

El límite material de la sustancia química

[The Material Limit of Chemical Substance]

JOSÉ ANTONIO CHAMIZO
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Química
Instituto de Investigaciones Filosóficas
jchamizo@unam.mx

Resumen: La química tal y como la conocemos hoy es un sistema de prácticas científicas estables y experimentales que se enseñan de la misma manera en la mayoría de los países. Es heredera de una multitud de oficios que coinciden en el objetivo de transformar y crear nuevas sustancias. Aquí se discute el límite material de la sustancia química mediante el ejemplo del carbono, y en particular del experimento de difracción del C_{60} . Con ello se intentará precisar el concepto de sustancia química y su relevancia en la discusión filosófica actual.

Palabras clave: sistema de prácticas científicas; difracción del C_{60} ; filosofía de la química; tecnociencia

Abstract: Chemistry, as we know it today, is a system of scientific, experimental practices, stabilized and taught in the same way in most countries. It is the inheritor of several trades whose objective is to transform and create new substances. I discuss here the material limit of the chemical substance, exemplified by carbon, and particularly by the C_{60} diffraction experiment. I thus intend to clarify the concept of chemical substance and its relevance in the current philosophical discussion.

Key words: system of scientific practices; C_{60} diffraction experiment; philosophy of chemistry; technoscience

¿Qué tipo de ciencia es la química? Una posible respuesta a esta pregunta es: la química es una ciencia relacionada con las sustancias materiales y con las transformaciones químicas de las sustancias.

(Klein 2012, p. 7.)

Los oficios de los alfareros, herreros, panaderos o curanderos, las primeras prácticas experimentales presentes en todas las culturas antiguas, son los antecedentes de lo que hoy conocemos como química. Hay que recordar que la palabra latina *laborare* —de donde procede nuestro término “laboratorio”— nos remite al trabajo manual, el cual era realizado, tanto en el imperio romano como en las ciudades griegas que lo precedieron, por los esclavos. Sin embargo, seguramente

fue en Alejandría, hace poco más de dos mil años, donde, al entrar en contacto con otras culturas de tradición más artesanal y con aprecio por el trabajo manual, la especulación filosófica griega se concretó en una actividad práctica que desde entonces conocemos como alquimia. Los primeros laboratorios, con su respectiva dotación de instrumentos, fueron de alquimistas (Crosland 2005).

Un ejemplo importante de especulación de algunos filósofos griegos consistió en suponer que el mundo tiene un límite material, que identificaron con una entidad invisible a la que llamaron átomo, y que una multitud de esas entidades se desplazan, se agrupan, chocan y se reagrupan a través del vacío. El cambio que todos percibimos en el mundo material, resultado de este reagrupamiento, no es ni fue fácil de aceptar. Tuvieron que pasar miles de años para que esa idea alcanzara suficiente respaldo experimental y terminara por convertirse en las entidades con categoría ontológica que hoy conocemos como átomos y moléculas (Nye 1970; Chalmers 2009; Jensen 2010) y que consecuentemente se incorporara en los libros de texto y así se enseñara en todo el mundo (Chamizo y Garritz 2014).

Fue a finales del siglo XVIII y principios del XIX cuando, como resultado de la integración de diversas prácticas experimentales dedicadas al estudio de la transformación de las sustancias (la alquimia, la metalurgia y la farmacia)¹ tal como se indica en el epígrafe, se estableció la química como una disciplina científica independiente. Es lo que Thomas Kuhn y otros investigadores identificaron como la revolución química² (Kuhn 1971; McEvoy 2010). Hay que agregar que, además de asumirse como una ciencia, la química ya era desde sus inicios una industria en la que se transformaban muchas de las mismas sustancias en grandes cantidades.³

¹ Desde la Edad Media, la preparación de medicamentos, la fabricación de jabones, pigmentos, vidrio, cerámica, explosivos y la extracción de metales fueron actividades prácticas que se realizaban con instrumentos específicos en mercados y lugares públicos muy alejados del ámbito del pensamiento filosófico (Holmes 2000; Klein 2007).

² Tal como la conocemos hoy, la química comenzó cuando el profesor escocés Joseph Black mejoró técnicamente la balanza y en 1754 aisló el dióxido de carbono del carbonato de magnesio, lo que se puede reconocer como la primera reacción química cuantitativa. Como consecuencia, el “aire” filosófico dejó de considerarse un elemento y se sustancializaron los gases.

³ En la historia “tradicional” de la Revolución Industrial se constata el olvido del desarrollo de manufacturas de origen químico (Clow 1952). Esta ausencia de la química y su industria de la narrativa del desarrollo científico no era nueva entonces, como tampoco lo es hoy.

En el presente artículo identifico la química como un sistema de prácticas, diferente e independiente al de otras disciplinas. En esas prácticas examino el límite material de existencia de la sustancia química y empleo como ejemplo al carbono y, en particular, al experimento de difracción del C_{60} . A partir de lo anterior intentaré precisar el concepto de sustancia química y su relevancia en la discusión filosófica actual.⁴

1. La química como un sistema de prácticas

Antes de que se desarrollara la química moderna, los alquimistas eran expertos en la observación de cambios cualitativos durante las reacciones químicas (cambios de color, claridad, volatilidad, etc.), pero hubo pocos avances en la teoría del cambio químico hasta que se reconoció que el uso cuantitativo de la balanza era decisivo.

(Caldin 2002 p. 105.)

No es sino hasta el periodo conocido en Europa como la Ilustración que se formula una definición operativa de sustancia. Ésta se debe al francés Antoine Lavoisier quien, con su propia definición, consideró 33 sustancias como elementos, es decir aquellas que no se podían “romper” en entidades más simples a través del análisis químico.⁵ Como explica en su famoso *Tratado elemental de química* de 1789:

⁴ Con lo que atiendo una carencia en la filosofía, que la ha ignorado prácticamente. Como bien lo indicó el filósofo mexicano L. Olivé: “Ahora es más claro que nunca que la reflexión sobre la ciencia y la tecnología debe darse no sólo en el terreno del conocimiento, es decir, en el epistemológico, sino que junto con ello y de manera integral, debe darse también en los terrenos de la ética y la política, sin abandonar otros aspectos de la producción y uso del conocimiento, como los estéticos [...] la reflexión filosófica de la ciencia dejó en un lugar secundario a la química, disciplina de la mayor importancia, tanto históricamente como por su impacto actual en la sociedad y en el ambiente. Sus consecuencias transformadoras del mundo incluyen muchos de los más relevantes logros de la humanidad, y muchas de las más conspicuas consecuencias negativas, como la contaminación ambiental” (Olivé 2010, p. 11).

⁵ Además de las entonces bien conocidas como el oro, el cobre, el mercurio, el azufre, la magnesia o el oxígeno, incluyó en su lista de sustancias al calórico y a la luz. Evidentemente, y visto desde nuestro presente, la separación entre materia y energía era un asunto complejo de resolución experimental.

Se extrañará seguramente no hallar en un tratado elemental de Química un capítulo sobre las partes constitutivas y elementales de los cuerpos; pero debo prevenir que la inclinación que tenemos a querer que todos los cuerpos de la naturaleza estén solo compuestos de tres o cuatro elementos dimana de una preocupación que nos viene originalmente de los Filósofos griegos. La admisión de cuatro elementos que con la variedad de sus proporciones compongan todos los cuerpos, es una mera hipótesis imaginada mucho tiempo antes que se tuvieran las primeras nociones de la Física experimental y de la Química [...]. Todo lo que se puede decir sobre el número y la naturaleza de los elementos se limita —según pienso— a discusiones puramente metafísicas: son problemas indeterminados los que se trata de resolver, que son susceptibles de una infinidad de soluciones, pero que, muy probablemente, ninguna en particular está de acuerdo con la naturaleza. Me contentaré, por lo tanto, con decir que si [...] atribuimos el nombre de elementos o de principios de los cuerpos la idea del último término al que llega el análisis, todas las sustancias que no hemos podido descomponer todavía por ningún medio, son, para nosotros, elementos; no significa que podamos asegurar que estos cuerpos que consideramos como simples no sean ellos mismos compuestos de dos o incluso de un número más grande de principios, pero dado que estos principios no se separan jamás, o más bien, dado que no disponemos de ningún medio para separarlos, se comportan desde nuestro punto de vista como cuerpos simples, y no debemos suponerlos compuestos más que cuando la experiencia o la observación nos haya ofrecido la prueba. (Lavoisier 1990, pp. vi–viii)

Lavoisier, mediante instrumentos⁶ y experimentos claramente definidos, rompe con la antigua idea teórica de la constitución última del mundo, la de los principios fundamentales. Más aún, introduce una nomenclatura nueva en la que el nombre de una sustancia indica su composición elemental. En lo que después podría identificarse como “realismo pragmático”, Lavoisier hereda y contribuye a transformar una comunidad de prácticas,⁷ con lo que se gestó el nacimiento de la química moderna entre cuyos destacados integrantes se encontraban además

⁶ Sobre el uso adecuado de los instrumentos, aprendido muchas veces de manera tácita a través de una relación de maestro a aprendiz, Martínez y Huang 2015 han indicado: “La destreza en el uso de un instrumento, por ejemplo, sólo se valúa como destreza en el contexto de una práctica en la que esa destreza es un recurso orientado a fines de la propia práctica” (p. 56).

