

**EL OBJETO DE SABER DE LOS QUÍMICOS. FORMULACIÓN, MODIFICACIÓN
Y ABANDONO DEL MODELO ICÓNICO INICIAL**
(Chemists' knowledge object. Formulation, modification and abandonment of iconic
model)

R. Gallego Badillo [rgallego@uni.pedagogica.edu.co]

R. Pérez Miranda [royman@uni.pedagogica.edu.co]

Departamento de Química. Universidad Pedagógica Nacional.

Bogotá, D. C. Colombia.

A. P. Gallego Torres [Adriana.P.Gallego@uv.es]

Universidad Distrital. Bogota D. C. Colombia.

L. N. Torres de Gallego

Grupo de Investigación Representaciones y Conceptos Científicos – Grupo IREC

Resumen

En este artículo se hace un examen de las diferentes posiciones que hoy se discuten acerca del estatuto científico de la química. Se acude a la categoría de modelo científico, con el fin de caracterizar la propuesta y desarrollo del que aquí se denomina icónico-tecnológico. Se alude, además, a los momentos en que fue indispensable introducir los modelos analógicos y los simbólicos para modificar y sustituir ese modelo inicial. Se establece, igualmente, de qué manera el icónico-tecnológico puede constituir un fundamento didáctico para aproximar a los estudiantes de educación básica y media, a la química como una de las ciencias de la naturaleza.

Palabras-clave: Modelo científico, versión histórica, estatuto científico, objeto de conocimiento, ciencia química, didáctica de la modelación.

Abstract

This article presents an analysis of different perspectives in regards to chemistry scientific statute. The category of scientific model was considered to characterize the proposal and development of technological-iconic model. It was necessary to have a look at the time in which the introduction of analogical and symbolic models was indispensable to modify the initial model. It also established the way in which the technological-iconic model can be a didactic foundation to lead secondary students towards Chemistry as one of the natural sciences.

Keywords: Scientific model, historical version, scientific statute, knowledge object, Modeling Didactics.

Introducción

En la actualidad, en las ciencias de la naturaleza se está acudiendo a la categoría epistemológica de modelo, para dar cuenta de la construcción histórica de dichas ciencias. En didáctica de las ciencias este hecho ha dado origen a un nuevo campo de investigación, denominado de la modelación o de la aproximación de los estudiantes al problema de la construcción de modelos científicos en el aula (Grosslight, Unger, Jay and Smith, 1991; Justi, 2002). En este contexto, hay críticas recientes al trabajo didáctico y al enfoque centrado en las ideas de R. N. Gieré (1990), dado el uso generalizado e indistinto de esta categoría en algunas propuestas de modelación, en las que no se tienen en cuenta la historia de cada una de las ciencias de la naturaleza (Greca y Dos Santos, 2005).

El origen de este artículo se encuentra en las reflexiones de carácter histórico, epistemológico y didáctico que se han venido adelantando en el Grupo IREC, particularmente sobre la enseñanza de la química y las críticas a los textos habituales de enseñanza para los niveles de educación media (Secundaria) y primeros semestres de los programas de formación inicial de profesores de química. En tales textos se dice que la química estudia la materia, su composición y los procesos mediante los cuales esa composición cambia; definición esta a todas luces ingenua. En el mismo orden de ideas y por fuera de reconstrucciones históricas admisibles, se entra a definir átomo, molécula, para caer en un recuento de los diferentes modelos atómicos, pasándose al semicuántico de N. Bohr y finalmente en el derivado de la mecánica ondulatoria, con todos los errores conceptuales que son de esperarse (Gallego Badillo, Pérez Miranda y Torres de Gallego, 1995; 1996; Pérez Miranda, Gallego Badillo, Torres de Gallego y Cuellar Fernández, 2004; Gallego Badillo, Pérez Miranda, Uribe B, Cuellar y Amador Rodríguez, 2004).

La introducción de la modelación en el problema de la enseñabilidad y de la enseñanza de la química, exige una amplia discusión entre los especialistas sobre la categoría de modelo en esta ciencia, para que desde revisiones o reconstrucciones históricas, se acuerde cuáles son los modelos propuestos y desarrollados e, incluso, sustituidos por otros, en los que los químicos han sustentado y basado su sistema de producción de saber y de nuevos materiales (Hoffmann, 1997). Ello requiere de una discusión epistemológica sobre el estatuto científico de la química que solo se inicia a partir de la década del 90, del siglo XX (Scerri, 2003). Si la enseñanza de la química posee dificultades (Nelson, 2002), entonces una didáctica basada en la modelación, tendrá problemas más complejos, como se ha demostrado en investigaciones en la física, no solo con profesores en formación, sino con docentes de esos profesores (Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001; Oliva, Aragón, Bonat y Mateo, 2003; Islas y Pesa, 2003; 2004).

La construcción del estatuto científico de la química es histórica, por lo menos desde R. Boyle. Este científico, partidario de las aproximaciones empiristas de F. Bacon (1980), atribuyó a esta problemática el sentido de todos sus aportes y luchas intelectuales; un proceso que inició y tuvo finalmente resultados positivos. Las preguntas que han animado a los Integrantes del Grupo IREC han sido, ¿de qué manera aproximar a los estudiantes de educación básica y media (Secundaria) y a los matriculados en los programas de formación inicial de profesores de química, a una reconstrucción racional de dicha problemática?, ¿hasta dónde el planteamiento de un modelo icónico – tecnológico, que tuvo vigencia hasta finales del siglo XIX, puede contribuir a dicha aproximación? y ¿cómo, a partir de este modelo, elaboran una comprensión de la introducción de los modelos analógicos y simbólicos en el abandono del icónico – tecnológico? El Grupo está trabajando sistemáticamente en esta dirección, tanto en la elaboración de trabajos de grado dentro del programa de Licenciatura en Química, como en la de las tesis de la Maestría en Docencia de la Química, del Departamento de Química, de la Facultad de Ciencia y Tecnología, de la Universidad Pedagógica Nacional, de Bogotá, Colombia.

