó en 1985 el futboleno C_{60} , sustancia simple constituida por la primera molécula esférica conocida, y que originalmente recibió ese nombre por su semejanza con la pelota utilizada en el fútbol formada por pentágonos y hexágonos, y que contiene sesenta vértices, los sesenta átomos de carbono de dicha molécula. Pocos años después, el Premio Nobel de Química fue otorgado a los químicos R.F. Curl, H.W. Kroto y R.E. Smalley por su descubrimiento de los fulerenos, en particular el C_{60} . Es también durante la Cuarta Transformación Química, cuando se aisló y fabricó el futboleno en cantidades suficientes para la realización de diferentes reacciones químicas. A partir de milésimas de moles de esta sustancia simple, esférica, sólida, negra y cristalina, se construyeron y construyen multitud de nuevas sustancias, algunas de las cuales han constituido el nuevo campo de la nanoquímica (Laurent, 2015).

A finales de esa misma transformación, en 1999, en una carta a *Nature*, científicos austríacos encabezados por A. Zeilinger (Arndt *et al*, 1999) anunciaron que el C_{60} , la bella molécula esférica, uno de los alótropos del carbono que se puede comprar desde cualquier lugar del mundo a las diferentes compañías que la comercializan (con una pureza de 99.5% HPLC), sustancia simple y negra, materia prima de múltiples reacciones químicas, cuando se lanza, una tras otra contra una rendija doble ¡se difracta! Pero es muy claro que cuando sale del instrumento que lo lanza contra la “rendija doble” es una molécula esférica y cuando llega al detector también lo es (Figura 3). En su trayectoria desde el horno donde cientos de moléculas se subliman y posteriormente se coliman, esas moléculas esféricas, con sesenta átomos de carbono, dejan de ser materiales al atravesar una rejilla de difracción, y posteriormente se reintegran en su materialidad en el detector que marca el final de la trayectoria.