⁷ Una comunidad de prácticas que en aquel momento tenía una larga tradición, como señala Klein en su estudio de la Academia de París a finales del siglo XVII y principios del XVIII con respecto a lo que se ha caracterizado como el periodo protoquímico: “A partir del siglo XVI, surgió una floreciente práctica comercial química en los talleres metalúrgicos y en las boticas de Francia y otros países. La Academia

Joseph Black, Alessandro Volta y John Dalton. Con la primera revolución química —una revolución de emplazamiento en lugar de las revoluciones kuhnianas de reemplazamiento—,⁸ esta disciplina se identificó a sí misma como cuantitativa, con instrumentos y procedimientos experimentales estables, y en particular los relacionados con el análisis químico y una entidad característica: el átomo químico (Izquierdo 2010).

Aquí hay que reconocer que las comunidades científicas son comunidades de prácticas, en las que por “práctica” se entiende 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” (Pickering 1995; Martínez y Huang 2015). Así, una práctica tiene una estructura estable con una capacidad de reproducirse a través de diferentes procesos de aprendizaje. Las comunidades de prácticas químicas son experimentales, crecieron con la incorporación de nuevos instrumentos que dieron lugar a nuevas subdisciplinas que, a su vez, fueron “descubriendo” e

de París incorporó esta tradición de ingeniería y artesanía química. Se convirtió en el lugar donde se exploraron de una nueva forma las operaciones químicas que antes se realizaban con fines comerciales y para enseñar a fabricar medicamentos [...]. La dependencia de las prácticas experimentales de la química de la tradición del taller químico-farmacéutico y metalúrgico se puede demostrar de muchas maneras. La tecnología de materiales que se aplicó en estas prácticas fue casi idéntica a la de los talleres químicos. Casi todas las sustancias químicas utilizadas en los laboratorios de los químicos durante las primeras décadas de la Academia —ácidos, álcalis, metales, sales y los materiales animales y vegetales— eran las mismas que las empleadas en las interacciones comerciales sostenidas por boticarios y mineros. Los recipientes e instrumentos utilizados fueron en gran parte los mismos que se empleaban en las operaciones de ensayo metalúrgico y en los laboratorios de las boticas. Lo mismo sucedía con la habilidad de manipulación necesaria en estas operaciones. La destilación, evaporación y disolución de metales y álcalis en ácidos, así como la precipitación y fundición de metales, etc., eran manipulaciones que también se realizaban en los talleres químicos. Además, las biografías de los químicos académicos demuestran su afinidad con la artesanía y la ingeniería química” (Klein 1996, p. 252).

⁸ “Las revoluciones de reemplazo son del tipo familiar en el que se derroca una forma establecida de hacer la ciencia y un conjunto diferente de métodos se hace cargo. Las revoluciones de emplazamiento ocurren cuando se introduce una nueva forma de hacer ciencia que deja en gran medida en su lugar los métodos existentes. La introducción de la experimentación de laboratorio fue una revolución de emplazamiento en el sentido de que no condujo a la desaparición de la teoría o la observación” (Humphreys 2011, p. 132). Las cinco revoluciones químicas son revoluciones de emplazamiento (Chamizo 2019b).

incorporando nuevas entidades. Las prácticas químicas toman en consideración un saber tácito (Polanyi 1966) que no puede expresarse en palabras, que es propio de diferentes actividades de investigación y que poco a poco se ha reconocido como fundamental en la filosofía de las ciencias. Una práctica específica da por sentado el conocimiento de otras prácticas diferentes y, más en general, una serie de presupuestos culturales que permiten distinguir una práctica de otra (Olivé 2008). Las prácticas químicas son también prácticas tecnológicas (Gutting 1984).

Entre 1754 y 1818 empieza la química tal y como hoy la conocemos en lo que se ha denominado la primera revolución química (Chamizo 2014). Y fue a partir de la introducción de nuevos instrumentos y del uso de nuevas técnicas experimentales, en particular de las derivadas de la incorporación de la electricidad en los laboratorios, que el número de elementos creció de manera importante. Todos los elementos son sustancias, pero no todas las sustancias son elementos; algunas están compuestas por diferentes elementos. Por ejemplo, el agua es una sustancia formada por los elementos hidrógeno y oxígeno en cantidades definidas. El agua oxigenada es otra sustancia, formada también por los elementos hidrógeno y oxígeno en cantidades definidas pero diferentes a las del agua. Quedaba claro que no sólo la composición caracterizaba a una sustancia, sino que también la proporción en la que cada elemento la constituía (Chang 2012). Todo ello se podía medir y experimentar en los laboratorios a través de prácticas químicas definidas y estabilizadas. A partir de esa época, y sobre todo a partir de la propuesta del inglés John Dalton, se fue aceptando la idea⁹ de que los elementos estaban compuestos por átomos iguales, que los átomos conformaban las moléculas y que, al ser ambos muy pequeños, conglomerados enormes de las mismas partículas integraban los elementos que entonces se conocían.

La tabla periódica de los elementos fue propuesta hace 150 años por el ruso Dmitri Mendeléyev para explicar la reactividad química de los elementos conocidos en la época, es decir, en la segunda mitad del siglo XIX durante la segunda revolución química. Esta revolución marcó el inicio de la química orgánica, aquella que se refiere a las sustancias formadas principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno,¹⁰ a la consolidación del análisis químico a través de reacciones

⁹ Sin demostración experimental pero sí con la capacidad de explicar diferentes tipos de reacciones químicas.

¹⁰ Hay que hacer notar que el término “carbonización” se utiliza para la reacción

específicas y al surgimiento de la síntesis química y de la industria química como tecnociencia.¹¹ Mendeléyev¹² estableció una distinción precisa entre sustancia simple y sustancia básica o elemental. Esta última tenía un atributo que la caracterizaba siempre: el peso atómico. Así, en su tabla periódica el elemento carbón, que encabezaba la cuarta familia de elementos, era una sustancia básica, mientras que el grafito de los lápices, el diamante de las joyas o el carbón de las fogatas eran sustancias simples. Mendeléyev utilizó el concepto abstracto de elemento o sustancia básica para que desempeñara un importante papel teórico. Debido a que la química se ocupa de la explicación del cambio químico, es decir, el cambio de una sustancia a otra, los elementos “abstractos” sobreviven al cambio químico,¹³ lo que significa que persisten y pueden explicar las propiedades de sus compuestos. Lo anterior nos remite a la diferencia que Aristóteles estableció entre las entidades singulares que se pueden ver y apuntar con un dedo (*ek-keimenon*) y el sustrato universal (*hupokeimenon*).

Años después, con el desarrollo de nuevos instrumentos durante la tercera revolución química, se descubrieron el electrón, el núcleo atómico y los isótopos. Así, además de los átomos y las moléculas, todas estas nuevas entidades, junto con los iones, pasaron a formar parte de las prácticas químicas a pesar del escepticismo sobre su existencia que manifestaron físicos y químicos importantes de los siglos XIX y XX. Por ejemplo, el químico alemán August Kekulé, anfitrión del primer congre-

que ocurre cuando una sustancia orgánica, un hidrocarburo, alcohol o azúcar, se transforma en carbón. Ya desde entonces se indicaba con claridad que “Cuando estudiamos a una molécula por sí misma la estudiamos físicamente. La química considera el cambio que le sucede a esa molécula cuando reacciona y se convierte en otra molécula, y debe describir el proceso por el cual ese cambio se lleva a cabo” (Williamson 1851).

¹¹ Lo que sucedió con la síntesis de nuevos colorantes y su uso posterior en las prácticas farmacéuticas y que dio lugar al surgimiento de la industria química actual. Para más información, véase Chamizo 2013b.

¹² Y después de él lo hizo el químico Friedrich Paneth, quien aceptó las ideas de Kant. Como señala Ruthenberg 2009 (p. 83): “Con el empleo de otra terminología, las sustancias simples pueden considerarse observables y las sustancias básicas no-observables”.

