

Introducción a la Filosofía de la Química

Martín Labarca - Sebastian Fortin (Eds.)

En la filosofía contemporánea de las ciencias, una de las subdisciplinas de mayor crecimiento en las últimas décadas ha sido la filosofía de la química, cuyo origen se remonta a mediados de la década de 1990. El gran interés que ha despertado la disciplina en América Latina ha sido muy significativo para el campo. Este libro pretende llenar un vacío en el ámbito latinoamericano, colocando en primer plano las perspectivas que emergen de diferentes enfoques disciplinarios. El volumen incluye colaboraciones de investigadores de Chile, Brasil y Argentina. Los trece capítulos se proponen reflejar el estado del arte de cada uno de los tópicos tratados, mostrando aspectos de la ciencia química desde diferentes perspectivas de análisis. El propósito general es introducir a educadores y estudiantes de química, así también como a químicos, historiadores y filósofos de la ciencia en los debates actuales más relevantes en el ámbito de la filosofía contemporánea de la química.



BellaTerra
Sociedad Chilena de Didáctica,
Historia y Filosofía de la ciencia

Introducción a la Filosofía de la Química / Labarca, Martín; Fortin, Sebastian (Editores). 1° edición, Sociedad Chilena de Didáctica, Historia y Filosofía de la Ciencias Bella Terra Ltda., Santiago de Chile, Chile, 2023.

1. Filosofía de la química. 2. Historia de la química. 3. Fundamentos de la química.

Editores

Martín Labarca

CONICET y Universidad de Buenos Aires, Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

Sebastian Fortin

CONICET y Universidad de Buenos Aires, Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

Autores

Ronei Mocellin, Universidade Federal do Paraná, Brasil.

Luciana Zaterka, Universidade Federal do ABC, Brasil.

Alfio Zambon, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina.

Fiorela Alassia, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina.

Cristian López, Universidad de Buenos Aires, Argentina y Universidad de Lausanne, Suiza.

María José Ferreira Ruiz, Universität Bielefeld, Alemania.

Hernán Accorinti, CONICET y Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Mario Quintanilla-Gatica, Universidad Católica de Chile, Chile.

Mariana Córdoba, CONICET y Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Martín Labarca, CONICET y Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Sebastian Fortin, CONICET y Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Título: Introducción a la Filosofía de la Química

Editores: Labarca, Martín; Fortin, Sebastian

Editorial: Sociedad Chilena de Didáctica, Historia y Filosofía de la Ciencias Bella Terra Ltda.

Lugar: Santiago de Chile, Chile

Año: 2023

Número de inscripción 2023-A-12437

ISBN 978-956-416-697-1

Diseño editorial: Martín Labarca y Sebastian Fortin

Diseño de portada: Nicolás Martínez - Maximiliano Martínez - Martín Labarca

Coordinación editorial: Martín Labarca y Sebastian Fortin

Las opiniones expuestas en los trabajos publicados en esta colección son de la exclusiva responsabilidad de sus autores.

INTRODUCCIÓN A LA FILOSOFÍA DE LA QUÍMICA

MARTÍN LABARCA – SEBASTIAN FORTIN (Eds.)

CAPÍTULO 2

La concepción de ‘elemento químico’: desde la Antigüedad a las discusiones actuales

Alfio Zambon y Fiorela Alassia

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

*Lo supieron los arduos alumnos de Pitágoras:
los astros y los hombres vuelven cíclicamente;
los átomos fatales repetirán la urgente
Afrodita de oro, los tebanos, las ágoras.*

Jorge Luis Borges, “La noche cíclica”

1. Introducción

El problema de la naturaleza de los elementos tiene un origen lejano. Es posible rastrearlo en los inicios de la filosofía, en los pensadores presocráticos. Sin embargo, interpretando libremente a Borges en el verso del poema que usamos como epígrafe, ‘...los hombres vuelven cíclicamente’ sobre él. Así como ‘lo supieron los arduos alumnos de Pitágoras’ (y las otras escuelas filosóficas de la época), parafraseando -y tal vez forzando- la hipálage de Borges, los ‘arduos’ interesados en los fundamentos de la química actuales se enfrentan a un problema que, a primera vista, parece relativamente asequible y que, sin embargo, a poco de internarse en los vericuetos teóricos que lo constituyen, se vuelve poblado de complejidad, desconcierto, contradicciones, dudas. Así, las certezas iniciales se diluyen irremisiblemente en un laberinto conceptual.

En este capítulo abordaremos el problema siguiendo un hilo conductor histórico, desde los presocráticos hasta las discusiones actuales. Plantearemos en un nivel general -en parte, superficial- los aspectos salientes de cada periodo e indagaremos en algunas posiciones discutidas en la actual filosofía de la química.

2. El concepto de ‘elemento’ en la Grecia clásica: de Tales de Mileto a Epicuro

El término ‘elemento’ puede entenderse en diversos sentidos, según el sistema filosófico que lo incorpore. Las primeras reflexiones acerca de la naturaleza surgieron en la filosofía

jónica en el siglo V a. C. La cuestión del *principio de todas las cosas* fue el problema central de la filosofía presocrática, a partir del cual se bosquejaron diversas posturas. Se considera que con Tales de Mileto (hacia 639-547 a. C.) comenzó la filosofía de la *physis*, término griego que significa “naturaleza” en el sentido originario de realidad primera y fundamental (Colli, 2009).

Una primera tentativa de solución apareció en la dupla conceptual de materia y forma. Los principales filósofos milesios veían en la materia el fundamento primero del mundo. Tales de Mileto fue el primero en afirmar la existencia de un único principio originario de todas las cosas: el agua. Consideraba que este principio natural era el unificador de todos los procesos materiales del mundo. Anaximandro (hacia 610-546 a. C.), uno de sus discípulos, sustituyó el agua por una idea más abstracta, el *ápeiron*, que denotaba ‘aquello que carece de límites’. Otro pensador de la misma escuela, Anaxímenes (hacia 590-528 a. C.), propuso al aire, al cual le asignó las propiedades del *ápeiron* por poseer infinitud y movimiento perpetuo.