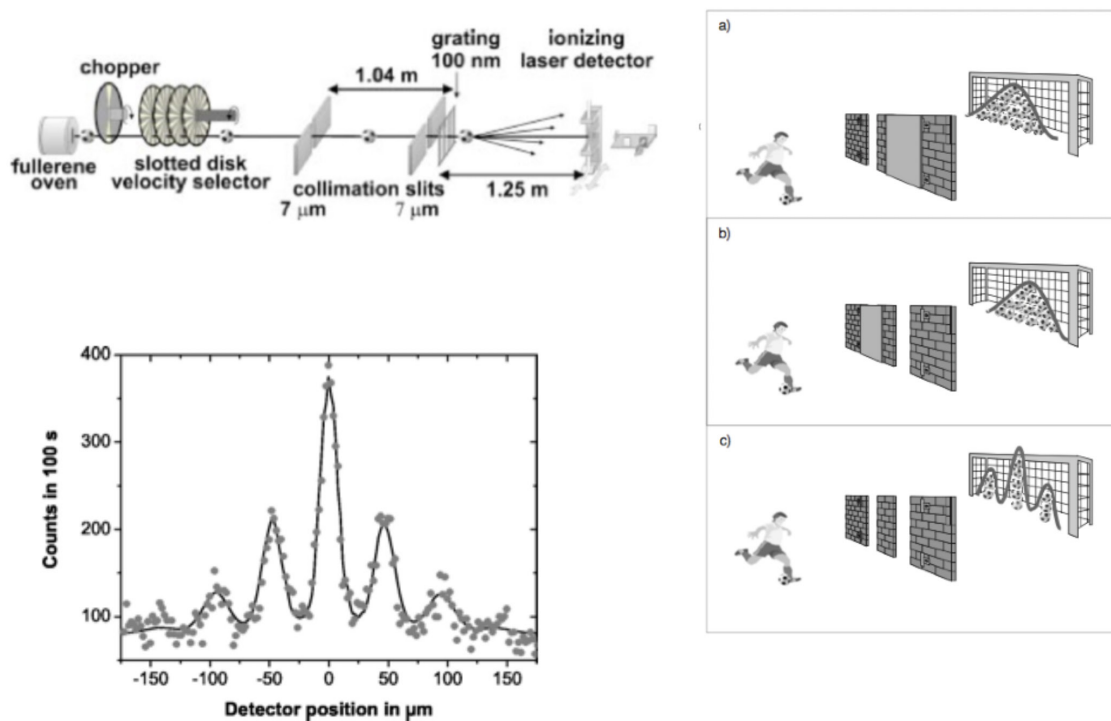
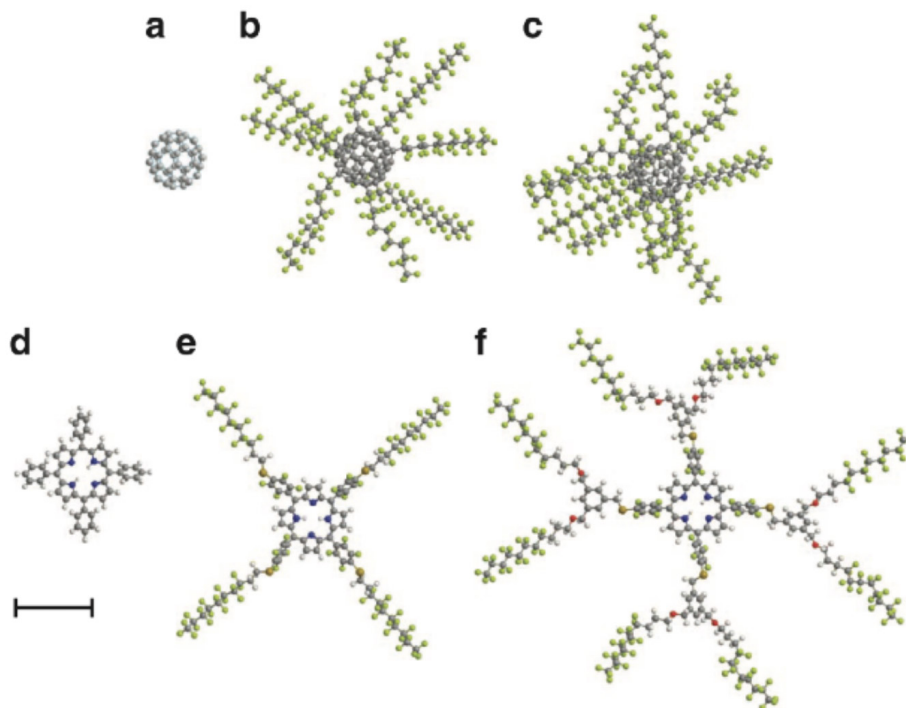


FIGURA 3. Montaje experimental (tomado de Nairz *et al*, 2003), resultado del experimento de la doble rendija (tomado de Arndt 1999) y analogía entre las pelotas de fútbol y las moléculas de C_{60} en el experimento (tomado de Arndt *et al*, 2002).

Ya se han hecho experimentos semejantes con moléculas de más de 2 000 átomos que han sido sintetizadas por químicos, a petición de los físicos, a cargo de este proyecto, desde luego artefactos artificiales (Figura 4) (Fein *et al*, 2019). Dichas moléculas deben tener una robustez estructural que les permite “sobrevivir” la trayectoria experimental a la que serán sometidas, en la que se convertirán en ondas... Esa es la tarea de las comunidades químicas involucradas en el proyecto. Pronto se espera difractar virus. Es muy importante hacer notar que para los practicantes de la química lo importante es cómo sintetizar sustancias con determinadas propiedades, consolidar sus prácticas profesionales, no si esas sustancias, en un momento determinado en un específico contexto experimental alejado de dichas prácticas, dejan de serlo. Desde sus obstinadas, estabilizadas y exitosas prácticas materiales, la inmaterialidad de la molécula individual parece un límite, pero no lo es. Las sustancias químicas, en su condición macroscópica, con una existencia independiente “en botellas”,

tienen propiedades relacionales que se sujetan a un contexto... el de su posible reacción. En esa dirección, Lewowicz y Lombardi (2013) sugieren que la ontología de la química es fundamentalmente de sustancias de “cosas” es decir macroscópica, mientras que la ontología de la física es de individuos aislados como los átomos, es decir, microscópica.