De las reconstrucciones históricas

T. S. Kuhn (1972) enseñó que todo análisis epistemológico exige necesariamente un estudio documentado de las historias particulares de cada una de las ciencias. Luego, I. Lakatos (1983), precisará que toda historia de las ciencias se halla epistemológicamente

posicionada. De esta manera, no hay “una historia” sino diferentes versiones de la misma. Una será la empiropositivista (Bacon, 1980; Comte, 1980), caracterizada por el convencimiento de que esa historia se ha debido a la aplicación de la lógica inductiva, por lo que es asumida como una sucesión lineal de descubrimientos; descubrimientos realizados por personajes geniales (Gallego Torres, 2002), independientemente de sus contextos culturales, sociales, políticos y económicos (Restivo, 1992). Esta descontextualización, incluso, no suele tener en cuenta el sistema educativo en el que se formaron esos genios; algo que podría ser encomillado con la propuesta de S. Toulmin (1977), para quien el desarrollo de las ciencias ha obedecido a una genealogía de maestros y discípulos. Un examen crítico de libros sobre la historia de la química, permite concluir que muchos de ellos siguen esa versión lineal, como es el caso de los que aquí se referencian, por ejemplo, Lockemann (1960), Leidler (1995), Idhe (1984) y Schneer (1975).

Otra versión será aquella que se ubica en la posición deductivista, iniciada por K. Popper (1962) y que, con las críticas respectivas, fueron el fundamento de las propuestas de T. S. Kuhn (1972) e I. Lakatos (1983). En esta posición, la deductivista, las reconstrucciones históricas se plantean en términos de sustitución de teorías, cambios paradigmáticos y abandono de programas de investigación, por haberse hecho estos últimos regresivos. Se deja sentado que toda reconstrucción no empiropositivista ha de admitir que la actividad científica no ha seguido un camino de éxitos sucesivos, hasta el punto de que la comunidad ha tenido que volver atrás, rectificar concepciones y metodologías (Stengers, 1991). Esta afirmación parece ser mucho más evidente en el caso de la construcción del estatuto científico de la química, al respecto de la cual intervinieron muchos personajes entre quienes hubo concepciones dispares. No es posible una versión lineal.

Aquí es indispensable relacionar algunas versiones, en particular la de W. B. Jensen (1998a; 1998b; 1998c) quien hace una reconstrucción desde tres categorías, la molar, la molecular y la cuántica. En relación con la primera, se refiere a la construcción de modelos macroscópicos; con la segunda a lo microscópico; y, en la tercera, se ocupa de las interacciones entre las partículas. Con esta especificación, el autor intenta explicar las tres revoluciones científicas, para utilizar la categoría kuhniana, que caracterizarían la historia de la actividad científica de los químicos. Estas categorías son compartidas por G. Nelson (2002), en su análisis de los problemas didácticos que se presentan en la enseñanza de la química.

Una hipótesis que habría que contrastar, sería aquella que afirmaría que el modelo icónico – tecnológico que se pretende sustentar, podría constituir un admisible constructo histórico, epistemológico y didáctico, para introducir a los estudiantes en el nivel molar, orientarlos para una elaboración al molecular y construir los esquemas que les posibiliten el salto al nivel cuántico. En este delineamiento, se presenta una problemática de carácter ideológico. Es así, por cuanto se estaría frente a la decisión de matricularse en los lineamientos del *International Journal for Philosophy of Chemistry*, liderado por el profesor J. Schumer o por E. Scerri y G. Nelson. Se cometería un error de grandes proporciones: La admisión de la construcción del estatuto epistemológico de la química, se limitaría, entonces, a una elección entre los partidarios de una u otra tendencia. ¿Son aceptables otras alternativas?

La categoría epistemológica de modelo

Las enseñanzas de T. S. Kuhn (1972) y de I. Lakatos (1983) condujeron a una crítica de sus propuestas epistemológicas, acordándose que eran válidas para la física, en la que se

habían originado. Sus elaboraciones en torno a la historia, llevaron a revisar las de sus propias ciencias. La conclusión fue que la química y la biología, por ejemplo, no habían seguido la metodología establecida por Newton en su *Principia* y en su *Óptica*; conformada de manera general, por definiciones, postulados, demostraciones y corolarios (Assis, 1998). Los textos dominantes en química, por lo menos hasta finales del siglo XIX, no están escritos siguiendo esta metodología. En este punto del análisis, habría que preguntar si su ausencia es argumento para negar el estatuto científico de la química. C. J. Schneer (1975), es del parecer de que, para comprender a J. Dalton y a Gay – Lussac, se requiere de ciertos dominios matemáticos, mientras que las de Lavoisier son mucho más accesibles.

El problema quedó formulado. Se retomó la categoría epistemológica de modelo científico. J. Tomasi (1999) sostiene que los modelos son usados en todas las disciplinas científicas. Anota que los modelos son por definición incompletos con respecto a su referente empírico. Los clasifica en materiales y abstractos, subclasificando estos últimos en icónicos o gráficos, analógicos y simbólicos. Sostiene, que los colectivos de científicos, frente a las delimitaciones de sus problemas de saber y de investigación suelen formular modelos de modelos, lo que habla en favor de la estructura hipotético – deductiva de los modelos científicos. Se ha acordado que cada modelo no es la realidad en sí o la cosa en sí de la que hablara I. Kant, sino una representación (Del Re, 2000) de un espacio de saber que se hace objeto de conocimiento y que existe como tal, en virtud de que para dicho espacio se ha elaborado y propuesto un modelo (Scheler, 1926; Gallego Torres, 2006). Este hecho da base a la idea de que los modelos son propuestos, aceptados, trabajados, modificados y sustituidos por otros de mayor poder heurístico, para explicar su evolución, modificación, abandono y sustitución por otro.

Por tanto, que todo modelo es una construcción imaginaria y por ende arbitraria, de un conjunto de objetos o procesos, para estudiar sistemáticamente el comportamiento, provocado o no, de las interacciones entre los elementos de esos objetos o fenómenos que, desde el modelo se hace objeto de saber y de investigación. Si ese objeto es formulado como un sistema dinámico no lineal y complejo, tal modelo ha de ser asumido como incompleto (Castro, 1992). E. F. Caldin (2002) sostiene que todo modelo es una analogía de los sistemas que se supone existen en la naturaleza; en este sentido, puntualiza que deben ser reajustados de conformidad con las evidencias empíricas.

Los modelos icónicos o gráficos son aquellos en los que se acude a representaciones pictóricas del objeto de conocimiento e investigación. Para tal efecto, la comunidad de especialistas recurre a pictogramas que de otra manera no permitiría el dominio de aquello que se hace objeto de saber con el fin de producir conocimiento demostrable en realizaciones concretas, como es, en el caso de la química, el diseño y fabricación de nuevos materiales (Hoffmann, 1997). Su carácter hipotético – deductivo posibilitará su explotación y desarrollo conceptual y metodológico.