Por su parte, durante aproximadamente el mismo período, la llamada escuela pitagórica se centró en la forma. Los pitagóricos sostuvieron que los principios de la matemática eran, a su vez, los principios de la naturaleza. Dado que en la matemática los números son los principios iniciales, consideraban que los mismos eran los elementos primigenios de todo lo existente.

Otro aporte relevante de la época fue el de Heráclito de Éfeso (hacia 544-484 a. C.), para quien el devenir, el permanente cambio, era un principio más fundamental que la materia y la forma. Heráclito identificó al fuego como el elemento que ocupaba el lugar de principio de la naturaleza, ya que podía explicar el incesante devenir del mundo con su extrema movilidad. Sin embargo, puede decirse que en su doctrina el fuego pierde su carácter corpóreo y pasa a concebirse como un principio activo, inteligente y creador (Colli, 2009).

A Heráclito se lo suele contraponer conceptualmente a Parménides (hacia siglo V a.C.), perteneciente a la escuela de Elea. Parménides fue un gran innovador: gracias a él se produjo un profundo cambio conceptual con el surgimiento de la *ontología* o ‘teoría del Ser’. Para el epistemólogo Karl Popper (1999), fue el primer filósofo que construyó un sistema deductivo, lo cual hizo posible el posterior reconocimiento, por parte de Leucipo y Demócrito, de que una teoría deductiva del mundo (como la creada por Parménides) sólo podría ser hipotético-deductiva.

Las líneas de pensamiento mencionadas anteriormente tuvieron en común la idea de un único principio generador de todas las cosas. El surgimiento de la *doctrina de los cuatro elementos*, formulada por Empédocles de Agrigento (hacia 490-432 a. C.), significó un cambio al respecto. Esta doctrina, que tuvo una gran influencia durante los siglos posteriores, sostenía que los elementos primigenios eran cuatro: fuego, aire, agua y tierra, y que a partir de sus combinaciones en diferentes proporciones se formaban las sustancias complejas y cambiantes que hay en el mundo (Colli, 2009).

Otra de las propuestas más radicalmente innovadoras fue la *doctrina atomista*, propuesta por Leucipo (hacia siglo IV a. C.) y desarrollada por su principal discípulo, Demócrito de Abdera (hacia 460-370 a.C.). Para el atomismo, los principios fundamentales eran unos corpúsculos diminutos denominados ‘átomos’, entidades consideradas indivisibles, eternas y de la misma naturaleza, aunque diferentes entre sí en magnitud y forma. Esta doctrina consideraba que existía una distinción fundamental entre la división matemática y la división física. La primera no tenía correspondencia en la realidad material y, en principio, era prosequible hasta el infinito. En cambio, la segunda estaba condicionada por la naturaleza de la materia a dividir, proceso que podía proseguir solamente hasta cierto límite. A partir de la limitación para dividir los cuerpos materiales se llegaba a una entidad *limitante*, que era el átomo. Demócrito también apeló, si bien de forma accesoria, al concepto de vacío y a la idea de movimiento eterno.

Los atomistas estaban de acuerdo con el principio fundamental de la escuela de Elea, según el cual ‘sólo el ser es’, e intentaron llevar este principio teórico a la experiencia sensible. Para la percepción humana, las cosas son diferentes (en figura, forma, color, etc.), pero sin embargo, están compuestas únicamente de átomos. La teoría atómica no sólo fue importante como explicación de los fenómenos de la experiencia sino que también permitió establecer el principio metodológico según el cual una teoría o explicación deductiva debe ‘salvar las apariencias’, esto es, ser concordante con la experiencia (Popper, 1963, p.112).

En el siglo IV a .C, tanto Platón (hacia 427-347 a. C.) como Aristóteles (hacia 384-322 a. C.) incorporaron en su sistema filosófico la doctrina de los cuatro elementos. Para Platón, la naturaleza podía explicarse mediante la *doctrina de los triángulos*. Como figuras bidimensionales, los triángulos son incorpóreos. Pero si se los combina adecuadamente, pueden formar cuerpos tridimensionales regulares o *sólidos platónicos*. Platón asimiló la doctrina de los cuatro elementos, pero otorgándole a cada uno de ellos un sustrato geométrico (ver Figura 1).

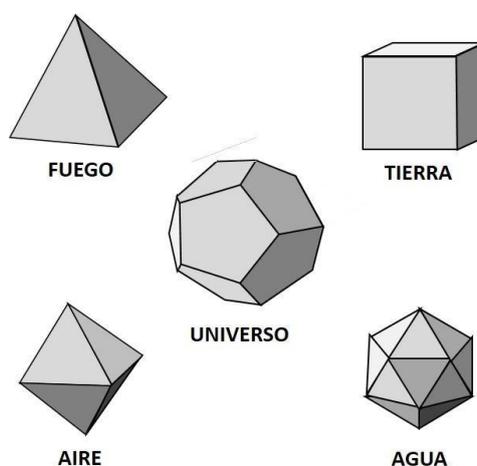


Figura 1. Los cinco sólidos platónicos

Aristóteles fue un agudo crítico de Demócrito. A él se debe la primera elaboración del concepto de *materia (hyle)*. A diferencia del atomismo, rescató las cualidades materiales según la realidad experimentada o tangible. Fue también el primero en ver claramente la distinción entre una *mezcla (synthesis)* y lo que sería más tarde denominado un *compuesto químico (mixis)*. Es precisamente en este punto, según Aristóteles, donde el atomismo fallaba por no poder dar cuenta de que las cualidades del nuevo material compuesto (*mixis*) no son la sumatoria de las cualidades de los materiales originales.

Aristóteles también planteó el problema de la divisibilidad de la materia. Propuso que existía una diferencia cualitativa entre las partículas más pequeñas de un material y las de otro, fenómeno al que denominó *minima naturalia* y que puede entenderse como la mínima parte en la que cada sustancia natural homogénea podía dividirse y conservar su carácter esencial. Este supuesto desempeñó un importante papel durante siglos, incluso más allá de la Edad Media. En esa noción es posible reconocer tanto el origen de las moléculas de la química moderna como la distinción entre *átomo* y *molécula*, sin lugar en el atomismo griego (Ströker, 1968).