FIGURA 4. Galería de moléculas utilizadas en nuestro estudio de interferencia. (a) El fullereno C_{60} ($m = 720$ AMU, 60 átomos) sirve como referencia de tamaño y para propósitos de calibración; (b) La nanoesfera perfluoroalquilada, PFNS8 ($C_{60}[C_{12}F_{25}]_8$, $m = 5672$ AMU, 356 átomos) es una jaula de carbono con ocho cadenas de perfluoroalquilo. (c) PFNS10 ($C_{60}[C_{12}F_{25}]_{10}$, $m = 6910$ AMU, 430 átomos), tiene diez cadenas laterales y es la molécula más masiva del conjunto. (d) Una sola tetrafenilporfirina TPP ($C_{44}H_{30}N_4$, $m = 614$ AMU, 78 átomos) es la base para los dos derivados (e) TPPF84 ($C_{84}H_{26}F_{84}N_4S_4$, $m = 2814$ AMU, 202 átomos) y (f) TPPF152 ($C_{168}H_{94}F_{152}O_8N_4S_4$, $m = 5310$ AMU, 430 átomos). En su configuración desplegada, esta última es la molécula más grande del conjunto. Medidos por el número de átomos, TPPF152 y PFNS10 son igualmente complejos. Todas las moléculas se muestran a escala. La barra de escala corresponde a 10 Å.



3. El Premio Nobel de Química 2022

Las prácticas químicas se ocupan de las relaciones establecidas entre las sustancias a medida que experimentan un cambio radical. Por lo tanto, *las propiedades químicas son relacionales*; caracterizan las relaciones entre unas sustancias específicas y otras sustancias con las que interactúan y en las que se transforman. Además, las relaciones químicas son notoriamente selectivas. Por ejemplo, si colocamos juntas tres sustancias diferentes, carbón, azufre y salitre, obtenemos una mezcla conocida hace siglos como pólvora, que tiene la propiedad que al calentarse da lugar a otras cuatro sustancias diferentes de las originales... ¡Explotando! Empleando el lenguaje de la química escolar, la reacción química correspondiente es:



La intensidad de la explosión variará dependiendo de la relación que guarden entre sí las cantidades originales de las sustancias involucradas. Más aún, si cambiamos una de esas tres sustancias por otra, digamos el salitre por la sal común, o agregamos una sustancia más, por ejemplo, agua, no hay reacción, no hay explosión.

La reacción química, el cambio de unas sustancias en otras, es el centro de las prácticas químicas y ese cambio, como puede reconocer cualquier profesional de la química, involucra la ruptura y formación de enlaces químicos. El carbón, el azufre y el

salitre son sólidos, como lo son el carbonato y el sulfato de potasio, mientras que el dióxido de carbono y el nitrógeno son gases. El carbono en su forma alotrópica de grafito conduce la electricidad, mientras que en el dióxido de carbono no lo hace. El nitrato de potasio se disocia en agua, mientras que el nitrógeno no lo hace. Esas diferentes propiedades de las sustancias se explican a partir de diferentes modelos del enlace químico (Chamizo, 1992). Las prácticas químicas funcionan mejor con modelos que con teorías (Chamizo, 2009; 2013; 2013a; 2023). Los modelos se construyen para explicar y predecir una determinada porción del mundo, relacionado con una determinada práctica química, como aquella que aborda las reacciones de sustitución en la química orgánica. Porque en química, los modelos también son mediadores entre el mundo real y nosotros, lo que significa que funcionan no sólo como representaciones, sino también como medios de intervención, por ejemplo, las fórmulas berzelianas utilizadas como herramientas de papel en la práctica de la química orgánica del siglo XIX o las estructuras de Lewis en la misma práctica en el siglo XX. Porque diferentes modelos para el mismo campo de aplicación pueden coexistir y complementarse de manera útil, por ejemplo, en las reacciones ácido-base actuales. Todo lo anterior en oposición a las teorías que se caracterizan principalmente como objetos conceptuales abstractos con una estructura lógica.