¹³ Por ejemplo, son sólo los elementos “abstractos” los que sobreviven cuando el Na y el Cl se combinan para formar NaCl. Ni el sodio (que como sustancia simple es un metal gris) ni el cloro (que como sustancia simple es un gas verde) sobreviven cuando se combinan para formar otra sustancia simple (sólido blanco cristalino) conocida como sal de mesa. De esta manera, hay una diferencia clara entre el concepto abstracto de elemento y las cosas materiales o sustancias simples.

so internacional de química¹⁴ y de cualquier otra ciencia (el Congreso de Karlsruhe), indicó:

La pregunta sobre si existen los átomos tiene poca importancia desde el punto de vista químico: su respuesta pertenece a la metafísica [...] No tengo ninguna duda en decir que, desde el punto de vista filosófico, yo no creo en la existencia real de los átomos —tomando esta palabra en su sentido literal— como una partícula indivisible de materia. Espero que algún día encontremos para lo que llamamos átomos una representación físico-matemática que nos pueda explicar el peso atómico, la valencia y otras de las numerosas propiedades de los llamados átomos. Sin embargo, como químico, considero que la suposición de la existencia de átomos no sólo es aconsejable, sino absolutamente necesaria en química. (Kekulé 1867)¹⁵

No fue hasta la primera mitad del siglo xx que el físico-químico francés Jean Perrin demostró la realidad de los átomos y de las moléculas (Nye 1970; Chalmers 2009) dado que sólo a través de su existencia¹⁶ se pueden explicar los resultados de diversos experimentos. Desde entonces es el número atómico (Wray 2018), es decir, el número de protones en el núcleo atómico, la propiedad que identifica a un elemento, que en el caso del carbono es seis.

Aquí hay que hacer una distinción importante. Cuando dos sustancias simples diferentes contienen el mismo elemento reciben el nombre

¹⁴ Y defensor de la estructura cíclica del benceno (C_6H_6), seguramente la sustancia más importante de la industria química de los colorantes y de muchos productos farmacéuticos.

¹⁵ En coincidencia con lo anterior, el historiador de la física Jed Z. Buchwald menciona lo siguiente: “El tipo de actividad realizada por los químicos del siglo xix, aunque variada, bien puede llamarse ‘explicación reductiva’. En ella se buscaba que las configuraciones microestructurales pudieran esclarecer el comportamiento químico u otorgar un significado a las representaciones de las fórmulas, siendo la conexión en cierto modo imprecisa y tentativa [...] En términos generales, se puede decir que el análisis y la síntesis químicos corresponden a la destrucción y a la construcción, pero el punto aquí es precisamente que muchos químicos de aquella época no utilizaron herramientas de laboratorio o material de escritorio que estuvieran profundamente vinculados a un micromundo aun cuando creían en él” (Buchwald 2014, pp. 299–300). En efecto, las prácticas químicas se refieren al análisis de las sustancias y a la síntesis de nuevas sustancias.

¹⁶ Como se indica en el realismo de las entidades defendido por Hacking 1983 y que se presenta en la siguiente sección.

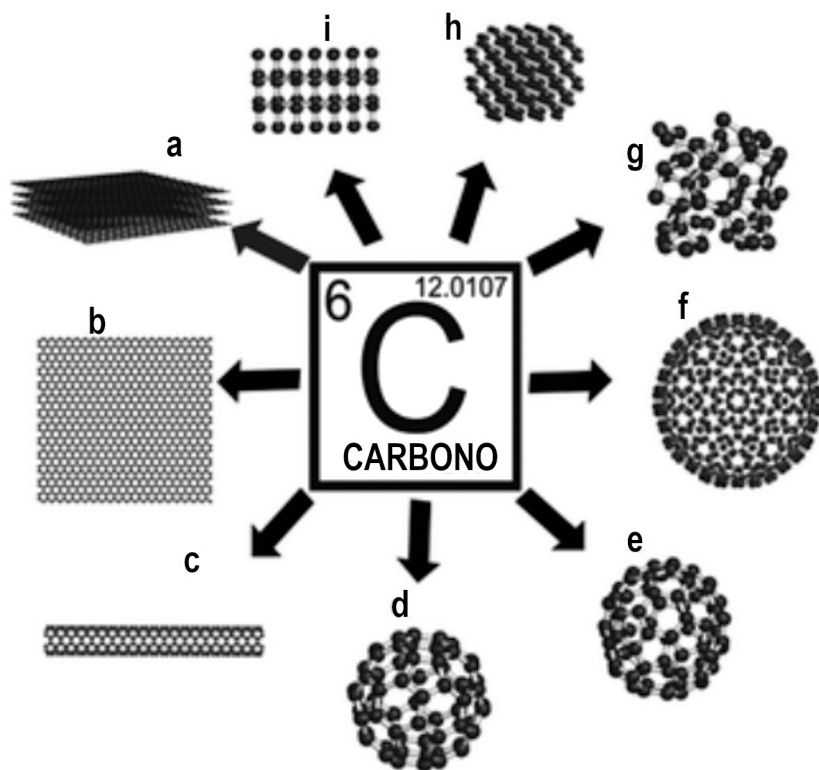


FIGURA 1. Representación de diferentes alótropos, es decir, de diferentes sustancias simples del carbono. (a) Grafito, (b) grafeno, (c) nanotubos de carbono, (d) C₆₀, (e) C₇₀, (f) C₅₄₀, (g) carbón amorfo, (h) lonsdaleita e (i) diamante (Chamizo 2019a, p. 104).

de alótropos¹⁷ (Figura 1). La composición última de las sustancias simples en el nivel atómico, es decir, en el nivel elemental, no es suficiente para su caracterización. Se requiere saber además su estructura, la cual se manifiesta en las diversas sustancias simples por sus propiedades físicas diferentes.¹⁸ A los clásicos alótropos conocidos del carbono —el carbón, el grafito y el diamante—, se le sumó en 1985 el futboleno C₆₀, sustancia simple constituida por la primera molécula esférica conocida y que originalmente recibió ese nombre por su semejanza con el balón de fútbol formado 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 les fue otorgado a los químicos Robert F. Curl, Harold W. Kroto y Richard E. Smalley por su descubrimiento de los fulerenos, y en particular del C₆₀.

Tras aceptar la permanencia temporal de la sustancia, es decir, su permanencia durante un tiempo “razonable” de acuerdo con las prácticas químicas disponibles hasta la primera mitad del siglo XIX, la comunidad de químicos profesionales, asociados en la *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), definió la sustancia química como “Materia de composición constante mejor caracterizada por las entidades (moléculas, átomos) de las que está compuesta. Se identifica por sus propiedades físicas tales como la densidad, el índice de refracción, la conductividad eléctrica, el punto de fusión, etc.” (IUPAC 2006).¹⁹ Sin embargo, con la incorporación de instrumentos nuevos en las prácticas químicas durante la cuarta revolución química (Chamizo 2019b), el enfoque espacio-temporal a las sustancias permitió reconocer la compleji-

¹⁷ Hasta el siglo XIX se pensaba que el grafito y el diamante eran dos sustancias simples distintas, lo cual se admite aun hoy, ya que, de acuerdo con la definición aceptada de sustancia química, el grafito y el diamante tienen propiedades físicas diferentes. Sin embargo, fue hace doscientos años, cuando Lavoisier quemó un diamante, que se descubrió que el único producto resultante de esa combustión era CO₂ (el mismo resultado de quemar grafito). Éste ha sido uno de los experimentos más caros para demostrar la existencia de los alótropos, y se repitió años después en Inglaterra.

¹⁸ Por ejemplo, respecto al diamante y al grafito, ambas sustancias simples están formadas por átomos de carbono, es decir, del mismo elemento. Sin embargo, mientras que el primero es incoloro y transparente, con una densidad de 3,3 g/cm³ y una capacidad calorífica molar de 6,2 J/mol K, el segundo es negro y opaco, con una densidad de 2,3 g/cm³ y una capacidad calorífica molar de 8,5 J/mol K. Sobra decir que también difieren en su conductividad eléctrica. . . y en su precio!

¹⁹ Para la IUPAC, el elemento químico corresponde a la sustancia básica de Mendeléyev y Paneth, es decir, a algo “formado por átomos y los átomos con el mismo número de protones en el núcleo atómico”.

dad que ese nombre abarcaba por sí solo. Pudieron medirse reacciones cada vez más rápidas²⁰ y poco a poco se abandonó el concepto limitado de sustancia química por el más amplio de especie química.²¹ 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 segunda revolución 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 Jaap 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).²²

²⁰ Con lo que también comenzó a cambiar la concepción de un mundo material temporalmente robusto como se indica en el libro *A Tenth of a Second. A History*: “Cuando en el siglo XIX los científicos descubrieron que un micromundo análogo quedaba atrapado en periodos cortos de tiempo, aumentaron su arsenal tecnológico más allá de la microscopía y más allá de la telescopía [...] El microtiempo era aún más omnipresente que el microespacio, ya que siempre estaba cambiando, por lo que afectaba la esencia misma del tiempo y el desarrollo temporal. Las ciencias basadas en su medición dependían de la comprensión de estos momentos y de resolver una serie de nuevos acertijos que aparecían con ellos” (Canales 2009, prefacio). Por ejemplo, la sustancia Ar Cl_2 se disocia en Ar y Cl_2 en 0.000000000001s (10^{-12}s). Esta reacción de descomposición sucede un millón de millones de veces más rápido que el latido del corazón. Se puede decir que el Ar Cl_2 se descompone “inmediatamente” una vez que se sustancializa. Su existencia material es fugaz y ha dado lugar a un nuevo campo en la química, el de la femtoquímica (Chamizo 2017).