En relación a su adopción de la doctrina de los cuatro elementos, Aristóteles consideraba que existía una única materia primera, la cual recibe su apariencia perceptible por las cuatro cualidades: caliente, frío, húmedo y seco. Estas cualidades se combinaban de dos en dos para dar lugar a los cuatro elementos. Así, cada elemento tenía una cualidad común y otra distinta respecto de los otros elementos, haciendo posible la transformación de un elemento en otro (ver Figura 2).

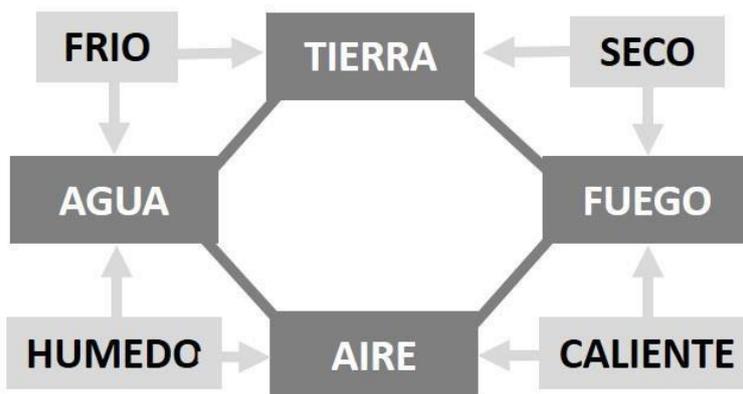


Figura 2. Los cuatro elementos y las cualidades aristotélicas

La ontología atomista fue retomada por Epicuro (hacia 340-270 a. C.) para expresar los fundamentos de una visión materialista de la naturaleza. La concepción del átomo de Epicuro era diferente a la de los presocráticos, dado que les asignó peso, además de figura y tamaño. También postuló la existencia de un movimiento de caída debido al peso de los átomos. Para explicar por qué los átomos no caían en trayectorias paralelas hasta el infinito, postuló la *teoría de la declinación de los átomos*, según la cual los átomos podían desviarse en cualquier momento y en cualquier punto respecto de la línea recta (Reale y Antisiere, 1988).

3. Átomos y elementos durante la Edad Media y el Renacimiento

Durante la Edad Media (siglos V a XV), el pensamiento occidental estuvo dominado por la Iglesia Católica, institución que adoptó de un modo prácticamente unánime una posición de rechazo hacia el atomismo. La aversión respecto de entidades indivisibles y de la idea de una sustancia primordial única de la cual derivaría el conjunto del mundo material fue expresada claramente por San Agustín (354-430), cuyas posturas fueron de mucho peso en el establecimiento y la evolución de la doctrina cristiana. La materialidad

del alma, inferida en la concepción atomista, era inaceptable para la Iglesia. Sin embargo, entre los cristianos medievales también hubo partidarios de la teoría atómica. El más importante fue Guillermo de Ockham (1285-1347). Para Ockham, la sustancia se reducía a la extensión y las cualidades por medio de las cuales la percibimos resultaban únicamente de las diversas combinaciones de los componentes o *partes elementales* de la materia. Estas partes elementales eran, básicamente, los átomos postulados por Demócrito y Epicuro (Pullman, 1995).

Durante el comienzo del período renacentista en los siglos XV y XVI se produjo una clara revitalización del atomismo. El aporte más trascendente lo brindó el sacerdote, filósofo y científico Pierre Gassendi (1592-1655), quien propuso una versión del atomismo conciliada con los dogmas cristianos. Del atomismo griego eliminó el materialismo (que excluía a la creación divina) y el mecanicismo (que negaba la finalidad de la naturaleza). Pero conservó lo esencial de la doctrina epicúrea: las nociones de *átomo* y de *vacío*. En su propuesta, los átomos, que eran indivisibles, invisibles y diferentes en peso y tamaño, fueron creados por Dios en un número desmesurado, pero no infinito. Los átomos se podían desplazar por el vacío, donde chocaban entre sí, dando lugar a la formación de los cuerpos. Para Gassendi, estos choques no eran azarosos sino dirigidos por la voluntad divina (Reale y Antisiere, 1988).

También en el período renacentista se produjo en Europa el surgimiento de la *iatroquímica*, una práctica con claros vestigios medievales y con una importante influencia alquímica. Fue fundada por Paracelso (1493-1541), quien introdujo una nueva concepción de la materia. Paracelso mantuvo los cuatro elementos aristotélicos, pero los despojó de su carácter de portadores de propiedades, otorgándoselo a una materia primera: el *misterium magnum* (Brock, 1998). Dado que consideraba que los cuatro elementos eran inexistentes en la naturaleza, les concibió un carácter meramente espiritual, una especie de madres de los objetos. A los cuatro elementos, Paracelso agregó los tres elementos alquímicos: azufre, mercurio y sal, a partir de los cuales propuso la llamada *doctrina de los 'tria prima'* o tres principios. Estos principios eran cualidades universales que se depositaban en los cuatro elementos (tomados como receptáculos) y que le conferían la forma y las propiedades características a cada sustancia (Brock, 1998).

Una de las críticas más profundas tanto a la doctrina de los *tria prima* como a la teoría de los cuatro elementos fue elaborada por Robert Boyle (1627-1691). En su obra cumbre de 1661, *El Químico Escéptico*, se pronunció en contra de las ideas de la preexistencia de

una forma y de los grupos de cualidades como agentes responsables de las propiedades de cada una de las sustancias de la naturaleza. En su lugar, propuso que muchos de los cuerpos que tomamos como elementos no son tales, sino que son compuestos o *cuerpos mixtos* (Brock, 1998).