El Premio Nobel de Química en 2022 se otorgó al desarrollo de una reacción particular, aquella que puede interpretarse a través del modelo de enlace covalente y que consiste en enlazar dos moléculas a través de segmentos terminales y complementarios reactivamente de las mismas moléculas. La química click (Guadarrama, *et al* 2023) se lleva a cabo con enlaces “click” (Cuadro 3).

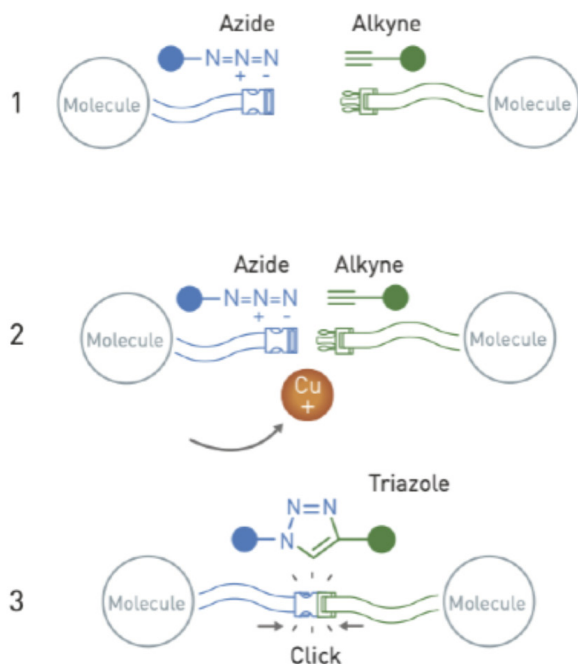
La Real Academia Sueca de Ciencias ha decidido otorgar el Premio Nobel de Química 2022 a Carolyn R. Bertozzi, Morten Meldal y K. Barry Sharpless por el desarrollo de la química clic y la química bioortogonal

El Premio Nobel de Química 2022 trata de hacer que los procesos difíciles sean más fáciles. Barry Sharpless y Morten Meldal han sentado las bases para una forma funcional de química, la química del clic, en la que los bloques de construcción moleculares se unen de manera rápida y eficiente. Carolyn Bertozzi ha llevado la química del clic a una nueva dimensión y comenzó a utilizarla en organismos vivos.

Durante mucho tiempo, los químicos se han visto impulsados por el deseo de construir moléculas cada vez más complicadas. En la investigación farmacéutica, esto a menudo ha involucrado la recreación artificial de moléculas naturales con propiedades medicinales. Esto ha dado lugar a muchas construcciones moleculares admirables, pero generalmente consumen mucho tiempo y son muy caras de producir.

...Barry Sharpless, quien ahora recibe su segundo Premio Nobel de Química, comenzó a rodar la pelota. Alrededor del año 2000, acuñó el concepto de química clic, que es una forma de química simple y confiable, donde las reacciones ocurren rápidamente y se evitan subproductos no deseados.

Poco después, Morten Meldal y Barry Sharpless, independientemente el uno del otro, presentaron lo que ahora es la joya de la corona de la química del clic: la cicloadición de azida-alquino catalizada por cobre. Esta es una reacción química elegante y eficiente que ahora es de uso generalizado. Entre muchos otros usos, se utiliza en el desarrollo de productos farmacéuticos, para mapear el ADN y crear materiales que sean más adecuados para su propósito.