²¹ La definición de la IUPAC para “especie química” es como sigue: “Son átomos, moléculas, fragmentos moleculares, iones, etc., involucrados en un proceso químico o de medición. Generalmente las especies químicas son un conjunto de entidades moleculares químicas idénticas que pueden explorar el mismo conjunto de niveles de energía moleculares en la escala de tiempo del experimento [...] La redacción de la definición pretende abarcar casos, como el del grafito, el cloruro de sodio o un óxido superficial, en los que la unidad básica estructural no puede ser capaz de tener existencia aislada, así como aquellos casos donde sí”.

²² De acuerdo con esta definición, no son sustancias químicas ni las partículas nucleares, que reconoce como tales el Chemical Abstract Service, ni, por ejemplo, los electrones, ya que no se encuentran independientemente en botellas.

2. El límite material de la sustancia química

El descubrimiento del buckminsterfullereno (C_{60}) ya se ubica como uno de los momentos más importantes en la historia de la química. A medida que se le encuentren más usos prácticos su fama sólo puede aumentar. La belleza de la molécula ha hecho mucho para revitalizar la enseñanza de la química en las escuelas. Asimismo, ha elevado la moral de los profesionales de la química con un éxito llamativo e inspirador después de años pasados a la sombra de biólogos moleculares y cosmólogos.

(Hugh Aldersey-Williams 1995, p. 2.)

En las últimas décadas el filósofo canadiense Ian Hacking ha sido uno de los defensores más importantes de la variedad de papeles que desempeñan los experimentos en la producción de conocimiento (Hacking 1983). Hacia finales del siglo pasado y en coincidencia con otros filósofos,²³ reconoció que gran parte de nuestro conocimiento empírico resulta de intervenciones con instrumentos, ya que sólo cuando intervenimos podemos descubrir las resistencias materiales del mundo: “la experimentación tiene vida propia e interactúa con la especulación, los cálculos, la construcción de modelos, la invención y la tecnología de numerosas maneras” (Hacking 1983, p. xiii). Para él, los fundamentos epistémicos para creer en una entidad invisible como los electrones no provienen de la teoría subyacente, sino de la capacidad de manipularla: “si puedes rociarlos, entonces son reales” (Hacking 1983, pp. 22–24), lo que lo llevó a proponer una distinción entre el realismo de las teorías y el realismo de las entidades, y que puede

²³ Dos de ellos, provenientes de la química, comentan lo siguiente: “los instrumentos no están en el sótano intelectual; ocupan el mismo piso que nuestras mayores contribuciones teóricas para comprender el mundo” (Baird y Shew 2004, p. xvii) y: “de hecho, el énfasis tradicional que los historiadores de la ciencia han puesto en la teoría como motor del desarrollo científico tiende a oscurecer los papeles de la instrumentación que están en la raíz del progreso en el análisis químico. En consecuencia, el instrumento ha adquirido la apariencia de una herramienta fabricada expresamente para el investigador químico con la intención de lograr un gran avance. Este imaginario está relacionado con la subordinación común de la tecnología a la ciencia en gran parte de la literatura existente sobre el tema” (Rabkin 1993, p. 26).

aplicarse muy bien en la química. Como indica la filósofa de la química francesa Bernadette Bensaude-Vincent: “los químicos son realistas. Creen en la realidad de sus entidades, lo que les permite operar en el mundo exterior o verse afectados por él” (Bensaude-Vincent 2008, p. 52). Esta conexión entre palabras y cosas, conceptos e instrumentos, permite reconocer de manera más clara las actividades que realiza una comunidad científica específica en un momento histórico particular.

En particular respecto a las entidades, Arabatzis 2008 escoge el término “entidades ocultas” para eliminar las dificultades que presentan otras taxonomías, como las “entidades teóricas”, “entidades inobservables” o “entidades hipotéticas” y decide considerar un criterio más epistemológico para establecer su estatus ontológico, es decir, su existencia. Así, la primera característica de una “entidad oculta” es que pueda manipularse experimentalmente, como también defienden Hacking 1983 o Cartwright 1983 en el denominado “realismo de las entidades”. No obstante, la manipulación experimental en la línea de pensamiento de Arabatzis no es por sí sola condición suficiente ni necesaria para demostrar su existencia. Una segunda característica atribuible a las “entidades ocultas” es que sean, además de un cuerpo de conocimiento puntual, objeto de un conjunto de prácticas desarrollado históricamente. Eludiendo el problema del realismo, Arabatzis sostiene que se le puede dar sentido a esas entidades y a su papel en la práctica científica sin suponer necesariamente su existencia. Lo anterior tiene que ver con su estabilidad social en el desarrollo histórico de una determinada práctica, ya que se las puede asociar con una constelación de efectos capaces de ser explicados por esa única “entidad oculta”. Además, la determinación repetida de las propiedades de una “entidad oculta” en diferentes entornos experimentales es una razón importante a favor de su existencia, de su reconocimiento ontológico, como fue el caso en la química de los átomos, las moléculas, los electrones, los isótopos, los radicales libres, el espín o las nanopartículas; todas ellas “entidades ocultas” que caracterizan a las diferentes revoluciones químicas (Chamizo 2014; Chamizo 2017; Chamizo 2019b).

Las comunidades químicas aceptan y defienden la realidad de sus entidades a pesar de que, cuando se comparan con las comunidades físicas, no siempre coinciden con ellas. Ambas comunidades tienen prácticas y ambiciones diferentes. A diferencia del ideal del universalismo y la búsqueda de una verdad única (que defienden 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.²⁴ 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 del surgimiento de esa disciplina. Por ello, con base en el pluralismo ontológico²⁵ y el reconocimiento de que no hay una práctica sin un contexto social de transmisión (principalmente educativo) a través del cual dicha práctica se reproduce y recrea a sí misma, retomo y comparto la conclusión de Arbatzis 2008:

[N]uestra comprensión de las entidades ocultas y su papel en la práctica experimental puede mejorarse mediante la adopción de un enfoque histórico-filosófico integrado. Por un lado, la reflexión filosófica sobre el problema del realismo de las entidades tiene mucho que ganar al examinar históricamente cómo se introdujeron e investigaron esas entidades. Por otro lado, el análisis histórico del desarrollo de las entidades como objetos experimentales, puede beneficiarse de los debates filosóficos sobre su existencia. (p. 10)

Tras reconocer la diversidad de prácticas a lo largo de la historia, el filósofo de la química alemán Joachim Schummer 1998 sostiene que una propiedad material es un comportamiento reproducible en determinadas condiciones, es decir, en un contexto particular. Así, el contexto es el aspecto central con el cual se pueden caracterizar las propiedades materiales. Entre todas las propiedades materiales hay una propiedad particular que se refiere a la reacción química: la capacidad de una sustancia para reaccionar con otra. Como se mencionó en la nota al pie número 10, esta propiedad material es la que diferencia a las prácticas químicas de las de otras disciplinas como la física o la biología.

Así, la química se ocupa de las relaciones entre las sustancias a medida que experimentan un cambio radical. Por lo tanto, las propiedades químicas son relacionales, caracterizan las relaciones entre unas

²⁴ Este “realismo pragmático”, que ya anunciaba Lavoisier, es el que defienden de alguna manera Pickering 1995 a través de sus “prácticas” y Hacking 1983 con sus “intervenciones”.

²⁵ Como lo han indicado Lombardi y Pérez Ransanz: “El pluralismo ontológico que aquí proponemos permite dejar atrás este tipo de prejuicios. Las entidades, propiedades y relaciones químicas no necesitan remitir a ningún ítem de la física para adquirir legitimidad ontológica: su existencia objetiva no depende de su reducción o emergencia respecto de entidades y propiedades supuestamente más básicas, sino del hecho de ser descritas por una disciplina como la química, cuyo éxito predictivo y capacidad de transformación nadie pondría actualmente en duda” (Lombardi y Pérez Ransanz 2012, p. 205).

sustancias específicas y otras sustancias con las que interactúan y se transforman. Por otro lado, 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 de que, al calentarse, da lugar a otras cuatro sustancias diferentes de las originales... ¡explotando!²⁶ La intensidad de la explosión variará según 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 sal, o agregamos una sustancia más, por ejemplo agua, no hay reacción, no hay explosión. Es a través de las reacciones químicas que se genera una multitud de nuevas sustancias. Ésa es una práctica química.

Del siglo XIX es la hermosa frase escrita por el químico francés Marcellin Berthelot: “la química crea su propio objeto”. Ésta recoge a la perfección el espíritu creativo de la síntesis química resultado de reacciones químicas. Los químicos de hoy, aproximadamente un poco más de tres millones de personas en todo el mundo, hacemos nuevas sustancias. 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 en 1800 a más de 156 millones de sustancias diferentes en la actualidad, la mayoría de las cuales se comercializan, se usan y después muchas de ellas se desechan.²⁷ A este número de sustancias se añaden más de 15,000 nuevas cada día, es decir una cada seis segundos.²⁸ La síntesis de sustancias nuevas hace que la química sea, de entre todas las ciencias, la más productiva. Como

²⁶ Empleando el lenguaje de la química escolar, la reacción química correspondiente es:



²⁷ A través de la química se producen objetos (sustancias) que pueden estudiarse a partir de la cultura material. Sobre este floreciente nuevo campo de estudio Tilley *et al.* 2006 han indicado: “Los estudios de la cultura material tienen que enfatizar en varias formas y de manera inevitable la relación dialéctica y recursiva entre personas y cosas: que las personas hacen y usan cosas y que las cosas hacen personas” (p. 2). Por otro lado, Preston 2013 hace notar que: “La historia de la filosofía occidental es así irrelevante en lo que respecta a la cultura material por sí misma” (p. 2).