Los modelos analógicos son aquellos que se construyen mediante el empleo de artefactos o tecnofactos (Gallego Badillo, 1997) idealizados, para representar los elementos y las interacciones del objeto de saber y de investigación. Habría que pensar en la mesa de billar del modelo cinético molecular de los gases, en la máquina ideal de S. Carnot y en el oscilador armónico simple de la mecánica ondulatoria. Los modelos simbólicos se fundamentan, además, en la axiomática de los sistemas matemáticos (Lombardi, 1998). Los modelos simbólicos son los que caracterizan la actividad histórica de producción de saber de las comunidades de los físicos. Los taxones señalados constituyen tan solo una guía para los

respectivos análisis históricos, ya que solo un examen específico de la historia de cada ciencia, establecería cuánto tiene un modelo de icónico, de analógico o de simbólico.

Nuevas perspectivas epistemológicas

Un punto de partida es el que establece que la nueva ciencia, de carácter matemático e instrumental, es creada por Galileo. Las hipótesis matemáticas acerca del comportamiento del objeto de conocimiento, se contrastan experimentalmente en un constructo tecnológico especialmente diseñado para tal efecto. Se inicia una relación entre ciencia y tecnología que requerirá de transformaciones conexas en la praxis de los ingenieros (Mason, 2001). Los científicos y los tecnólogos establecerán una relación de apoyo conceptual y metodológico que se fortalecerá, hasta el punto de hablar de investigaciones científico – tecnológicas.

Esta perspectiva no fue tenida en cuenta por los epistemólogos de comienzos del siglo XX. Predominó entre ellos una mirada eminentemente platónica (Heisenberg, 1967). De hecho, las transformaciones ocasionadas en las relaciones sociales, políticas y económicas que caracterizan el mundo de hoy, serían inexplicables si en el análisis del desarrollo histórico de las ciencias de la naturaleza, no se tuvieran en cuenta las interacciones entre ciencia y tecnología, establecidas inicialmente por Galileo.

En cuanto a la admisión de la propuesta del modelo icónico – tecnológico que construyeron los químicos y que cimentó su actividad de producción de saber, hay que recordar que G. Bachelard (1979) explicitó que un concepto es tanto más científico en la medida en que se hace tecnológico, esto es, se perfecciona instrumentalmente. Afirma, también, que todo objeto de conocimiento es un conjunto de problemáticas formuladas desde una concepción teórica inicial; por tanto, si es delimitado por esos conceptos, entonces, ese objeto se inscribirá en el mismo proceso de “tecnologización”. Para hablar de un modelo icónico –tecnológico, se precisa de una diferente aproximación epistemológica a los saberes tecnológicos, de la originada en las posiciones empiropositivista, particularmente la establecida por A. Comte (1980), quien afirmó que eran una aplicación a los procesos de producción de las leyes descubiertas por los científicos. Esa diferente aproximación reconoce que estos saberes están conformados por modelos (Fouréz, 1994), en una relación de apoyo conceptual y metodológico con los modelos científicos. Una propuesta de estructura para las tecnologías, además de la categoría anterior, la de sistema y la de prototipo, ha de explicitar la de diseño (Gallego Badillo, 1998; Carvajal, 2003).

Formulación del primer modelo icónico en Química

Todo se inició con un problema técnico, el de la bomba impelente-expelente de Ctesibio de Alejandría, que se empleó para achicar las minas; problema este que emerge cuando la profundidad de tales excavaciones aumentó y se encontró que la bomba no podía elevar el agua más allá de 14 m. (Schneer, 1975). Galileo no elabora una solución satisfactoria. Hacia 1643, la produjeron E. Torricelli (1608 – 1647) y V. Viviani (1622 – 1703). Demostraron que el problema era de equilibrio mecánico. Para llegar a esta explicación lo atraparon en un constructo instrumental, que constituyó el instrumento para medir la presión atmosférica, el barómetro. Establecieron la corporeidad del aire y concluyeron que se podía hacer vacío; por lo que la tesis aristotélica de que la naturaleza le tenía horror al vacío, se hizo insostenible. A esta información tuvo acceso Otto von Guericke (1602 – 1686), quien

rediseño la bomba de Ctesibio y la convirtió en la bomba neumática. Con ella y con la válvula de su invención, llevó a cabo el famoso experimento de los hemisferios de Magdeburgo.

R. Boyle (1627 – 1691), en 1656, mientras construía un laboratorio en Oxford leyó los resultados del experimento de Von Guericke, posiblemente en el contexto de su interés por hacer de la química una rama de la filosofía natural (Schneer, 1975). Con R. Hooke (1635 – 1703), quien a su vez, rediseñó la bomba de Von Guericke, auxiliados por la campana neumática y otros artefactos apropiados, llevaron a cabo todas las investigaciones que dieron origen a la denominada química neumática (Idhe, 1984). Como consecuencia de estos trabajos, R. Boyle, en 1661, en su libro *Chymista scepticus*, publicado en 1661, propone una primera definición del concepto de elemento, al hablar de “ciertos cuerpos primitivos y simples en los que no hay mezclas” (Schneer, 1975). Con Boyle y Hooke, la química inicia su constitución como una ciencia instrumental, vale decir, técnica.

Son los fluidos elásticos (gases) como objeto de saber y de investigación, los que se hallan en la base de lo que será el modelo icónico que iniciará la fundamentación del estatuto científico de la química. Una versión histórica ubica ese estatuto inicial en el modelo del flogisto, cuya elaboración definitiva se debe a G. E. Sthäl (1660 – 1734); que es reconocido como el primer modelo químico propiamente dicho (Izquierdo, 1988). A. L. Lavoisier (1743 – 1794) demostrará conceptual y metodológicamente que tal modelo es científicamente insostenible. Lo sustituirá por el de la oxidación o del oxígeno, que producirá una revolución en el pensar y en el hacer de los químicos. Lavoisier introduce una analogía, ya que representa la reacción química y la ley de la conservación de los pesos, con la balanza en equilibrio mecánico; ley esta que sugerida en su *Traité élémentaire de chimie*, de 1789 (Ihde, 1984).