Carolyn Bertozzi llevó la química clic a un nuevo nivel. Para mapear biomoléculas importantes, pero esquivas en la superficie de las células (glicanos), desarrolló reacciones de clic que funcionan dentro de los organismos vivos. Sus reacciones bioortogonales tienen lugar sin alterar la química normal de la célula (Figura 5).

Estas reacciones ahora se usan globalmente para explorar células y rastrear procesos biológicos. Utilizando reacciones bioortogonales, los investigadores han mejorado la orientación de los productos farmacéuticos contra el cáncer, que ahora se están probando en ensayos clínicos. La química clic y las reacciones bioortogonales han llevado a la química a la era del funcionalismo. Esto está trayendo el mayor beneficio para la humanidad.

CUADRO 3. Comunicado de prensa de la Academia Sueca de Ciencias, 5 de octubre de 2022.

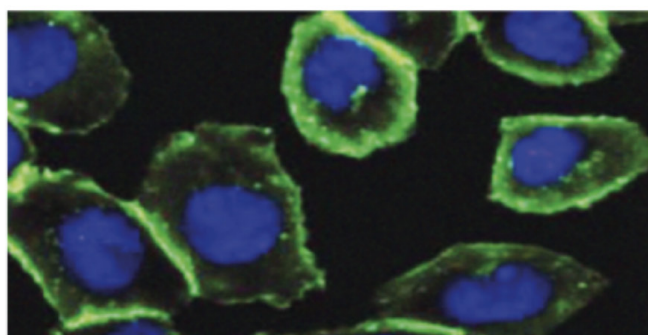
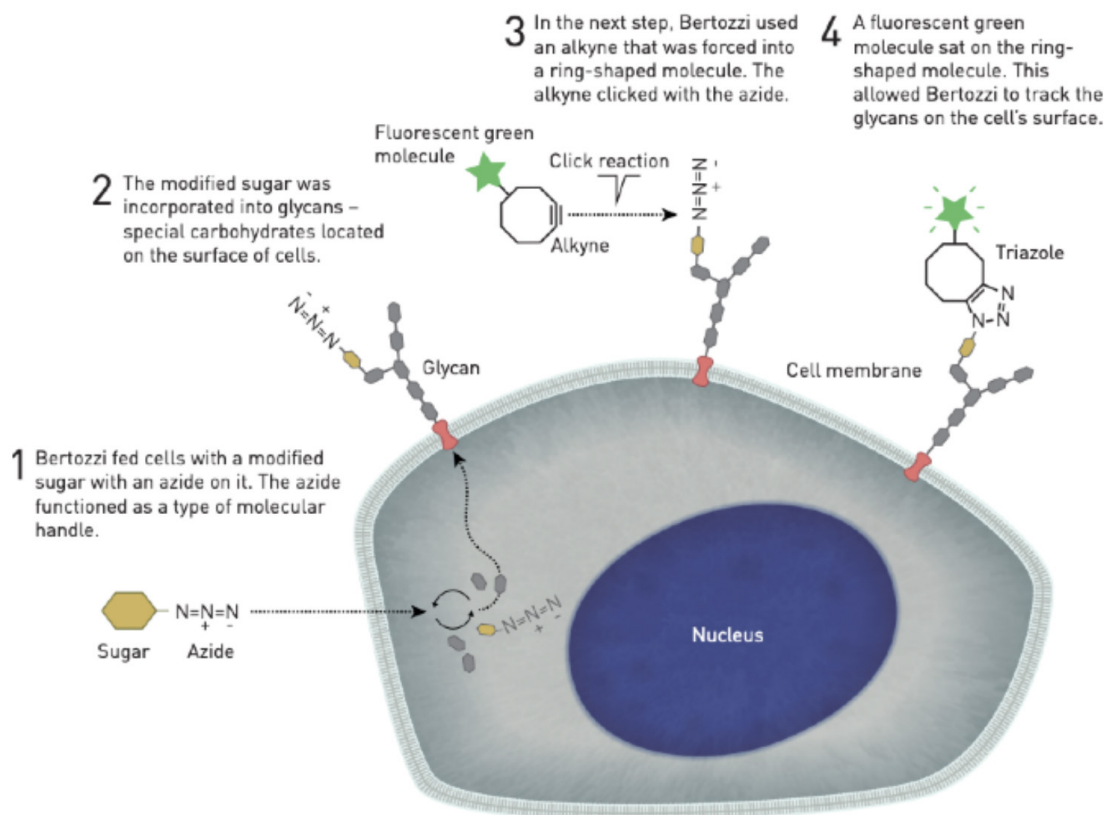