²⁸ Poco después de la Segunda Guerra Mundial, el Chemical Abstracts Service de los Estados Unidos introdujo el CAS Registry Number (CASRN), un sistema computarizado para identificar cualquier sustancia sin requerir de su nombre y que es desde entonces la mayor base de datos sobre la identidad de las sustancias.

indicó Schummer 2006, en el año 2000 el *Chemical Abstracts*, la base de datos que informa sobre la mayoría de publicaciones de esta disciplina, reportaba prácticamente el mismo número de publicaciones que todas las demás ciencias juntas.

Aquí hay que preguntarse si la química se reduce a la física, un asunto que se ha discutido ampliamente en los estudios especializados (Hendry 1999; Van Brakel 2000; Scerri 2007; Kim 2014) y que resume muy bien van Brakel 2014 (p. 13):

El interés de los filósofos de la ciencia anterior a 1960 se centró casi exclusivamente en la ciencia teórica. Con un énfasis ligeramente diferente, la física y la química se agruparon como ciencias naturales exactas con un enfoque en el estudio de su estructura lógica. Esto significaba que el interés estaba en las leyes formuladas como ecuaciones matemáticas que establecían relaciones entre cantidades y teorías que eran axiomáticas, al menos en principio. La filosofía de la ciencia dominante simplemente consideraba la química como una parte sin importancia de la física; la impresión general era que, con la interpretación de la mecánica cuántica del enlace químico, la química se había reducido a la física. Si hubiera existido alguna filosofía de la química en la era precuántica, con el advenimiento de la mecánica cuántica se habría vuelto irrelevante de inmediato.

Así, contra la idea generalizada y superada de que la química es sólo una “ciencia natural”²⁹ que descubre una porción del mundo natural —“un mundo dado”—, el hecho de que con las reacciones químicas la cantidad de “objetos” o sustancias que pueblan el mundo crezca en forma extraordinaria convierte a la química en una disciplina más cercana al arte y a la ingeniería que a la física. A través de sus prácticas más generalizadas, la mayoría de las comunidades químicas no descubren, sino que diseñan, hacen o fabrican (Chamizo 2013b). Algunas de ellas, como las de los ingenieros químicos, lo hacen en grandísimas cantidades.³⁰ El conocimiento de las propiedades químicas de una sustancia, que muchas veces genera nuevas sustancias, es prácticamente inacabable. Por ello, además de preguntarse sobre la naturaleza intrínseca de la sustancia química, que es una preocupación más de los físicos, hay que reconocer qué cantidad de esa sustancia presenta las propiedades materiales que caracterizan las prácticas químicas.

²⁹ Así se enseña prácticamente en todo el mundo (van Brakel 2000).

³⁰ Por ejemplo, en el año 2000 la producción sintética de amoníaco mundial, la materia prima fundamental de los fertilizantes, fue de 85 millones de toneladas, sólo detrás de la de los plásticos.

Esa pregunta nos lleva al mol. En el Sistema Internacional de Unidades el mol es la unidad de cantidad de sustancia química que permite relacionar el mundo macroscópico al que accedemos a través de nuestros sentidos con el microscópico que legitimamos mediante experimentos (Hacking 1983) o de cadenas de referencia (Latour 2001). El mol se refiere a la medición macroscópica de una sustancia que corresponde, en el nivel atómico, al número de entidades que esa sustancia contiene (Nelson 2013) y es equivalente al conocido como número de Avogadro, es decir $6,02 \times 10^{23}$ entidades. Hay que hacer notar que un mol de cualquier sustancia tiene propiedades diferentes de las entidades que la componen. Un mol de agua (18 g de agua) moja, diez moles de agua quitan la sed, mientras que una molécula de agua ni moja ni quita la sed. Una molécula de agua jamás será líquida ni tampoco hielo. El agua líquida y el hielo sólido requieren, para serlo, una enorme cantidad de moléculas de H_2O .

Es durante la quinta revolución química, en particular en el año 1985, cuando se aisló y caracterizó el C_{60} . Sin embargo, no fue hasta cinco años después cuando se pudo producir en cantidades suficientemente grandes para ser sujeto a las prácticas químicas, es decir, para hacerlo reaccionar.³¹ A partir de milésimas de moles de esta sustancia simple, esférica, sólida, negra y cristalina se construyeron y aún se construyen multitud de sustancias nuevas (Figura 2), algunas de las cuales constituyen el nuevo campo de la nanoquímica (Montellano López *et al.* 2011; Laurent 2015). También en ese periodo se difractaron, una tras otra, moléculas individuales de C_{60} .

Casi un siglo después de su incorporación a la química, la palabra “átomo”, asociada con una entidad física indivisible, continuó usándose en la comunidad científica a pesar de que su nombre no remitía a lo que indicaba. En 1897, el inglés J.J. Thomson descubrió el electrón, y lo identificó como una partícula constituyente de los átomos (Achinstein 2001). No deja de ser una ironía de la historia de las ciencias que treinta años después el hijo de Joseph John Thomson, George Paget Thomson, junto con Clinton Joseph Davisson, demostró experimentalmente que el electrón no sólo se comportaba como una partícula, sino también

³¹ Así relata Aldersey el resultado del experimento de vaporización del carbón entre dos electrodos de grafito para producir C_{60} en cantidades macroscópicas: “Ahora estaba muy claro para ambos pares de científicos que estaban sentados en el mayor descubrimiento de sus carreras. Tenían los medios para producir cantidades visibles y utilizables de la sustancia a la que todos los químicos querían echar mano. Y podían hacerlo todos los días” (Aldersey 1995, p. 201).

como una onda y que, por lo tanto, podía difractarse.³² Queda claro que podemos meter átomos en botellas, aglomerados por ejemplo en forma de diamantes o de grafito. Es decir, diamantes y grafito son sustancias, mientras que los electrones o los núcleos que los conforman no. De acuerdo con van Brakel, la sustancia química es macroscópica. No hay botellas que contengan de manera independiente núcleos ni tampoco electrones.³³

Como indiqué antes, a principios del siglo pasado los electrones, integrantes de los átomos que a su vez constituyen la sustancia, fueron las primeras partículas materiales que se difractaron. Los electrones presentan un comportamiento material u ondulatorio cuando son sujetos del experimento adecuado. Este resultado sorprendente de la ciencia moderna planteaba un problema de la mayor envergadura. La realidad material de los electrones podía ser comprometida a voluntad del experimentador. El filósofo de la química francés Gaston Bachelard lo explica de la siguiente forma:

Porque sería demasiado cómodo confiarse todavía a un realismo totalitario y unitario y respondernos: todo es real, el electrón, el núcleo, el átomo, la molécula, la micela, el mineral, el planeta, el astro, la nebulosa. Desde nuestro punto de vista, no todo ello es real de la misma manera y la sustancia no tiene idéntica coherencia en todos los niveles; la existencia no es una función monótona; no puede afirmarse donde quiera y siempre con el mismo tono. (Bachelard 2001, p. 47)

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, 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, con lo que se obtienen dos distribuciones de probabilidad separadas entre sí de igual modo que las rendijas. Sin embargo, el resultado del experimento

³² A partir de ese momento se pudieron usar haces de electrones para “ver” sin luz, en lo que conocemos como microscopio electrónico.

³³ Los gases nobles —He, Ne, Ar, Kr y Rn— son ejemplos de átomos aislados que se pueden meter en botellas y permanecen allí sin combinarse.