Además, define instrumentalmente sustancia simple (Bensaude- Vincent, 1991a). Si bien habla de elemento, en él persiste aún la noción de cuerpo simple. Esa tecnificación la lleva a cabo con la introducción de la balanza como instrumento científico, que hace constituir en juez de las discrepancias teóricas (Bensaude - Vincent, 1991b). El concepto de elemento químico quedará delimitado definitivamente con la formulación de la ley periódica, por parte de D. Mendeleiev (1834 – 1907) en su *Ensayo de un sistema de los elementos fundado en el peso atómico*, de 1869.

Lavoisier es el creador de la química instrumental (Mason, 2001), vale decir, relacionada con los saberes de los técnicos. Esto dará paso a la formulación de las leyes ponderales que tienen también una historia. Entre 1792 y 1794, en su *Anfangsgründig der Stöchiometrie*, J. B. Richter (1762 – 1807) enuncia la ley de los equivalentes. J. L. Proust (1755 – 1826) entre 1802 y 1808, en diferentes artículos en el *Journal de Physique*, propone la de las proporciones constantes o definidas. Ya Lavoisier ha enunciado la de la conservación de los pesos en las reacciones químicas. Esta aritmética será fundamento de todo el desarrollo posterior del trabajo de los químicos, puesto que con el perfeccionamiento técnico, el conocimiento acerca de la composición de los materiales les permitirá avanzar por un camino fructífero. Estas leyes serán complementadas con la de los volúmenes de combinación de J. L. Gay-Lussac (1778 – 1850), contenida en sus *Mémoires*, de 1808; ley esta con la que Dalton no estuvo de acuerdo, en virtud de que contradecía su modelo (Ihde, 1984).

Si se admitiera que las leyes ponderales pasaron a constituir un “núcleo firme”, para utilizar la propuesta lakatosiana, habría que sostener que los químicos contaron con un programa de investigación progresivo, que aportó resultados positivos a la intencionalidad de dar cuenta de y de imitar la naturaleza, en cuanto a la fabricación de moléculas. El modelo

icónico de Dalton se sustentó en leyes universales que, de hecho, son epistemológicamente diferente de las establecidas para la física, desde Galileo y Newton (Hanson, 1977). Estas leyes de los químicos poseen un estatuto científico equivalente, al de la ley de periodicidad (Scerri, 1997).

Es en el comportamiento de los gases como objeto de estudio, en el que J. Dalton (1766 – 1844), encuentra el recurso para proponer el primer modelo icónico del átomo. Lo elabora y da a conocer, primero, en 1808 y definitivamente en 1827, en su *New System of Chemical Philosophy*; modelo que expone en los capítulos *Acerca de la constitución de los cuerpos* y en *Acerca de la composición química*. En estos capítulos asume los átomos como esferas duras, que representa gráficamente con círculos, introduciendo puntos o rayas para diferenciar las distintas sustancias simples y las compuestas conocidas en la época (Lockemann, 1960). Es desde dicho modelo que sustenta su ley de las proporciones múltiples, enunciada inicialmente en 1803 (Schneer, 1975). Parece que Dalton se apartó significativamente de las ideas de Newton, de las de R. J. Bosovich (1711 – 1787) y de las de Bernoulli, por lo que los físicos de la época recibieron con sorna su modelo (Schneer, 1975).

El modelo de Dalton explicó todas las leyes ponderales (Schneer, 1975; Cranston, 1925). No obstante, dada la proliferación de pareceres distintos entre los químicos, no fue tenido en cuenta entre 1820 y 1860, según se afirma, porque estos especialistas del primer cuarto del siglo XIX eran poco dados a teorizar y preferían el concepto de equivalente, directamente medible, al de átomo (Mason, 1991). Sin embargo, hay quienes afirman que uno de los primeros científicos en admitir el modelo de Dalton y las leyes de las proporciones definidas y múltiples, fue J. J. Berzelius (1779 – 1848) (Lockemann, 1960). Desde esta supuesta admisión se ocupa de determinar pesos atómicos. Elabora una primera tabla en 1818, que perfecciona en 1826, con base en la ley de la constancia del calor atómico, debida a P. L. Dulong (1785 – 1833) y a A. T. Petit (1791 – 1820). J. S. Stas (1813 – 1891) propuso en 1850, que se tomara como referencia el peso atómico 16 del oxígeno, para la determinación y elaboración de las tablas de pesos atómicos. Estos pesos son químicos, en razón de que obedecen a pesos relativos (Bachelard, 1976).

El problema del lenguaje especializado

La constitución de una nueva ciencia requiere, además de la delimitación de un objeto inicial de saber y de investigación, desde un modelo que precise las interacciones o los fenómenos que se hacen constituir como problemática, de una comunidad definida de especialistas, de formas de divulgación de los resultados de los trabajos y discusiones, es indispensable el consenso comunitario en torno al lenguaje conceptual y metodológico con el que se elabora el modelo científico. Para la época en la que se inscribe esta presentación ello no sucedía entre los químicos. De ahí que se afirme que, aún en 1860, cada uno de estos especialistas tenía sus propias maneras de denominar y un repertorio particular para representar las fórmulas químicas (Schneer, 1975). De ser así, entonces proponer la existencia de una comunidad de especialistas resulta poco sostenible. Anótese de paso, que la primera revista de importancia en química, fue la francesa *Annales de Chimie*, fundada en 1789.

Lavoisier es quien intenta crear ese lenguaje en su *Méthode de nomenclature chimique*, de 1787, apoyado en el libro *Lógica*, del filósofo E. B. de Condillac (1715 – 1780) (Bensaude-Vincent, 1991b). Sin embargo, la nomenclatura que en ese tiempo, en principio recibió cierta aceptación, fue la de J. J. Berzelius (1779 – 1848), contenida en su *Essay on the*

Cause of Chemical Proportions, and Some Circumstances Relating to Them, Together with a Short and Easy Method of Expressing Them, de 1813. J. Dalton fue del parecer de que era, sencillamente, horrorosa (Ihde, 1984). No obstante, con ella Berzelius expresó por primera vez la composición de los compuestos químicos y dio pie para que se representara sistemáticamente la reacción en los términos de reactantes y productos. A pesar de la autoridad de Berzelius, la carencia un lenguaje científico consensuado se puso de manifiesto y fue uno de los temas centrales en el Congreso de Karlsruhe, celebrado en 1860.