El principal aporte de Boyle a la noción de elemento fue la propuesta de la teoría corpuscular, según la cual los corpúsculos eran los componentes últimos de los cuerpos. Boyle, quien además de químico era un filósofo mecanicista, encontraba la explicación final de los fenómenos naturales en principios mecánicos. Según su perspectiva, las partículas constituyentes de los cuerpos eran susceptibles de ser tratadas mecánicamente. Teniendo en cuenta la manera en que las partículas de los distintos cuerpos deberían estar dispuestas para poder reaccionar entre sí, llegó a la conclusión que los corpúsculos deberían estar en continuo movimiento. Postuló también que la intensidad del movimiento debería ir en aumento con la temperatura. Para Boyle las características mecánicas de los corpúsculos eran fundamentales, pero el comportamiento de los cuerpos no podía ser justificado solamente apelando a las particularidades mecánicas. Lo esencial eran las interacciones de los corpúsculos, siendo los fenómenos químicos los resultados de esas interacciones (Pullman, 1995).

4. La teoría del flogisto y la definición operacional de elemento de Lavoisier

La *teoría del flogisto* fue esencialmente una teoría de los elementos propuesta por el médico y químico Georg Stahl (1660-1734). Esta teoría buscó explicar los fenómenos caloríficos involucrados en los procesos de combustión y calcinación de los metales. Stahl propuso la existencia de tres tipos de tierra: la *terra fluida*, o tierra de mercurio, que le proporcionaba a las sustancias fluidez y volatilidad; la *terra lapídea* o tierra vítrea, donde residía el principio de fusibilidad, y la *terra pinguis* o tierra crasa, portadora carácter oleoso y combustible (Brock, 1998).

Una razón que favoreció la consolidación de la teoría del flogisto fue que los desarrollos teóricos de Boyle no resultaban de gran ayuda para los químicos prácticos de la época, dedicados a las incipientes industrias del vidrio, cerámica, textil y alimentaria. Por tal motivo, se retomó la teoría de los cuatro elementos, con la diferencia de que los químicos comenzaron a distinguir las teorías físicas de la materia de las teorías químicas, y aceptaron que, a los propósitos prácticos, las sustancias que no podían ser

posteriormente refinadas por medio del fuego (o de cualquier otro método analítico de separación) eran efectivamente *elementos químicos*. Esto no excluía la posibilidad de que estos *elementos* estuvieran, a su vez, compuestos por unidades físicas de materia más pequeñas, como una determinada clase de corpúsculos, pero se trataba de una posibilidad incierta y que, a los fines prácticos, podría obviarse.

Según la teoría del flogisto, la materia estaba constituida por corpúsculos (de manera similar a la propuesta de Boyle), que al unirse formaban los compuestos. Stahl suponía que había cuatro tipos básicos de corpúsculos, que tenían correspondencia con las tres *tierras* de Becher y con el agua. En la teoría del flogisto se suponía que los tipos básicos de corpúsculos se unían entre sí formando unos compuestos muy estables, llamados *principios secundarios*, que cuando se combinaban entre ellos, producían los llamados *cuerpos mixtos*. También se consideraba que todas las sustancias con propiedades inflamables contenían la *terra pinguis* o flogisto. El flogisto estaba presente en todas las sustancias combustibles y se transformaba por el calor; se desprendía en la calcinación de los metales y en la combustión de la materia orgánica; también en procesos como la respiración, la fermentación y la putrefacción. En la combustión, el flogisto se desprendía del cuerpo hacia la atmósfera. Si mediante calentamiento se le agregaba flogisto al producto resultante, se obtenía nuevamente el compuesto de partida. De esta manera, Stahl propuso que el proceso debía ser reversible. Con esta teoría se podía dar cuenta de observaciones empíricas en los procesos metalúrgicos, como la calcinación de los metales, que producían como resultado las entonces llamadas *cales* (Esteban Santos, 2001).

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1792), considerado por muchos el padre de la química moderna, en el discurso preliminar de su *Tratado Elemental de Química* publicado en 1789, expresó: “...ligamos al nombre de elementos o de principios de los cuerpos la idea del último término al que se llega mediante el análisis, todas las sustancias que no hemos conseguido descomponer mediante método alguno constituyen elementos para nosotros” (Lavoisier, 2007, p. 61). Se considera que esta definición de *elemento*, de carácter operacional, es la primera de la química moderna. En ella se encuentra resaltado el rol de la experimentación para la conceptualización de los elementos químicos, al punto de supeditar la condición de elementos a la posibilidad de aislarlos mediante operaciones de laboratorio. Además, queda de manifiesto un profundo rechazo a toda consideración metafísica (Stengers, 1989). También resulta destacable que

el concepto de elemento fue concebido de manera provisional y subordinado al poder de las técnicas de análisis. Esta definición de tipo operacional aún puede encontrarse en muchos libros de texto universitarios de amplia difusión (Bensaude-Vincent, 1989a).

5. Discusiones sobre la hipótesis atómica durante el siglo XIX: de Dalton al congreso de Karlsruhe

A principios de siglo XIX, el químico John Dalton (1766-1844) propuso la aplicación de la teoría atómica a los elementos químicos, gracias a lo cual pudo formular una hipótesis compatible con las determinaciones experimentales cuantitativas de sustancias químicas que se llevaban a cabo en la época. La principal contribución de Dalton consistió en formular una solución a un problema teórico conocido como *transducción*. La misma consistió en idear una manera de calcular los pesos relativos de las partículas últimas de la materia, a partir de mediciones que podían ser realizadas en el laboratorio. Ese cálculo de medición química implicó poder considerar a los átomos como objetos concretos de la realidad tangible. Asimismo, interpretó a las reacciones químicas como reorganizaciones o reagrupaciones de átomos contenidos en moléculas, sin que los átomos sufran ninguna alteración durante la reacción. Es posible ilustrar la posición del atomismo propuesto por Dalton a partir de cuatro premisas fundamentales:

1. Toda la materia está compuesta por átomos sólidos, indivisibles e incomprensibles.
2. Los átomos son indestructibles, por lo que conservan su identidad en cualquier reacción química
3. Los átomos de cada elemento, son iguales entre sí, pero diferentes a los de los demás elementos.
4. Cuando los átomos se combinan lo hacen con una relación de números enteros y pequeños.