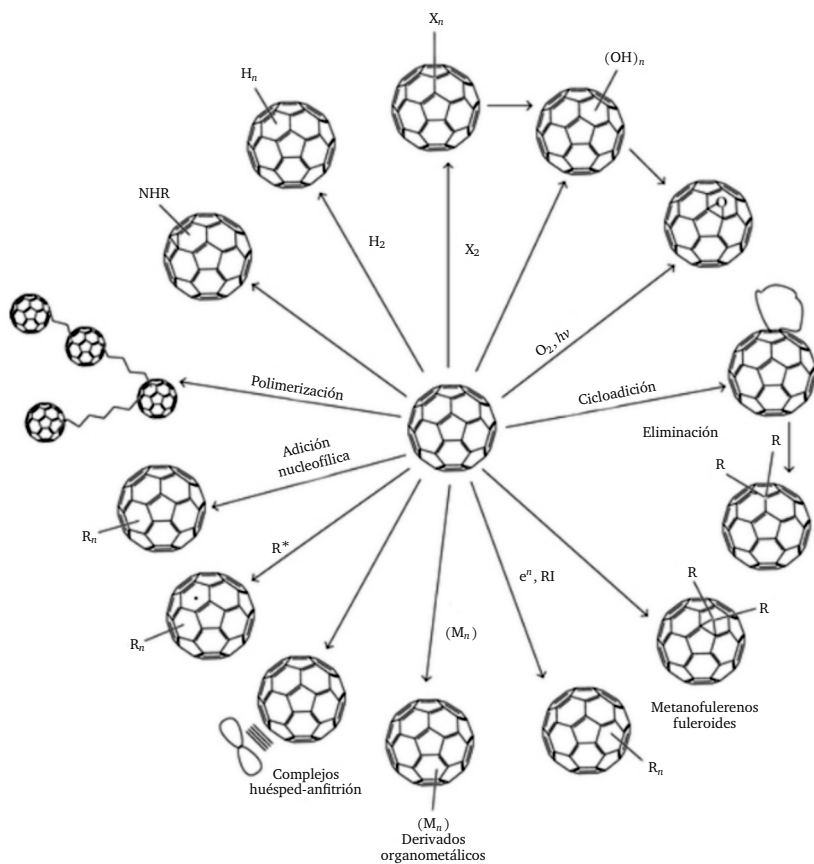


FIGURA 2. Esquema de las diferentes reacciones de la sustancia C₆₀, es decir, de moles de C₆₀, no de la molécula individual C₆₀ (Djordjevic *et al.* 2015).

fue el mismo que se obtiene cuando, en lugar de electrones, se lanza un haz de luz, que sabemos que tiene propiedades ondulatorias y que es un tipo de energía. Quedó claro que el resultado no puede explicarse si se considera que los electrones son corpúsculos clásicos, y puso en evidencia también sus propiedades ondulatorias. Uno de los fundadores de la mecánica cuántica, el alemán Werner Heisenberg, sostuvo, en la interpretación de la llamada “Escuela de Copenhague” de los fenómenos cuánticos, que la observación desempeña un papel decisivo en el suceso y que la realidad varía, según si es observada o no. Esta interpretación de los fenómenos cuánticos es la más aceptada, pero no es la única que hay.

Como los electrones son muy pequeños y su masa es prácticamente despreciable,³⁴ al estupor inicial de la comunidad científica, y en particular el de los físicos, siguió la tranquilidad de que ese comportamiento “extraño” sólo se manifestaba cuando las entidades involucradas eran minúsculas. Entender esas “entidades ocultas” es un asunto de negociación y consenso en el seno de una determinada práctica científica, como también afirma el escocés Andrew Pickering. Es un asunto “dialéctico, en tiempo real, de acomodación y resistencia” (Pickering 1995). Por su parte, este asunto de los físicos no modificó en lo mínimo las prácticas químicas más interesadas en la producción industrial de baquelita o de amoníaco y en el control de la composición de las drogas que se consumían alegremente en todo el mundo.³⁵

Pocos años después de este experimento con electrones, se pudo repetir con protones, la partícula que conforma el núcleo atómico de los elementos que constituyen las sustancias y que tiene una masa dos mil veces mayor a la del electrón. Los resultados fueron semejantes: ante una “rendija doble” los protones muestran propiedades ondulatorias. Al poco tiempo se desarrolló la capacidad experimental de lanzar átomos y, de manera semejante a los electrones y protones, se descubrió que los átomos se difractan ante una “rendija doble”.

A finales de 1999, en una carta a la más prestigiosa revista de ciencias, la inglesa *Nature*, científicos austríacos (Arndt *et al.* 1999) anunciaron que el C₆₀, la bella molécula esférica, uno de los alótropos del carbono (Figura 1) que se puede comprar desde cualquier lugar del mundo a las diferentes compañías que la comercializan en botellas, sus-

³⁴ Sin embargo la tienen, y es de $9,1 \times 10^{-31}$ kg.

³⁵ La baquelita fue el primer plástico sintético, el amoníaco es la principal sustancia precursora de fertilizantes y explosivos, mientras que derivados de heroína y cocaína, que producía la compañía farmacéutica alemana Bayer, se vendían “legalmente” en las farmacias de Europa y Estados Unidos.

tancia simple y negra, más cara que el oro y materia prima de múltiples reacciones químicas, cuando se lanza, una molécula tras otra contra una rendija doble, ¡se difracta! Pero está muy claro que, cuando sale del instrumento que lo lanza contra la “rendija doble”, es una molécula esférica y que, cuando llega al detector, también lo es (Figura 3). En el trayecto, esa molécula esférica con sesenta átomos de carbono, deja de ser material y después se reintegra como tal. En cuanto molécula individual, en este experimento se alcanza el límite material de existencia de la sustancia química.

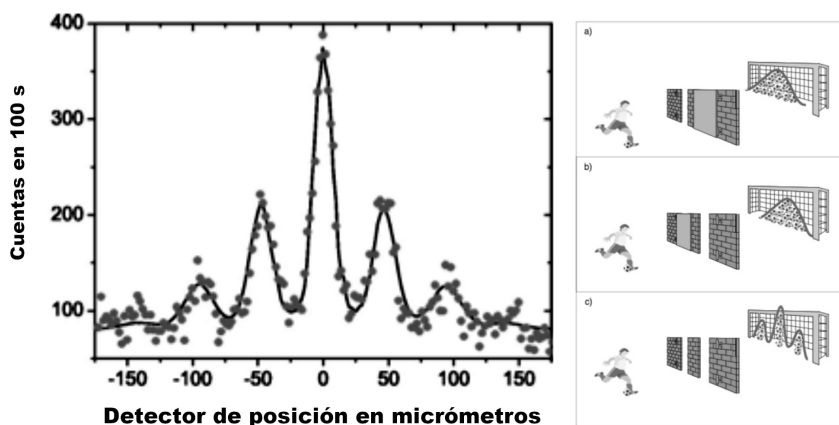


FIGURA 3. Resultado del experimento de la doble rendija y analogía entre las pelotas de fútbol y las moléculas de C_{60} en el experimento (Arndt *et al.*, 2002).

Ya se han hecho experimentos semejantes con moléculas de más de 2000 átomos sintetizadas por químicos a petición de los físicos a cargo de esos proyectos (Fein *et al.* 2019). Pronto se espera difractar virus, la sustancia viva³⁶ conocida más pequeña. Es muy importante hacer notar que, para los químicos, lo importante es cómo sintetizar sustancias con determinadas propiedades, consolidar sus prácticas profesionales y no si esas sustancias, en un momento determinado en un contexto experimental específico alejado de dichas prácticas, dejan de serlo.³⁷ Desde sus prácticas materiales obstinadas, estabilizadas y exitosas (Kim

³⁶ Se trata de una simplificación, puesto que los virus viven cuando están dentro de las bacterias; aislados son cristalinos. Su realidad vital depende del contexto.

³⁷ La interpretación de estos resultados aún no está clara, aunque el otorgamiento del premio Nobel de Física a Serge Haroche y a David J. Wineland en 2012 por

2014), la inmaterialidad de la molécula individual parece ser un límite, pero no lo es. Las sustancias químicas, en su condición macroscópica, observable, con una existencia independiente “en botellas”, tienen propiedades relacionales que se sujetan a un contexto... el de su posible reacción.³⁸

3. *A manera de conclusión*

La palabra “sustancia” no designa aquello que “subyace”, impenetrable por la historia, sino lo que reúne una multiplicidad de agentes y hace de ellos un todo coherente y estable. Una sustancia se parece más al hilo que enlaza las perlas de un collar que a la roca viva que permanece inalterable sin importar lo que se edifique encima [...] sustancia es un nombre que designa la estabilidad de un conjunto.

(Latour 2001, p. 181.)

Como se ha presentado, la química es una disciplina desarrollada hace poco más de doscientos años que aglutina una diversidad de prácticas experimentales, es decir, una serie de actividades coordinadas y compartidas (reglas, técnicas, propósitos, creencias) que se disciplinan³⁹ y a través de las cuales se construyen y transforman las sustancias. Todo ello se cultiva mediante el empleo de normas o procedimientos “correctos” que tienen una estructura estable y una capacidad de reproducirse a través de diferentes procesos de aprendizaje, muchos de ellos tácitos.

En las prácticas de la química, el laboratorio, académico o industrial, es el lugar central, el sitio donde se lleva a cabo el experimento químico (Chamizo 2013a). Los experimentos químicos involucran sustancias químicas, es decir, una cantidad enorme de entidades microscópicas, moléculas o iones que en las reacciones químicas se miden en moles. Hay una ontología para las primeras y otra para las segundas. Al participar de una práctica se sabe qué hacer y qué decir, aunque una parte del conocimiento de la misma sea tácito. Hace veinte años que los

sus extraordinarios experimentos en la manipulación de sistemas cuánticos individuales —en lo que se conoce como “enredo” (*entanglement*)— apunta una posible explicación.

³⁸ En este sentido, 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.