En este orden de ideas, es factible sostener que paulatinamente las elaboraciones de los químicos se hicieron cada vez más instrumentales; algo que se alcanzó con el inicio y desarrollo de la química cuantitativa inaugurada por Lavoisier. El desarrollo posterior hay que atribuírselo a M. H. Klaproth (1743 – 1817), reconocido por J. J. Berzelius, como el más grande químico analítico de la época, en Europa. Los métodos de análisis ya establecidos, serán modificados y perfeccionados por R. W. Bunsen (1811 – 1889) y R. Kirchhoff (1824 – 1887) quienes fundan el análisis espectral. Estos desarrollos les permitirán a los químicos apoyarse en otras instrumentaciones. En 1729, P. Bouguer (1698 – 1758) inicia la colorimetría, cuyos desarrollos posteriores se deben a J. H. Lambert (1728 – 1777) y a A. Beer (1825 – 1863), este último ya en el siglo XIX.

Una hipótesis: la paulatina modificación del modelo icónico

Se está frente al problema ya enunciado de que, entre 1820 y 1860, los químicos, a los que resulta problemático agrupar dentro de una comunidad científica, solo les queda como recurso hipotético la idea de que el modelo icónico de Dalton, fue el fundamento para las sucesivas modificaciones que se operaron en el pensar y en el quehacer sistemático de quienes, a la postre construyeron el estatuto científico de la química. Las discrepancias son explicables, mientras que los físicos se ocupan de la cinemática y la dinámica de los cuerpos en movimiento, los químicos se hallan intentando construir una mirada acerca de la constitución última de los materiales, acerca de la cual las propuestas no eran evidenciables ni demostrables por observación directa. Como anécdota, hay que recordar que Newton dedicó parte de su vida a la alquimia.

Admitida la hipótesis, las modificaciones empiezan con el concepto de molécula, como consecuencia de la explicación de la ley de los volúmenes de combinación dada por A. Avogadro (1776 – 1856) con la hipótesis que lleva su nombre, y que enunció en 1811. A. J. Ihde (1984) destaca el error conceptual contenido en algunos textos de enseñanza de química, cuando afirman que Avogadro utilizó las leyes de Boyle – Mariotte (1620 – 1684) y la de J. Charles (1746 - 1823) y Gay-Lussac, para deducir una hipótesis para cuya formulación se auxilió con representaciones pictóricas. La hipótesis solo se aceptó en la década de los sesenta (Mason, 2001), con la determinación del número de moléculas llevado a cabo por J. Loschmidt (1821 – 1895), en 1866. S. Cannizzaro (1826 – 1910) sostuvo en el Congreso de Karlsruhe, que esta hipótesis debía ser abandonada, ya que introducía confusiones en el pensamiento químico (Schneer, 1975). Sin embargo, con su libro, publicado en 1858, *Sunto di un corso di filosofia chimica*, que distribuyó en el Congreso de Karlsruhe, en 1860, contribuyó a la difusión y aceptación entre los químicos de las nuevas ideas sobre los átomos y las moléculas.

A. Laurent (1807 – 1853), con base en la hipótesis de Avogadro, definió los conceptos de peso molecular y de peso atómico. El concepto de molécula así formulado y poco a poco admitido entre los químicos, empezó a constituirse en el eje representacional del objeto de

saber de los químicos. Seguidamente se pasó a darle connotación instrumental. El primer método para la determinación experimental de los pesos moleculares fue sugerido en 1811 por Gay-Lussac. Desde un punto de vista procedimental inverso trabajó J. B. Dumas (1800 – 1884), en 1827, y en 1878, V. Meyer (1848 – 1897) ideó la modificación que lleva su nombre y que es, hasta cierto punto, el método que se suele enseñar en los cursos universitarios de química. A mediados del siglo XIX, se propusieron las primeras representaciones de las fórmulas moleculares.

Al problema de la explicación de cómo se enlazan los átomos para formar moléculas, contribuirá C. H. Wichelhaus (1842 – 1927). Propone el concepto de valencia para designar la atomicidad. E. Frankland (1825 – 1899) lo retoma y lo fortalece desde las leyes ponderales. A. Kekulé (1829 – 1896) en 1857, acude al modelo de la tetravalencia del carbono sugerido por W. H. Wollaston (1766 – 1828), para defender la existencia de cadenas carbonadas, propuestas en 1852 por F. Rochleder (1819 – 1874). Para sustentar la tetravalencia del carbono, J. Loschmidt acude a los conceptos de doble y de triple enlace. En 1865, Kekulé da a conocer su fórmula para el benceno.

Bútlarov, A. (1828 – 1886) introduce el concepto de estructura. Al respecto, hay que destacar que la propuesta de las cadenas carbonadas fue hecha al mismo tiempo por A. S. Couper (1831 – 1892). De quien procede la idea de representar las moléculas empleando líneas de enlace de valencia entre los átomos de carbono, representación utilizada por Kekulé para dar una idea gráfica de la estructura molecular. Couper se disputa con Bútlarov la creación de la química estructural. Kekulé va más allá, puesto que supuso que las cuatro valencias del carbono podrían estar orientadas en el sentido de los cuatro vértices de un tetraedro regular, idea procedente de Wollaston, en 1808. Ello nunca significó que el átomo de carbono pudiera ser semejante a un tetraedro como sólido geométrico (Bachelard, 1976). Subráyense los aportes de L. Pasteur (1822 – 1895) sobre la isomería, en 1827. Con base en ellos, J. H. van't Hoff (1852 – 1911), publica su *Chemistry in space*, que marca el paso definitivo de la química estequiométrica a la estereoquímica.

Dalton no admitió que los átomos de las sustancia simples se unieran para formar moléculas, ya que desde su concepción de la naturaleza eléctrica de los mismos, sostenía que poseían la misma carga y, por tanto, átomos iguales tenían necesariamente que rechazarse (Mason, 2001). Sin embargo, a partir de la década de los sesenta del siglo XIX, su modelo icónico fue modificado por las nuevas elaboraciones. Los conceptos de molécula, estructura molecular y estereoquímica se extenderán al campo de la química inorgánica. En 1890, A. Hantzsch (1857 – 1935) y A. Werner (1866 – 1919) lanzaron la hipótesis de que las tres valencias del nitrógeno eran radiales, de manera que el átomo de este elemento ocupara uno de los vértices de un tetraedro y las tres valencias los otros tres vértices. Werner aplicó la estereoquímica a los compuestos inorgánicos, y en 1893 desarrolló su modelo octaédrico con número de coordinación 6 para los compuestos cobálticos amoniacales. Con este modelo de la coordinación formuló una nueva sistemática y nomenclatura de los compuestos complejos (Lockemann, 1960).