La teoría atómica de Dalton permitió que los conceptos de átomo y elemento se relacionaran estrechamente, de manera que (en su versión original) cada elemento estaba formado por una cantidad enorme pero finita de átomos. Desarrollos posteriores mostraron que no todos los átomos eran iguales; revelaron que los átomos son entidades mucho más complejas que las inicialmente pensadas por Dalton y que la explicación de las relaciones entre los átomos para formar compuestos requería de una elaboración importante.

Además, la hipótesis atómica tuvo como efecto convertir en indiscutible el concepto de *proporción*, es decir, de combinación mediante unidades discretas, pero desplazó el debate hacia otro problema. ¿Cuál era la fórmula correcta? ¿Cuántos átomos había en un determinado compuesto? Estos y otros aspectos fueron temas arduamente debatidos durante el siglo XIX, si bien existía un acuerdo generalizado en la comunidad química de la época acerca de que la hipótesis atómica facilitaba una adecuada interpretación de los fenómenos químicos y constituía una relevante herramienta heurística para la enseñanza y la investigación (*cfr.*, por ejemplo, Bensaude-Vincent y Stengers, 1997; Brock, 1998).

No obstante, el centro del debate giraba en torno a la jerarquía de los átomos como entidades reales, dado que la propuesta de Dalton no proporcionaba ninguna prueba de su existencia concreta. Varios contemporáneos de Dalton se cuidaron en establecer una clara distinción entre la creencia en una teoría metafísica de la materia constituida por átomos y la prueba experimental de la ley de las proporciones combinatorias. Aun así, resultaba evidente que para poder realizar explicaciones adecuadas era fundamental contar con datos precisos de los pesos atómicos.

En 1814, el químico Hyde Wollaston (1776-1826) propuso el término *peso equivalente* como alternativo al de *peso atómico*. De esa forma, se dejaba de lado la carga metafísica, pero se conservaba el poder heurístico de los átomos. También propuso un sistema de pesos equivalentes basado en el oxígeno, al que le otorgó un peso equivalente arbitrario de 100. Las escalas de pesos atómicos y pesos equivalentes eran compatibles y también traducibles entre sí (Brock, 1998).

El congreso mundial de química celebrado en la ciudad alemana de Karlsruhe en 1860 marcó un momento clave para la historia de la química y reunió a los químicos más relevantes de la época. En ese entonces reinaba una gran confusión y ambigüedad acerca de muchos aspectos de la disciplina, como la nomenclatura y la simbología empleadas. Tampoco se había alcanzado un acuerdo acerca de la escala de pesos atómicos que debían emplearse para los elementos más comunes como carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, ni de las relaciones proporcionales entre los mismos (Brock, 1998).

Una de las consecuencias más importante de este congreso fue la revalorización de la olvidada hipótesis de Avogadro, retomada y defendida por el químico italiano Stanislao Cannizzaro (1826-1910) como una estrategia para ser aplicada en el cálculo de los pesos atómicos y moleculares. Se acordó también adoptar el sistema de pesos

atómicos propuesto por Charles Gerhardt (1816-1856), lo que trajo aparejado una mayor claridad en la exposición de nuevos hechos e ideas. También se avanzó de manera notable en el establecimiento de una notación y nomenclatura uniforme para el lenguaje químico, tomando como base la propuesta original formulada por Jöns Jacob Berzelius (1776-1848).

Por otro lado, las disputas entono a la metafísica concerniente a la teoría atómica de Dalton fueron solamente resueltas a partir de los experimentos de Jean Perrin (1870-1942) a principios del siglo XX, quien determinó el número de Avogadro mediante trece procedimientos experimentales diferentes (Bensaude-Vincent y Stengers, 1997).

6. La naturaleza dual del concepto de ‘elemento químico’: de Mendeleev a Paneth

Dimitri Mendeleev (1834-1907) fue un destacado químico cuyo mayor aporte fue sin dudas el desarrollo del sistema periódico de los elementos químicos. Hacia el año 1868, consideró que carecía del material didáctico apropiado para dictar su curso de química universitaria, lo que lo llevó a buscar una manera de presentar de forma amena y clara lo más relevante del enorme conjunto de conocimientos químicos acumulado para entonces. La enseñanza de la disciplina en esa época consistía en relacionar las propiedades de los cuerpos compuestos con las propiedades de los cuerpos simples que los formaban. Mendeleev, en cambio, infirió que las propiedades de los cuerpos simples y los compuestos presentaban una función periódica que dependía de los pesos atómicos de los elementos. A partir de esta estrategia, supuso que las propiedades fenoménicas no eran otra cosa que manifestaciones exteriores de los elementos. De esa manera, propuso que los elementos tenían un estatus más fundamental, de naturaleza metafísica, cuyo único atributo era el peso atómico.

Mendeleev se ocupó de diferenciar claramente entre los *cuerpos simples* (o *sustancias simples*) y los *elementos*, adoptando de esa manera una posición dualista cuyas raíces pueden remontarse a la filosofía presocrática (Scerri, 2007). Un cuerpo simple tenía una naturaleza material, estaba dotado de propiedades físicas y era capaz de intervenir en las reacciones químicas. En cambio, el término *elemento químico* evocaba necesariamente una entidad de un carácter más fundamental, de mayor abstracción y de naturaleza metafísica, que poseía como propiedad esencial el peso atómico (Bensaude-

Vincent, 1989b). A partir de esta definición de elemento, Mendeleev articuló el sistema de clasificación periódica.

La concepción de los elementos como entidades teóricas permitió la predicción de nuevos elementos y facilitó cambios de posiciones que dieron armonía al sistema. Para esta concepción, el cuerpo simple por sí solo no tenía poder explicativo; quedaba, junto al compuesto, relegado al mundo de las apariencias. El elemento era el único principio explicativo y constituía el sustrato de todo lo observable. Los elementos eran *ese algo* que se conservaba en las reacciones químicas, que permanecía a pesar del cambio.