Image from *Proc Natl Acad Sci USA* (2007) 104:16793–16797

Bertozzi used the strain-promoted click reaction to track glycans. They have a green glow in the picture. The cell nucleus is coloured blue. Thanks to the glycans' green glow, Bertozzi was able to follow them in the cell.

FIGURA 5. A través de la química bioortogonal se pueden “iluminar” las células. ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

A manera de conclusión

Los libros de texto de química, ya sean del siglo XVII o de décadas recientes, tienden a yuxtaponer narraciones de experimentos realizados a nivel macro con narraciones sobre relaciones entre entidades microscópicas invisibles. Los dos tipos de narrativa se ejecutan en paralelo, pero ninguno de ellos por sí solo explica la causalidad última.

B. Bensaude-Vincent (2009, p. 373)

Los libros de texto son uno de los varios y posibles relatos sobre el mundo. No por ello carecen de importancia. De acuerdo con Kuhn, que más que ningún otro filósofo ha insistido en la importancia de la educación en la conformación de lo que él llama 'ciencia normal':

Sin embargo, puesto que los libros de texto son vehículos pedagógicos para la perpetuación de la ciencia normal, siempre que cambien el lenguaje, la estructura de los problemas, o las normas de la ciencia normal, tienen íntegramente, o en parte, que volver a escribirse (Kuhn, 1971, p. 214).

El objetivo de un libro de texto es el de darle al lector, de la manera más económica y fácil de asimilar, un enunciado de los que la comunidad científica contemporánea cree que sabe, así como de los usos principales que puede dársele a ese conocimiento. La información relativa a la forma en que se adquirió ese conocimiento –el descubrimiento– y a la razón de que haya sido aceptado por la profesión –confirmación– es, en el mejor de los casos, un exceso de equipaje. No obstante que incluir esa información podría aumentar los valores "humanistas" del texto y fomentar la educación de científicos más flexibles y creativos, haría también que el texto se alejara de la facilidad de aprender el lenguaje científico contemporáneo. Hasta la fecha, sólo el último objetivo ha sido tomado en serio por la mayoría de los escritores de libros de texto de ciencias naturales (Kuhn, 1982, p. 210).

Desde hace más de una década la posición dominante del currículo de química en todos los niveles de su enseñanza está en entredicho (Chamizo, 2013a), pero no todas las soluciones propuestas se dirigen de manera clara y consistente a buscar una solución a las carencias que mostraban. Los profesores son fundamentales para ello (Chamizo, 2000; Pérez y Chamizo, 2016) y hay que trabajar conjuntamente con ellos para mejorar su labor docente.

El gobierno de México ha decidido que en la escuela secundaria hay que eliminar las ciencias específicas. A partir de 2023 no se enseñará química. Las pocas secundarias que tenían un laboratorio lo están cerrando o transformándolo en otro tipo de recinto. En los bachilleratos de la UNAM hace una década se decidió modificar los laboratorios por espacios modernos, sin tomas de gas, ni de agua, para no "mojar" las imprescindibles computadoras en las cuales los alumnos simulan experimentos. Más baratos y menos "peligrosos". Desde luego, en la mayoría de los hogares de los jóvenes mexicanos hay estufas de gas y tomas de agua... Y también computadoras donde a través de sus brillantes pantallas podrán aprender a vivir segura y sanamente, sin olores, ni sabores, ni texturas... El estilo de pensamiento de las prácticas químicas, fundamental para que S. Pääbo analizara y purificara sus muestras de ADN antiguo en la búsqueda de lo que nos hace únicamente humanos, A. Zeilinger utilizara moléculas artificiales para buscar los límites de la teletransportación y C.R. Bertozzi, M. Meldal y K. Sharpless buscarán mejores maneras de sintetizar nuevas moléculas, debe