El carácter hipotético deductivo del modelo icónico. Su carácter tecnológico

Con base en los desarrollos conceptuales e instrumentales logrados, los químicos de la época se encuentran en condiciones de diseñar moléculas, esto es, no proceden por ensayo y error. H. Kolbe (1818 – 1884) se ocupa de darle una nueva praxis al concepto de síntesis, para significar la obtención artificial de compuestos carbonados. La concepción de estructura que

Kolbe trabaja, le permite, en 1859, pronosticar la existencia de los alcoholes secundarios y terciarios, desconocidos para la época e identificados en 1862 por C. Friedel (1832 – 1898) y en 1864, por Bútlarov. En 1828, F. Wöhler (1800 – 1882) sintetizará la urea, demostrando que las ideas de su profesor Berzelius estaban equivocadas, en cuanto a que solo los organismos vivos estaban capacitados para producir compuestos de origen biológico. Admítase, que esta primera síntesis estuvo centrada en la reproducción en el laboratorio de compuestos existentes en la naturaleza.

Los éxitos de las síntesis continuarán. En 1861, Bútlarov produce artificialmente una mezcla de azúcares. En 1866, O. Loew (1844 – 1941) sintetiza la formosa y en 1889, la maltosa. Esta labor tiene un punto culminante en 1890, cuando E. Fischer (1852 – 1919) y J. Tafel (1862 – 1918) sistematizan la síntesis de los azúcares naturales. Además, en 1897, Fischer logra la síntesis de la cafeína y de la teobromina. El salto siguiente en la afirmación del modelo icónico, es el de ir más allá de la naturaleza misma. Así, en 1879, C. Fahlberg (1850 – 1910) e I. Remsen (1846 – 1927) sintetizan la sacarina, compuesto con un poder edulcorante quinientas veces superior al del azúcar de caña. Con posterioridad a 1906, L. H. Baekeland (1863 – 1944) produce la bakelita. Estos trabajos científicos le confirieron confiabilidad al modelo; es decir, las síntesis de estos compuestos contrastaron positivamente el modelo icónico y lo hicieron tecnológico.

Introducción de modelos analógicos y simbólicos

Dos factores inciden en la introducción definitiva de los modelos analógico y simbólico en el discurso de la comunidad de especialistas en química. En primer lugar, la síntesis de compuestos naturales y de aquellos no existentes en la naturaleza. Este logro científico será crucial para el impulso de la industria basada en el diseño y fabricación de moléculas a gran escala, lo que dará nacimiento a la ingeniería química. Emergerán, entonces, las preguntas en torno a la estabilidad de las sustancias y a la dinámica de las reacciones, en el contexto de cómo aumentar la cantidad en masa de los productos, exigida por la relación costo beneficio. A. W. Hofmann (1818 – 1892), por ejemplo, quien hizo de la anilina y sus derivados la materia prima de la industria de los colorantes, en 1867 fundó la *Deutschen Chemischen Gesellschaft*; su discípulo, W. H. Perkin (1838 – 1907), es considerado el verdadero fundador de la industria de los colorantes de anilina en Londres. Su hijo, del mismo nombre (1862 – 1909), logró la síntesis de la nicotina (Lockemann, 1960).

Las respuestas se elaborarán en el interior de la termodinámica clásica. R. Boyle, con la colaboración de R. Hooke, realizaron todos los experimentos atinentes a la relación de proporcionalidad inversa entre la presión y el volumen, para una cantidad fija de aire, a temperatura constante. Parece que su acuerdo con la aproximación empirista de F. Bacon (Schneer, 1975), le impidió formular matemáticamente la ley; formulación que se le atribuye a E. Mariotte (1620 – 1684). En 1738, D. Bernouilli (1700 – 1782), propuso el primer modelo cinético corpuscular para explicar el comportamiento PV de los fluidos elásticos. Se apoyó en la analogía de la mesa de billar idealizada. W. Thomson, Lord Kelvin (1824 – 1907) y de R. E. Clausius (1822 – 1888), este último quien en 1850, en un artículo publicado en *Annalen der Physik*, titulado *Über die bewegende Kraft der Wärme*, formulara matemáticamente la primera y la segunda ley, con la creación en esta última del concepto de entropía. Se reitera que se trata de un modelo analógico, por cuanto en la base de su estructura conceptual y metodológica se encuentra la máquina ideal de S. Carnot (1796 – 1832), cuya matematización se atribuye a su condiscípulo, B. P. E. Clapeyron (1769 – 1864) (Ihde, 1984).

La introducción de la termodinámica clásica no ocurrió de manera puntual. Esta afirmación se desprende de la consideración de que, desde antes, C. F. Wenzel (1740 - 1793) y C. L. Bertholet (1748 - 1822), se ocuparon del problema de las relaciones entre la masa química y la acción química; problema que será delimitado en 1867, por M. Guldberg (1836 - 1902) y P. Waage (1833 - 1900), con la ley de la acción de masas. Ley que fué la propuesta inicial de un modelo para la cinética de las reacciones, con la que introdujeron el concepto de equilibrio químico, desde una mirada dinámica. Este modelo será desarrollado con mayores alcances, por J. H. van't Hoff (1852 - 1911), en su libro *Estudios de dinámica química*, publicado en 1884; con anterioridad, en 1867, M. P. E. Berthelot (1827 - 1907), enunció el principio de que las reacciones químicas ocurren siempre en la dirección del mayor desprendimiento de calor, principio que no es válido a altas temperaturas. J. W. Gibbs (1839 - 1903), entre 1874 y 1878, desarrolló *Termodinámica del equilibrio y el de las de las fases*. En 1885, H. Le Chatelier (1850 - 1936), enunció el principio que lleva su nombre. Los químicos contaron con una función de trabajo o energía libre de Gibbs, para predecir las relaciones de equilibrio y las cantidades de energía implicadas en las reacciones.