³⁹ En ambos sentidos de la palabra “disciplina”.

físicos lograron difractar moléculas que en cantidades molares constituyen sustancias químicas, es decir, que existen independientemente en botellas. Este experimento no modificó las prácticas químicas salvo para sintetizar nuevas sustancias con propiedades específicas y que en cantidades moleculares puedan ser difractadas.

Ya Bensaude-Vincent *et al.* 2011 reconoció que, en lugar de ser taxonómica, la diferencia entre la ciencia y la tecnociencia apela a diferentes propósitos de investigación y que son éstos los que configuran prácticas distintas. Lo anterior apunta a considerar a la química fundamentalmente como una tecnociencia.⁴⁰ Como tales, las prácticas químicas no buscan descubrir una única esencia ontológica de las sustancias químicas, sino más bien reconocer que en sus trayectorias diferentes y entrelazadas, con sus límites particulares, las sustancias químicas no son un fin, sino un principio. Lo que, en términos más generales, lleva a la autora mencionada a sostener que:

Esta propuesta es una invitación a los filósofos de la ciencia a tomar en serio la noción de “tecnociencia” para abordar una serie de preguntas que se han descuidado hasta ahora, incluso en el contexto de la filosofía del experimento, del modelaje o de las prácticas científicas. Sugerimos que la perspectiva de la “tecnociencia” puede estimular el debate no sólo sobre la ontología de los objetos de investigación, sino también sobre el papel de la teoría en diferentes contextos de investigación, sobre diferentes estilos de razonamiento científico, sobre diferentes interpretaciones de la tecnología, sobre el modelaje y la explicación o sobre el papel de las leyes de conservación en las prácticas de investigación [...] En el caso de la ciencia, la ontología de los objetos depende de la ontología de los hechos. (Bensaude-Vincent *et al.* 2011, pp. 370–372)⁴¹

Notas bibliográficas

Achinstein, Peter, 2001, “Who Really Discovered the Electron?”, en Jed Buchwald y Andrew Warwick (comps.), *Histories of the Electron. The Birth of Microphysics*, The MIT Press, Cambridge. <<https://doi.org/10.1017/S0007087404346686>>.

⁴⁰ Es decir: “La tecnociencia es, por lo tanto, un tipo de investigación donde la representación teórica y la intervención técnica no pueden mantenerse separadas incluso en el pensamiento. En el caso de los experimentos de laboratorio, esto significa que no solo es posible distinguir, para un efecto observado, la contribución de los investigadores con sus instrumentos de la contribución de la naturaleza” (Bensaude-Vincent 2011, p. 368).

⁴¹ Deseo agradecer a los doctores Jorge Morgado y Elías Okon por sus atinados comentarios sobre la difracción del C₆₀.

- Aldersey-Williams, Hugh, 1995, *The Most Beautiful Molecule. The Discovery of the Buckyball*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- Arabatzi, Theodore, 2008, "Experimenting on (and with) Hidden Entities: The Inextricability of Representation and Intervention", en Uljana Feest, Hans-Jörg Rheinberger, Jutta Schickore y Friedrich Steinle (comps.), *Generating Experimental Knowledge. Experimental Systems, Concept Formation and the Pivotal Role of Error*, Max Planck Institute for the History of Science, Berlín.
- Arndt, Markus, Olaf Nairz, Julian Vos-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw y Anton Zeilinger, 1999, "Wave-Particle Duality of C₆₀ Molecules", *Nature*, no. 401, pp. 680-682. <<https://doi.org/10.1038/44348>>.
- Arndt, Markus, Olaf Nairz y Anton Zeilinger, 2002, "Interferometry with Large Macromolecules: Quantum Paradigm Tested in the Mesoscopic World", en Reinhold A. Bertlmann y Anton Zeilinger (comps.), *Quantum (Un)Speakables. From Bell to Quantum Information*, Springer-Verlag, Berlín, pp. 333-350.
- Bachelard, Gaston, 2001, *La filosofía del no. Ensayo de una filosofía de un nuevo espíritu científico*, trad. N. Fiorito de Labruno, Amorrortu, Buenos Aires.
- Baird, Davis y Ashley Shew, 2004, "Probing the History of Scanning Tunneling Microscopy", en Davis Baird, Alfred Nordmann y Joachim Schummer (comps.), *Discovering the Nanoscale*, IOS Press, Ámsterdam.
- Bensaude-Vincent, Bernadette y Jonathan Simon, 2008, *Chemistry. The Impure Science*, Imperial College Press, Londres. <<https://doi.org/10.1007/s10698-011-9132-y>>.
- Bensaude-Vincent, Bernadette, Sacha Loeve, Alfred Nordmann y Astrid Schwartz, 2011, "Matters of Interest: The Objects of Research in Science and Technoscience", *Journal for General Philosophy of Science*, vol. 42, no. 2, pp. 365-383.
- Buchwald, Jed, 2014, "Sobre cómo el éter generó el micromundo", en Lorraine Daston (comp.), *Biografías de los objetos científicos*, La Cifra Editorial, México.
- Caldin, Edward F., 2002, "The Structure of Chemistry in Relation to the Philosophy of Science", *HYLE. International Journal for the Philosophy of Chemistry*, vol. 8, no. 2, pp. 103-121.
- Canales, Jimena, 2009, *A Tenth of a Second. A History*, The University of Chicago Press, Chicago. <<https://doi.org/10.7208/9780226093208>>.
- Cartwright, Nancy, 1983, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press, Oxford. <<https://doi.org/10.2307/2219075>>.
- Chalmers, Alan, 2009, *The Scientist's Atom and the Philosopher's Stone. How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms*, Springer, Dordrecht. <<https://doi.org/10.1007/978-90-481-2362-9>>.
- Chamizo, José Antonio, 2013a, "About the Chemical Experiment", en Jean-Pierre Llored (comp.), *The Philosophy of Chemistry. Practices, Methodologies and Concepts*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9364-3_1>.

- Chamizo, José Antonio, 2013b, "Technochemistry. One of the Chemists Way of Knowing", *Foundations of Chemistry*, vol. 15, no. 2, pp. 157–170. <<https://doi.org/10.1007/s10698-013-9179-z>>.
- Chamizo, José Antonio, 2014, "The Role of Instruments in Three Chemical Revolutions", *Science & Education*, vol. 23, no. 4, pp. 955–982. <<https://doi.org/10.1007/s11191-014-9678-x>>.
- Chamizo, José Antonio, 2017, "The Fifth Chemical Revolution: 1973–1999", *Foundations of Chemistry*, vol. 19, no. 2, pp. 157–179. <<https://doi.org/10.1007/s10698-017-9280-9>>.
- Chamizo, José Antonio, 2019a, "Las sustancias químicas, antes y después de la construcción de la Tabla Periódica", *Educación Química*, vol. 30, no. 4, pp. 98–107. <<http://dx.doi.org/10.1080/13540602.2013.741841>>.
- Chamizo, José Antonio, 2019b, "About Continuity and Rupture. The Fourth Chemical Revolution: 1945–1966", *Foundations of Chemistry*, vol. 21, no. 1, pp. 11–29. <<https://doi.org/10.1007/s10698-018-9308-9>>.
- Chamizo, José Antonio y Andoni Garritz, 2014, "Historical Teaching of Atomic and Molecular Structure", en Michael R. Matthews (ed.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, Springer, Dordrecht. <<https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8>>.
- Chang, Hasok, 2012, *Is Water H₂O? Evidence, Realism and Pluralism*, Springer, Dordrecht. <<https://doi.org/10.1007/978-94-007-3932-1>>.
- Clow, Archibald y Nan Clow, 1952, *The Chemical Revolution. A Contribution to Social Technology*, Batchworth Press, Londres.
- Crosland, Maurice, 2005, "Early Laboratories c. 1600–c. 1800 and the Location of Experimental Science", *Annals of Science*, vol. 62, no. 2, pp. 233–253.
- Djordjevic, Aleksandar, Branislava Srdjenovic, Mariana Seke, Daniljela Petrovic, Rade Injac y Jasminka Mrdjanovic, 2015, "Review of Synthesis and Antioxidant Potential of Fullerene Nanoparticles", *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, pp. 1–15.
- Fein, Yaakov, Philipp Geyer, Patrick Zwick, Filip Kialka, Sebastian Pedalino, Marcel Mayor, Stefan Guerlich y Markus Arndt, 2019, "Quantum Superposition of Molecules Beyond 25 kDa", *Nature Physics*, vol. 15, no. 12, pp. 1242–1245. <<https://doi.org/10.1038/s41567-019-0663-9>>.
- Gutting, Gary, 1984, "Paradigms, Revolutions, and Technology", en Rachel Laudan (comp.), *The Nature of Technological Knowledge. Are Models of Scientific Change Relevant?*, Dordrecht, Boston. <<https://doi.org/10.18128/D010>>.
- Hacking, Ian, 1983, *Representing and Intervening. Introductory Topics in the Philosophy of Natural Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge. <<https://doi.org/10.1017/S0012217300046084>>.
- Hendry, Robin Findlay, 1999, "Molecular Models and the Question of Physicalism", *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 5, pp. 117–134.
- Holmes, Frederic y Trevor Levere (comps.), 2000, *Instruments and Experimentation in the History of Chemistry*, The MIT Press, Cambridge. <<https://doi.org/10.1021/ed078p1027>>.