Posteriormente, con el descubrimiento de los isótopos en el año 1913, la comunidad científica tropezó con un grave problema, dado que a un mismo lugar de la tabla periódica le podían corresponder átomos de distinta masa. Como la tabla periódica se ordenaba mediante los pesos atómicos crecientes, era lícito discutir acerca de si estos átomos eran manifestaciones de un mismo elemento o si, o por el contrario, correspondían a elementos distintos. Durante la segunda década del siglo XX se descubrieron una gran cantidad de isótopos. De pronto, los elementos parecían multiplicarse de una manera acelerada, lo que provocó una crisis profunda en el sistema periódico a raíz de la clasificación problemática de los isótopos en la tabla periódica.

En 1916 el radio-químico Friedrich Paneth (1887-1958) se refirió críticamente a la llamada *ley de la sustancia*. Esta ley señalaba que, si dos sustancias eran idénticas en algunas de sus propiedades fundamentales, lo eran también en todas sus propiedades. Paneth negó explícitamente la validez de esa expresión, considerando que tras el descubrimiento de la isotopía era imposible sostenerla. Sugirió que las dificultades mencionadas podían superarse si en lugar de exigir la identidad de todas las propiedades para designar dos elementos con el mismo nombre, solamente se tomaba en cuenta la igualdad de las propiedades químicas. Luego, Paneth no consideró al peso atómico como una propiedad y elaboró la siguiente definición: “*Dos elementos se denominan el mismo si, una vez mezclados, no se los puede separar por medios químicos*” (Paneth, 1916, citado en Ruthenberg, 2009, p.82).

Adicionalmente, junto al físico-químico George Hevesy, Paneth logró evidenciar experimentalmente que los diferentes isótopos de un mismo elemento tenían propiedades químicas similares y que sólo podrían separarse por medios físicos. En consecuencia, el descubrimiento de nuevos isótopos correspondía a los elementos concebidos como *sustancia simple* y no como *sustancia básica* en la caracterización de Mendeleev, lo cual

fue puntualmente señalado por el propio Paneth (Scerri, 2007). Su propuesta influyó en la nueva definición oficial del concepto de elemento suministrada por la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) en 1923, la cual permitió identificar unívocamente un elemento de acuerdo con su número atómico (Kragh, 2000; Holden, 2004).

Posteriormente, en 1931, Paneth elaboró su propia interpretación dualista de la noción de elemento. En su propuesta marcó claramente la diferencia entre las dos concepciones tradicionales de elemento: la de sustancia simple (el elemento como entidad meramente empírica, como magnitud observable) y la de sustancia básica (el elemento como *aquello* más allá de la observación, que es indestructible en los compuestos, se conserva a través del cambio y es independiente de las transformaciones químicas). En concordancia con Mendeleev, subrayó que el sentido fundamental de la noción de elemento era la de su manifestación como sustancia básica, de índole abstracta, metafísica, que le posibilitaría al elemento químico eventualmente poder regresar al estado original tras una sucesión de reacciones (Paneth, 1931). En efecto, la recomendación de Paneth para el mantenimiento de la tabla periódica se basó en otorgar prioridad conceptual al ordenamiento de los elementos como sustancias básicas, recuperando de esa manera el sentido dual propuesto por Mendeleev. Si los químicos se hubieran centrado únicamente en las sustancias simples, se habrían visto obligados a reconocer nuevos elementos en cada nuevo isótopo descubierto.

7. Discusiones actuales en torno al concepto de ‘elemento químico’

Entre las posiciones actuales, es posible categorizar los enfoques tomando como referencia la posición de Paneth y organizándolos en torno a ella. Entre los actuales filósofos de la química que abordan el problema de la naturaleza de los elementos desde una perspectiva basada en la distinción de Paneth, podemos mencionar a Eric Scerri, Joseph Earley y Klaus Ruthenberg.

Scerri (2005, 2007, 2012, 2019, entre otros) resalta las ventajas que presenta la distinción de Paneth para la comprensión, la caracterización y la clasificación de los elementos químicos. Desarrolla argumentos a través de los cuales clarifica y destaca la relevancia de la noción de sustancia básica para diversas problemáticas filosóficas. En 2012 y 2019, Scerri elaboró una crítica a fin de aclarar una confusión en la relación entre los conceptos de sustancia básica, sustancia simple y elemento, e introdujo el término

sustancia simple combinada. Para Scerri, si bien el sistema periódico se ordena a partir de los elementos concebidos como sustancias básicas, incluye además a las sustancias simples, que también muestran periodicidad (reactividad química, propiedades físicas, etc.). La insistencia de Paneth acerca de que el sistema periódico sólo clasifica a las sustancias básicas, según Scerri, invita a la pregunta: “¿Qué información podemos aprender de los elementos en sus manifestaciones como *sustancia simple*, considerando especialmente que se dice que no tienen propiedades?” (Scerri, 2012, p.71). Si bien el número atómico proporciona un criterio para ordenar los elementos y, a partir de ese orden, articular la clasificación periódica, la misma también da cuenta de las similitudes que las distintas sustancias muestran en sus manifestaciones macroscópicas como sustancias simples. La introducción del término *sustancia simple combinada*, considera Scerri, contribuye a superar esa dificultad, al tiempo que también aclara el alcance de la noción de los elementos como *sustancia básica*.

Por su parte, Earley (2009, 2019) considera que existen algunas ambigüedades en la distinción de Paneth, debidas principalmente a problemas en la traducción. El trabajo original de Paneth fue escrito en alemán y la traducción al inglés fue realizada por su hijo, Fritz Paneth, quien tradujo los términos *einfacher stoff* y *grundstoff* del original, como *simple substance* y *basic substance*, respectivamente. Earley analiza el sentido original del término utilizado por Paneth para la *sustancia básica*, considerando que el término *grundstoff* en alemán no significa una sustancia en sentido metafísico estricto, sino que remite a una idea que implica un cierto tipo de materialidad, aspecto que no se refleja en la traducción *basic substance* del inglés. Así, fundamenta su posición mediante un estudio acerca de la influencia de la gramática latina en los idiomas alemán e inglés. Earley argumenta que, para poder hablar de *sustancia*, es necesario que se cumplan dos requisitos: a) estabilidad en el tiempo (por breve que sea), y b) existencia independiente. Para este autor, los elementos químicos en los compuestos no cumplen ninguno de estos dos requisitos, y ejemplifica su postura afirmando que “*El carbono en el tetracloruro de carbono no persiste como carbono, ni existe como tal*” (Earley, 2009, p. 68). También considera que las dificultades conceptuales resultan, en gran medida, de la polisemia existente. Por ello, sugiere elucidar el problema mediante una clara diferenciación lingüística.