Gibbs es el iniciador de la termodinámica estadística, sobre la base de los trabajos de J. C. Maxwell (1831 - 1879) y de L. Boltzmann (1844 - 1906), dados a conocer en un primer artículo de 1860, por Maxwell y en otro artículo de Boltzmann, de 1872. La importancia histórica de la mecánica estadística, radica en que sus creadores parten del modelo corpuscular de la materia (Schneer, 1975) para la axiomatización matemática. Hasta ese momento, la existencia de los átomos es todavía puesta en duda por la mayoría de los integrantes de la comunidad científica, menos por los químicos, exceptuando a G. Oswald (1853 - 1932), el gran químico catalítico alemán. La discusión quedará zanjada con dos de los tres artículos que publicará A. Einstein (1879 - 1955), en 1905, en el Vol. XVII, de la revista *Annalen der Physik*.

En segundo lugar, la introducción de modelos simbólicos, de conformidad con lo que sobre ellos se ha establecido (Lombardi, 1986), dejará para la historia la idea de átomo como esferas duras y desde tales modelos se construirá una nueva versión sobre el enlace químico. Los hechos que contribuyeron fueron las leyes de la electroquímica por M. Faraday (1791 - 1867), quien sostuvo que la idea de átomo era meramente metafísica (Schneer, 1975) y el descubrimiento, en 1896, de la radiactividad por H. Becquerel (1852 - 1908). Con base en estos hechos, la escuela de J. J. Thomson (1856 - 1940), con E. Rutherford (1871 - 1937), H. Geiger (1882 - 1945) y N. Bohr, producirá otros modelos atómicos; el primero en 1906, el segundo en 1911 y el tercero en 1913. Estos serán a su vez, reformulados en los términos de la mecánica cuántica, la de matrices de W. K. Heisenberg (1882 - 1945) y la ondulatoria de E. Schrödinger (1887 - 1961), de 1925 y 1926, respectivamente.

No obstante lo anunciado, la reconstrucción histórica muestra aún, para esta época, el predominio de las representaciones icónicas. Así, a partir del concepto de valencia de Wichelhaus (1842 - 1927), en 1899, R. Abegg (1869 - 1910) crea el concepto de electro afinidad, concepto que desarrolló, entre 1901 y 1904 en su modelo para la electro valencia. En éste, postuló que la valencia máxima de cada elemento es de 8, suma de las valencias positivas y negativas en cada caso. En cuanto a la reelaboración de lo admitido sobre el enlace químico, en 1916 fueron publicados dos artículos cruciales. El primero debido a W. L. Kossel (1853 - 1927), en el que sostuvo que los enlaces se formaban por transferencia de electrones. Su importancia radicó en que hizo énfasis en la estructura electrónica de los gases nobles y propuso la tendencia de los demás elementos a adquirir esta configuración.

El otro artículo fue el de G. N. Lewis (1875 – 1946), en él sostuvo que el enlace se debía al compartimiento de electrones. Su punto de partida fue el trabajo de Abegg y la determinación de la relación e/m del electrón, llevada a cabo y publicada en 1897, por J. J. Thomson (1856 - 1940) y R. Millikan (1868 – 1953). La propuesta de Lewis fue recibida con gran escepticismo por la comunidad científica (Ihde, 1984), ya que sugería la imagen de unos electrones estáticos y situados espacialmente, modelo que los físicos de la época no solo no admitieron, sino que hicieron burla de él (Leidler, 1995). Al basarse Lewis en la importancia de los ocho electrones, formuló la denominada regla del octeto, que presentó inicialmente en 1902 a sus estudiantes en el conocido modelo icónico de cubos. En 1919 fue acogida con entusiasmo por I. Langmuir (1881 – 1957), quien la extendió y aplicó, para representar las fórmulas de un amplio número de compuestos. Fue este científico quien sugirió el concepto de covalencia. Por otro lado, en 1921, C. R. Bury (1890 – 1968), a partir de evidencias químicas dedujo que los electrones se arreglaban en capas sucesivas de adentro hacia fuera, de 2, 8, 18 y 32 electrones. En 1921, N. Bohr (1885 – 1962)) dio crédito al esquema de Bury, retomado por N. V. Sidgwick (1873- 1952), en su libro *Teoría electrónica de la valencia*, de 1927, para introducir el concepto de enlace covalente coordinado.

La regla del octeto de Lewis - Langmuir, se constituyó en el mejor modelo icónico para representar la estructura de los compuestos, en términos de puntos y cruces, para significar pares de electrones libres o compartidos. Esta se transformó en rayas y flechas para dar cuenta de los enlaces de coordinación. El concepto de enlace covalente polar, dio pie para indicar los desplazamientos de la “nube electrónica” y explicitar el carácter bipolar de una molécula. El concepto de “nube electrónica provino de la mecánica ondulatoria. Estas representaciones icónicas son básicas en las reflexiones de los químicos, cuando se ocupan de ese otro componente de su objeto de saber y de investigación, la fabricación de nuevos materiales.

Agréguese a lo descrito, que es este el período en el que se introducen en química los modelos simbólicos, derivados de la mecánica ondulatoria. En efecto, W. Heitler y F. London, en 1927, formulan el modelo del enlace de valencia y J. E. Lennard – Jones, en 1929, el del orbital molecular, conocido por su sigla del inglés, como LCAO, combinación lineal de orbitales atómicos. Por fuera de una reconstrucción histórica admisible, estas formulaciones darán pie para una versión problemática de la constitución histórica del estatuto científico de la química basada en la física, que con errores conceptuales, contienen los textos de enseñanza para la educación básica, media y para los primeros semestres de los programas de formación inicial de profesores de química.

A manera de conclusión

¿Qué versión de química se enseña? ¿Desde que aproximación *histórico* epistemológica?, ¿es una ciencia cuyo estatuto epistemológico acude a la construcción de la física? y, ¿qué versión de química socializar, entre los estudiantes de educación básica y media?, ¿de qué se han ocupado y se ocupan los químicos?, ¿qué tiene que ver esa ocupación con las investigaciones científico – tecnológicas actuales? Se ha propuesto en el presente artículo una mirada en torno a lo que aquí se ha denominado la construcción histórica del modelo icónico de Dalton, el que con todas las discusiones sobre su admisión, fue paulatinamente modificado, se hizo tecnológico y se abandonó en los comienzos del siglo XX. No obstante, hasta 1921 por lo menos, los químicos acudieron a dicho modelo icónico para representar el enlace entre los átomos. Esas representaciones son aún base para el objetivo fundamental de esta comunidad de especialistas: El diseño y fabricación de nuevos

materiales (Hoffmann 1997), que es, por su puesto, una de las tantas aproximaciones, tan discutible como se quiera.