formar parte de la educación básica y media superior. Se llama cultura o alfabetización científica, asunto que parece no importarle a los burócratas de la educación. Por otro lado, los profesionales de la química estamos obligados a que *conocer haciendo* implica una serie de responsabilidades que debemos asumir y que estamos menospreciando.

Referencias

- Arndt, M., Nairz, O., Vos-Andraea, J., Keller, C., van der Zouw, G., Zeilinger, A. (1999) Wave-particle duality of C_{60} molecules, *Nature*, 401, 680–682.
- Arndt, M., Nairz, O. and Zeillinger, A. (2002) "Interferometry with large Macromolecules: Quantum Paradigm Tested in the Mesoscopic World" in R.A Bertlmann and A. Zellinger (eds) *Quantum (Un)speakables*, Springer-Verlag, Berlin.
- Bartlett, J.M.S., Stirling, D. (2003) A short history of the Polymerase Chain Reaction, *Methods Mol Biol* 226, 3.
- Bensaude-Vincent, B. (2009) The Chemists' Style of Thinking, *Ber. Wissenschaftsgesch*, 32, 365–378.
- Cerruti, L. (1998) Chemicals as instruments A Language Game, *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, 4, 1–18.
- Chamizo, J.A. (2023) "Chemistry" in Mattingly J.M.(ed) *The SAGE Encyclopedia of Theory in Science, Technology, Engineering and Mathematics*, SAGE Publications, Thousand Oaks.
- Chamizo, J.A. (2022) Las prácticas químicas a través de sus transformaciones, *CRITICA Revista hispanoamericana de filosofía*, 54, 57-82.
- Chamizo, J.A. (2021) La química como un sistema de prácticas. Una alternativa para su enseñanza, *EduQ*, 29, 12-18.
- Chamizo, J.A. (2021) El límite material de la sustancia química, *Dianoia*, 66, 51-78.
- Chamizo, J.A. (2017a) The Fifth Chemical Revolution: 1973-1999, *Foundations of Chemistry*, 19, 157-179.
- Chamizo, J.A. (2017) La cuarta revolución química (1945-1966). De las sustancias a las especies químicas, *Educación Química*, 28, 202-210.
- Chamizo, J.A. (2014) The role of instruments in three chemical revolutions, *Science & Education*, 23, 955-982.
- Chamizo, J.A. (2013b) Technochemistry. One of the Chemists Way of Knowing, *Foundations of Chemistry*, 15, 157–170.
- Chamizo, J.A. (2013a) *De la paradoja a la metáfora. La enseñanza de la química a partir de sus modelos*, FQ-SXXI, México.
- Chamizo, J. A. (2013) A new definition of models and modeling in chemistry' teaching, *Science & Education*, 22, 1613-1632.