- Humphreys, Paul, 2011, "Computational Science and its Effects", en Martin Carrier y Alfred Nordmann (comps.), *Science in the Context of Application*, Boston Studies in the Philosophy of Science, vol. 274, Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14553-2_1_1>.
- IUPAC, 2014, *Compendium of Chemical Terminology (Gold Book)*, Version 2.3.3, Alan D. McNaught y Andrew Wilkinson (comps.), Blackwell Scientific Publications, Oxford. <<https://doi.org/10.1351/goldbook>>.
- Izquierdo, Mercè, 2010, "La transformación del átomo químico en una partícula física ¿se puede realizar el proceso inverso?", en José Antonio Chamizo (coord.), *Historia y filosofía de la química*, FQ-UNAM/Siglo XXI, México.
- Jensen, William B., 2010, "Four Centuries of Atomic Theory", en Carmen J. Giunta (comp.), *Atoms in Chemistry: From Dalton's Predecessors to Complex Atoms and Beyond*, American Chemical Society, Oxford University Press, Washington.
- Kekulé, August von, 1867, "On Some Points of Chemical Philosophy", *The Laboratory I*, julio 27, reimpresso en Richard Anschütz, 1929, *Der Chemiker August Kekulé*, vol. 2, Verlag Chemie, Berlín.
- Kim, Mi Gyung, 2014, "Stabilizing Chemical Reality: The Analytic-Synthetic Ideal of Chemical Species", *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 20, no. 1, pp. 117-139.
- Klein, Ursula, 1996, "The Chemical Workshop Tradition and the Experimental Practice: Discontinuities within Continuities", *Science in Context*, vol. 9, no. 3, pp. 251-287. <<https://doi.org/10.1017/S0269889700002507>>.
- Klein, Ursula, 2012, "Objects of Inquiry in Classical Chemistry: Material Substances", *Foundations of Chemistry*, vol. 14, no. 1, pp. 7-23. <<https://doi.org/10.1007/s10698-011-9122-0>>.
- Klein Ursula y Wolfgang Lefevre, 2007, *Materials in Eighteenth-Century Science. A Historical Ontology*, The MIT Press, Cambridge. <<https://doi.org/10.1002/ange.200785534>>.
- Kuhn, Thomas Samuel, 1971, *La estructura de las revoluciones científicas*, trad. A. Contín, Fondo de Cultura Económica, México.
- Latour, Bruno, 2001, *La esperanza de Pandora. Ensayos sobre la realidad de los estudios de la ciencia*, trad. T. Fernández Aúz, Gedisa, Barcelona.
- Latour, Bruno, 2005, *Reassembling the Social. An Introduction to Actor-Network-Theory*, Oxford University Press, Oxford. <<https://doi.org/10.1080/10967490701515606>>.
- Laurent, Brice, 2015, "Operations for a Problem of Existence: Dealing with the Ontological Uncertainty of Nano Substances", *Foundations of Chemistry*, vol. 17, no. 3, pp. 207-224. <<https://doi.org/10.1007/s10698-015-9233-0>>.
- Lavoisier, Antoine Laurent de, 1990, *Tratado elemental de química*, edición facsimilar, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Lewowicz, Lucía y Olimpia Lombardi, 2013, "Stuff versus Individuals", *Foundations of Chemistry*, vol. 15, no. 1, pp. 65-77. <<https://doi.org/10.1007/s10698-012-9152-2>>.

- Lombardi Olimpia y Ana Rosa Pérez Ransanz, 2012, *Los múltiples mundos de la ciencia. Un realismo pluralista y su aplicación a la filosofía*, Siglo XXI, México.
- Martínez, Sergio y Xiang Huang, 2015, *Hacia una filosofía de la ciencia centrada en prácticas*, Bonilla Artigas-IIF-UNAM, México. <<https://doi.org/10.22201/iifs.18704905e.2018.06>>.
- McEvoy, John, 2010, *The Historiography of the Chemical Revolution. Patterns of Interpretation in the History of Science*, Pickering and Chatto, Londres. <<https://doi.org/10.1086/670095>>.
- Montellano López, Alejandro, Aurelio Mateo-Alonso y Maurizio Prato, 2011, "Materials Chemistry of Fullerene C₆₀ Derivatives", *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 5, pp. 1305–1318. <<https://doi.org/10.1039/C0JM02386H>>.
- Nelson, Peter, 2013, "What is the Mole?", *Foundations of Chemistry*, vol. 15, no. 1, pp. 3–11. <<https://doi.org/10.1007/s10698-013-9185-1>>.
- Nye, Marie, 1970, *Jean Perrin and Molecular Reality*, University of Wisconsin, Madison.
- Olivé, León, 2008, "Representaciones, producción de conocimiento y normatividad: un enfoque naturalizado", en José M. Esteban y Sergio Martínez (comps.), *Normas y prácticas en la ciencia*, Instituto de Investigaciones Filosóficas-UNAM, México.
- Olivé, León, 2010, "Prólogo", en José Antonio Chamizo (coord.), *Historia y filosofía de la química*, FQ-UNAM/Siglo XXI, México.
- Pickering, Andrew, 1995, *The Mangle of Practices: Time, Agency and Science*, Chicago University Press, Chicago. <<https://doi.org/10.2307/3106908>>.
- Polanyi, Michael, 1966, *The Tacit Dimension*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Preston, Beth, 2013, *A Philosophy of Material Culture. Action, Function, and Mind*, Routledge, Nueva York. <<https://doi.org/10.4324/9780203069844>>.
- Rabkin, Yakob, 1993, "Uses of Instruments in Chemistry", en Seymour H. Mauskopf (comp.), *Chemical Sciences in the Modern World*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia.
- Ruthenberg, Klaus, 2009, "Paneth, Kant, and the Philosophy of Chemistry", *Foundations of Chemistry*, vol. 11, no. 2, pp. 79–91. <<https://doi.org/10.1007/s10698-009-9064-y>>.
- Scerri, Eric R., 2007, "The Ambiguity of Reduction", *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 13, no. 2, pp. 67–81.
- Schummer, Joachim, 1998, "The Chemical Core of Chemistry I. A Conceptual Approach", *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 4, no. 2, pp. 129–162.
- Schummer, Joachim, 2004, "Substances versus Reactions", *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 10, no. 1, pp. 3–4.
- Schummer, Joachim, 2006, "The Philosophy of Chemistry: From Infancy Toward Maturity", en Davis Baird, Eric Scerri y Lee McIntyre, *Philosophy of*

- Chemistry. Synthesis of a New Discipline*, Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9368-5_7>.
- Schummer, Joachim, 2011, “La filosofía de la química. De la infancia hacia la madurez”, en Davis Baird, Eric Scerri y Lee McIntyre (coords.), *Filosofía de la química. Síntesis de una nueva disciplina*, trad. G. Noriega, Fondo de Cultura Económica, México.
- Tilley, Christopher, Webb Keane, Susanne Küchler, Michael Rowlands y Patricia Spyer (comps.), 2006, *Handbook of Material Culture*, Sage Publications, Thousand Oaks. <<http://dx.doi.org/10.4135/9781848607972>>.
- Van Berkel, Berry, Wobbe De Vos, Adri H. Verdonk y Albert Pilot, 2000, “Normal Science Education and its Dangers: The Case of School Chemistry”, *Science & Education*, vol. 9, nos. 1–2, pp. 123–159. <<https://doi.org/10.1023/A:1008765531336>>.
- Van Brakel, Jaap, 2000, *Philosophy of Chemistry, Between the Manifest and the Scientific Image*, Leuven University Press, Lovaina.
- Van Brakel, Jaap, 2012, “Substances: The Ontology of Chemistry”, en Andrea I. Woody, Robin Findlay Hendry y Paul Needham (eds.), *Philosophy of Chemistry*, Elsevier, Oxford.
- Van Brakel, Jaap, 2014, “Philosophy of Science and Philosophy of Chemistry”, *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 20, no. 1, pp. 11–57.
- Williamson, Alexander, 1851–1854, *Notices of the Proceedings at the Meetings of the Members of the Royal Institution*, vol. 1, 90, reimpresso en A.W. Williamson, 1949, “Papers on Etherification and on the Constitution of Salts”, *The Alembic Club*, Edimburgo, pp. 18–20.
- Wray, K. Brad, 2018, “The Atomic Number Revolution in Chemistry: A Kuhnian Analysis”, *Foundations of Chemistry*, vol. 20, no. 3, pp. 209–217. <<https://doi.org/10.1007/s10698-017-9303-6>>.

Recibido el 16 de septiembre de 2020; revisado el 8 de diciembre de 2020; aceptado el 5 de enero de 2021.