Otro estudio que aborda la problemática de la naturaleza de los elementos químicos fue el realizado por Ruthenberg (2009), en el marco de un análisis de la

influencia de la filosofía kantiana en la obra de Paneth. El autor considera que Kant construyó una epistemología dualista que puede ajustarse a las particularidades de la química de manera exitosa. Ruthenberg resalta que la distinción entre sustancia simple y sustancia básica puede ser expresada en los términos de una relación entre los mundos empírico y trascendental.

Entre filósofos de la química contemporáneos que plantean posiciones divergentes con la naturaleza dual del concepto de elemento, podemos nombrar a Robin Hendry, Paul Needham, Rein Vihalemm y Eugen Schwarz. Estos autores, en líneas generales, niegan cualquier sentido metafísico a los elementos y proponen superar las dificultades encontradas mediante una nueva perspectiva conceptual.

Hendry (2005, 2006, 2019) considera que existe una continuidad conceptual en el término *elemento*, que perdura desde finales del siglo XVIII a la actualidad, pese a los cambios en los fundamentos teóricos de la química. Esta continuidad, según Hendry, se deriva de la presencia constante de tres hipótesis que hacen de los elementos los componentes básicos de la química: 1) sobreviven al cambio químico, 2) todos los compuestos están formados por ellos, y 3) la composición elemental de un compuesto explica su comportamiento. Estos tres supuestos conforman *la concepción central* de elemento químico y permiten la continuidad referencial en los nombres de los elementos individuales.

Hendry desarrolla una crítica a la distinción entre sustancia básica y sustancia simple de Paneth desde varios ángulos. Considera innecesaria una apelación al mundo de lo trascendental para dar cuenta de la permanencia de los elementos en los compuestos. El autor reconoce que la noción de sustancia básica es más abstracta que la de sustancia simple, pero la diferencia no radicaría en la distinción metafísica entre lo abstracto y lo concreto, sino en las diferencias de niveles de abstracción propias del campo de la lógica y la teoría de conjuntos. Expresa que mediante la consideración de las propiedades microestructurales de los elementos, es posible encontrar la conexión entre las propiedades observables de los elementos y las propiedades particulares de los compuestos. Hendry propone una distinción conceptual entre *elemento libre* -que denota los elementos que no están combinados con ningún otro- y *elemento* -que indica cualquier estado particular de combinación química-. Entre el elemento libre y el elemento, para el autor, existe una relación lógica de inclusión.

En tanto, Vihalemm (2011) también presenta una crítica a la apelación a la metafísica para dar cuenta del comportamiento de los elementos como sustancias básicas y apoya la denominación propuesta por Hendry para denotar los elementos químicos. Vihalemm sostiene que apelar a la metafísica no explica realmente nada, ni en las ciencias ni en la filosofía de la ciencia. Considera que la cuestión de si los elementos químicos son clases naturales debe ser analizada en términos filosóficos sin recurrir a la metafísica. Según este autor, los elementos químicos constituyen clases naturales ya que fueron identificados a través de un procedimiento de idealización científica, como especies teóricas.

Por su parte, Needham (2006) propone dar cuenta de la naturaleza de los elementos mediante una adaptación de las doctrinas aristotélicas a la problemática actual de la química. Toda sustancia química es una manifestación macroscópica de las propiedades de sus elementos constitutivos, pero ninguna parte de la sustancia tiene las propiedades necesarias para poder ser considerada un elemento. De eso no se desprende que el elemento *ha dejado de existir*, sino que los elementos están presentes *en potencia* en la sustancia. De acuerdo con la concepción aristotélica, la noción de elemento se caracteriza sobre la base de las propiedades que determinan cómo reaccionan las sustancias entre sí para generar nuevas sustancias. Estas propiedades se presentan en grados variables y pueden reducirse a los pares de magnitudes primarias: calor y humedad (véase Fig. X2). Las sustancias, en general, se pueden caracterizar por las propiedades que confieren el poder activo de afectar a otras y por la susceptibilidad de ser afectadas mediante las propiedades derivadas de las cualidades primarias. Los elementos se distinguen entre sí por el hecho de que adquieren valores extremos o limitantes de esas cualidades subyacentes.

Finalmente, Schwarz (2007) sostiene que la falta de claridad de ciertos conceptos químicos, como el de elemento, es uno de los principales problemas irresueltos para una adecuada explicación del sistema periódico. Considera que los químicos y los filósofos de la química utilizan el término *elemento químico* con tres significados diferentes: elemento químico *básico*, elemento *metalúrgico simple* y elemento *astrofísico* (o *átomo elemental*). Además, indica las propiedades de los elementos químicos que deben tenerse en cuenta para una adecuada caracterización.

8. Consideraciones finales

En este trabajo realizamos un recorrido histórico en torno al concepto de ‘elemento químico’. Hemos visto que una posibilidad es caracterizarlo como aquella sustancia que no puede descomponerse en otras más sencillas utilizando medios químicos. Esta definición de corte operacional es la que propuso Lavoisier en el siglo XVIII, la cual resalta la noción de elemento como *sustancia simple*. Pero existe otra noción del concepto de elemento, en un sentido metafísico, cuyas raíces se remontan a los filósofos presocráticos. Esta idea pasó a Aristóteles mediante su doctrina de los cuatro elementos y se instaló en el pensamiento occidental con la preeminencia de la filosofía aristotélica hasta la modernidad.

A finales del siglo XIX, Mendeleev enfatizó la naturaleza dual del concepto de elemento. A los elementos concebidos en un sentido metafísico los denominó elementos abstractos o reales, los cuales tenían un estatus más fundamental que los elementos concebidos como sustancias simples. Para Mendeleev, los elementos como sustancias abstractas carecían de propiedades y solo representaban la forma que los elementos tomaban cuando se presentaban en compuestos. Además, sostuvo que los elementos reales tenían como único atributo su peso atómico.