- Chamizo, J.A. (2009) Filosofía de la química I. Sobre el método y los modelos, *Educación Química*, 20, 6-11.
- Chamizo, J.A. (2000) La enseñanza de las ciencias en México. El paradójico papel central del profesor, *Educación Química*, 11, 132-136.
- Chamizo, J.A. (1992) Modelos del enlace químico, *Elementos. Revista de ciencias exactas, naturales y aplicadas* 17, 28-32.
- Chang, H. (2012) *Is water H₂O? Evidence, realism and pluralism*, Springer, London.
- Crombie A. (1995) *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition: The History of Argument and Explanation Especially in the Mathematical and Biomedical Sciences and Arts*, Gerald Duckworth & Company, London.
- Crosland, M.P. (1978) *Historical Studies in the Language of Chemistry*, Dover, Nueva York.
- Cruz, D., Chamizo, J.A., Garritz, A. (1987) *Estructura atómica. Un enfoque químico*, Addison Wesley Iberoamericana, Wilmington.
- Fein, Y.Y., Geyer, P., Zwick, P., Kialka, F., Pedalino, S., Mayor, M., Guerlich, S., Markus A., (2019) Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa., *Nature Physics* 15, 1242–1245.
- Fernández-González, M. (2013) Idealization in Chemistry: Pure Substance and Laboratory Product, *Science & Education*, 22, 1723-1740.
- Fleck L. (1986) *La génesis y desarrollo de un hecho científico. Introducción a la teoría del estilo de pensamiento y del colectivo de pensamiento*, Alianza Universidad, Madrid.
- Guadarrama, P., López-Méndez, L. J., Cabrera-Quñones, N. C. y Cruz-Hernández, C. A. (2023) Versátil como ninguna, la química clic y su trascendencia en áreas diversas: de la ciencia de materiales a la investigación farmacéutica, *Educación Química*, 34, 60-69.
- Hacking, I. (2002) *Style' for historians and philosophers*, *Historical Ontology*, Harvard University Press, Cambridge.
- Hoffmann, R. (2005) What might philosophy of science look like if chemists built it, *Boston University Colloquium for Philosophy of Science*, October 20.
- Kitcher P. (2001) *Science, Truth, and Democracy*, Oxford University Press, Oxford.
- Kuhn, T. (1982) *La tensión esencial*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Kuhn, T. (1971) *La Estructura de las Revoluciones Científicas*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Kwa, C. (2011) *Styles of knowing. A New History of Science from Ancient Times to the Present*, University of Pittsburgh Press, Pittsburgh.
- Lalueza, C., Marquès, T. (2023) El arte de secuenciar, *La Maleta de Portbou*, 56, 55.
- Laurent, B. (2015) Operations for a problema of existence: dealing with the ontological uncertainty of nano substances, *Foundations of Chemistry*, 17, 207-224.

- Lewowicz, L., Lombardi, O. (2013) *Stuff versus individuals*, *Foundations of Chemistry*, 15, 65-77.
- López, A., Chamizo, J.A. (2022) Sobre la personalidad múltiple de un corpúsculo, *Educación Química*, 34, 188-202.
- Martínez, S.F. y Huang, X. (2015) *Hacia una filosofía de la ciencia centrada en prácticas*, Bonilla Artigas/Instituto de Investigaciones Filosóficas- UNAM, México.
- Morris, P. J. T. (2016) *The Matter Factory. A History of the Chemistry Laboratory*, Reaktion Books, Londres.
- Nairz, O., Arndt, M., Zeilinger, A. (2003) Quantum interference experiments with large molecules, *American Journal of Physics*, 71, 319-325.
- Olivé, L. (2008) *El bien, el mal y la razón. Facetas de la ciencia y la tecnología*, SPCF-UNAM/Paidós, México.
- Pérez, Y., Chamizo, J.A. (2016) Análisis curricular de la enseñanza química en México en los niveles preuniversitarios. Parte II: La educación media superior, *Educación Química*, 27, 182-194.
- Pickstone, J. (2000) *Ways of Knowing*, Manchester University Press, Manchester.
- Polanyi, M. (1966) *The Tacit Dimension*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Powers, J.C. (2012) *Inventing Chemistry. Herman Boerhaave and the Reform of the Chemical Arts*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Ruddigkeit, L., Deursen, R. Blum, L., Reymond, J.L. (2012) Enumeration of 166 Billion Organic Small Molecules in the Chemical Universe Database GDB-17. *J. Chem. Inf. Model.*, 52, 2864-2875.
- Van Brakel, J. (2012) "Substances: The Ontology of Chemistry", en A. I. Woody, R. Findlay Hendry, P. Needham (eds.), *Philosophy of Chemistry*, Elsevier, Oxford.