El descubrimiento de los isótopos fue otro paso clave para la comprensión de la naturaleza de los elementos. La gran cantidad de isótopos de muchos elementos descubiertos provocó la llamada *crisis de los isótopos*. Frente a esta situación, Paneth sostuvo que la tabla periódica podía preservarse, considerando que las propiedades químicas de los isótopos de un mismo elemento eran indistinguibles. De este modo, el descubrimiento de nuevos isótopos representó nuevas manifestaciones de un elemento como sustancia simple y no como sustancia básica. Su argumento filosófico estaba basado en retomar la naturaleza dual del concepto de elemento de Mendeleev.

Desde la década de 1990 hasta la actualidad, varios químicos y filósofos retomaron la reflexión acerca de la naturaleza del concepto de elemento. El devenir de las discusiones mostró la complejidad intrínseca del concepto y el desacuerdo existente. Se han rescatado trabajos y reflexiones de variados periodos históricos y, en algún sentido, todos los aportes realizados desde la filosofía presocrática cobraron actualidad. Por tal motivo, creemos oportuno cerrar este trabajo con la última estrofa del poema “La noche cíclica” de Borges, cuya primera estrofa empleamos como epígrafe:

...Vuelve la noche cóncava que descifró Anaxágoras;
vuelve a mi carne humana la eternidad constante
y el recuerdo ¿el proyecto? de un poema incesante:
«Lo supieron los arduos alumnos de Pitágoras...»

Referencias bibliográficas

- Bensaude-Vincent, B. (1989a). "Lavoisier: una revolución científica". En: Serres, M. (ed.). *Historia de las ciencias*. Madrid: Ediciones Cátedra, pp. 411-435.
- Bensaude-Vincent, B. (1989b). "Mendeleiev: historia de un descubrimiento". En: Serres, M. (ed.). *Historia de las ciencias*. Madrid: Ediciones Cátedra, pp. 503-525.
- Bensaude-Vincent, B. y Stengers, I. (1997). *Historia de la Química*. Madrid: Addison Wesley - Universidad Autónoma de Madrid.
- Brock, W. (1998). *Historia de la Química*. Madrid: Alianza.
- Colli, G. (2009). *La naturaleza ama esconderse*. México: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes / Editorial Sexto Piso.
- Earley, J. (2009). "How chemistry shifts horizons: element, substance, and the essential". *Foundations of Chemistry* 11: 65-77.
- Earley, J. (2019). "Origins of the Ambiguity of the Current Definition of Chemical Element". En: Scerri, E. y Ghibaudi, E. (eds). *What Is A Chemical Element?* New York: Oxford University Press, pp. 109-123.
- Esteban Santos, S. (2001). *Historia de la Química*. Madrid: UNED.
- Hendry, R. (2005). "Lavoisier and Mendeleev on the elements". *Foundations of Chemistry* 7: 31-48.
- Hendry, R. (2006). "Elements, compounds and other chemical kinds". *Philosophy of Science* 73: 864-875.
- Hendry, R. (2019). "The Existence of Elements, and the Elements of Existence". En: Scerri, E. y Ghibaudi, E. (eds). *What Is A Chemical Element?* New York: Oxford University Press, pp. 124-142.
- Holden, N. (2004). "Atomic weights and the international committee – A historical review", *Chemistry International* 26: 4-7.
- Kragh, H. (2000). "Conceptual changes in chemistry: The notion of a chemical element, ca. 1900–1925". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics B* 31: 435-450.
- Lavoisier, A. (2007). *Tratado Elemental de Química*. Barcelona: Crítica.
- Needham, P. (2006). "Aristotle's theory of chemical reaction and chemical substances". En: Baird et al. (eds.). *Philosophy of Chemistry. Synthesis of a New Discipline*, Dordrecht: Springer, pp. 43-67.
- Paneth, F. A. (1931). "The epistemological status of the concept of element", [reimpreso en *Foundations of Chemistry* 5: 113-145 (2003)].
- Popper K. (1963). *Conjeturas y refutaciones*. Barcelona: Paidós.
- Popper K. (1999). *El mundo de Parménides. Ensayos sobre la ilustración presocrática*. Barcelona: Paidós.
- Pullman, B. (1995). *El átomo en la historia de la humanidad*. Barcelona: Biblioteca Buridán.

- Reale, G. y Antiseri, D. (1988). *Historia del pensamiento filosófico y científico*. Barcelona: Herder.
- Ruthenberg, K. (2009). "Paneth, Kant and the philosophy of chemistry". *Foundations of Chemistry* 11: 79-91.
- Scerri, E. R. (2005). "Some aspects of the metaphysics of chemistry and the nature of the elements". *Hyle – International Journal for Philosophy of Chemistry* 11: 127-145.
- Scerri, E. R. (2007). *The Periodic Table – Its story and its significance*. New York: Oxford University Press.
- Scerri, E. R. (2012). "What is an element? What is the periodic table? And what does quantum mechanics contribute to the question?". *Foundations of Chemistry* 14: 69-81.
- Scerri, E. R. (2019). "The Many Questions Raised by the Dual Concept of "Element". En: Scerri, E. y Ghibaudi, E. (eds). *What Is A Chemical Element?*, New York: Oxford University Press, pp. 5-31.
- Schwarz, W. H. E. (2007). "Recommended questions on the roads towards a scientific explanation of the periodic system of the chemical elements with the help of the concepts of quantum physics". *Foundations of Chemistry* 9: 139-188.
- Stengers, I. (1989). "La afinidad ambigua: el sueño newtoniano de la química del siglo XVIII". En M. Serres (ed.). *Historia de las ciencias*, Madrid: Ediciones Cátedra, pp. 337-361.
- Ströker, E. (1968). "Element and compound. on the scientific history of two fundamental chemical concepts". *Angewandte Chemie International Edition* 7: 718-724.
- Vihalemm, R. (2011). "The Autonomy of Chemistry: Old and New Problems". *Foundations of Chemistry* 13: 97-107.