Si bien no se ha puntualizado que los modelos químicos se diferencian de los de la física, en el sentido de la concepción de teoría que, siguiendo a Euclides introdujo Newton, es decir, una estructura conformada por definiciones, postulados, demostraciones y corolarios (Assis, 1998), fundamento del estatuto científico de esta ciencia, no es equiparable al de la química. Por lo demás, hay que resaltar de manera crítica que algunos “historiadores” quieran resolver ese estatuto científico de la química, acudiendo a la idea de que la construcción definitiva de esta como ciencia, se debe a los desarrollos de la mecánica cuántica, como es el caso de la corriente epistemológica francesa, liderada por G. Bachelard (1976). Recuérdese aquí el camino sin salida que constituyó el intento de fundamentar la afinidad desde Newton (Stengers, 1991). El problema continua ya que sólo es en el siglo XXI, que los químicos han comenzado a preguntarse por el estatuto epistemológico de su ciencia, algo que ha de tener consecuencias en la conversión de sus modelos en contenidos curriculares, sobre todo para la educación básica y media (Scerri, 2001). En este contexto, las estrategias didácticas basada en la modelación o de construcción de modelos científicos en el aula, es factible que tenga consecuencias positivas, dentro de una mirada totalmente diferente a la que se ha venido sugiriendo (Nelson, 2002); en ella se hace indispensable recurrir a versiones históricas, con referencias específicas que den cuenta de esa construcción.

Ese recurrir a la historia, fundamento de cualquier aproximación epistemológica, ha indispensablemente que tener repercusiones curriculares, didácticas y pedagógicas. Para quienes han estudiado la propuesta de R. N. Gieré (1990), han de haber concluido que su concepción particular de modelo científico se basa específicamente en la física y en la mecánica clásica, desde cuya concepción se ha llevado a cabo un extrapolación a la enseñanza de las otras ciencias de la naturaleza, en el problema didáctico de la modelación, por lo que se comparten en este artículo los señalamientos críticos hechos por I. M. Greca y F. M. T. Dos Santos (2005).

Referencias

- Abbeg, R. (1904). Die Valenz und das periodische System. *Zeitschrift für anorganische Chemie*, 39, 330 – 380.
- Assis, A. K. T. (1998). Newton e suas grandes obras: o Principia e o Óptica. En: *Linguagens, leituras e ensino da ciência*. De Almeida, M. J. P. M. e da Silva, H. C. (Orgs); pp. 37 – 52. Campinas: Unicamp.
- Bacon, F. (1980). *Novum Organom*. México: Porrúa.
- Bachelard, G. (1979). *El racionalismo aplicado*. Buenos Aires: Paidós.
- Bachelard, G. (1976). *El materialismo racional*. Buenos Aires: Paidós.
- Bensaude-Vincent, B. (1991a). Mendeleiev: historia de un descubrimiento. En: *Historia de las ciencias*, Serres, M (Ed); pp. 503 – 525. Madrid: Cátedra.
- Bensaude-Vincent, B. (1991b). Lavoisier: una revolución científica. En: *Historia de las ciencias*, Serres, M (Ed); pp. 410 – 435. Madrid: Cátedra.

Bury, C. R. (1921). Langmuir's theory of the arrangement of electrons in atoms and molecules. *Journal American Chemical Society*, 43, 1602 – 1609.

Caldin, E. F. (2002). The structure of chemistry in relation to the philosophy of science. *International Journal for Philosophy of Chemistry*, Vol. 8, No. 2, 103 – 121. En línea: <http://www.hyle.org/journal/issues/8-2/caldin.html>

Carvajal, A. (2003). La función de la noción de diseño en tecnología. *Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica*, 103(41), 107 – 115.

Castro, E. A. (1992). El empleo de modelos en la enseñanza de la química. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(1), 73 – 79.

Comte, A. (1980). *Curso de filosofía positiva (lecciones 1 y 2). Discurso sobre el espíritu positivo*. Barcelona: Orbis.

Cranston, J. A. (1925). *The structure of matter*. London: Blackie and Son.

Del Re, G. (2000). Models and analogies in science. *Internacional Journal for Philosophy of Chemistry*, Vol. 6, No. 1, 5–15. En línea: <http://www.hyle.org/journal/issues/6-1/delre.html>

Fouréz, G. (1994). *Alfabetización científica y tecnológica*. Buenos Aires: Calihue.

Greca, I. M. y Dos Santos, F. M. T. (2005). Dificuldades da generalização das estratégias de modelação em ciências: O caso da física e da química. *Investigações em Ensino de Ciências*. En Línea: http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol10/n1/v10_n1_a2.htm

Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. and Smith, C. (1991). Understanding Models and their use in science conceptions of middle and high school teachers and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799 – 882.

Gallego Badillo, R., Pérez Miranda, R., Uribe B., M. V., Cuellar, L. y Amador Rodríguez, R. Y. (2004). El concepto de valencia: Su reconstrucción histórica y epistemológica y la importancia de su inclusión en la enseñanza. *Ciência & Educação*, Vol. 10, No. 3, 571 – 583.

Galagovsky, L. y Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(2), 231 – 242.

Gallego Badillo, R. (1998). *Discurso constructivista sobre las tecnologías*. Bogotá: Cooperativa Editorial Magisterio.

Gallego Badillo, R., Pérez Miranda, R. y Torres de Gallego, L. N. (1995). La química como ciencia: Una perspectiva constructivista. *Química, Actualidad y Futuro*, Vol. 5, No. 1, 55 – 63.

Gallego Torres, A. P. (2002). *Contribución del cómic a la imagen de la ciencia*. (Tesis doctoral). Valencia: Universidad de Valencia.

Gallego Torres, A. P. (2006). Consideraciones sobre la categoría epistemológica de modelo. *Tecné, Episteme y Didaxis*, No. 19, 114 – 127..

Gieré, R. N. (1990). *Explaining Science*. Chicago: University of Chicago Press.

Hanson, N. R. (1977). *Patrones de descubrimiento, observación y explicación*. Madrid: Alianza.

Heisenberg, W. (1967). Ley natural y estructura de la materia. En: *El humanismo en la filosofía de la ciencia. Problemas científicos y filosóficos*, De Gortari, E (Dir.), pp. 7 – 23. México: UNAM.

Hoffmann, R. (1997). *Lo mismo y no lo mismo*. México: Fondo de Cultura Económica.

Ihde, A. J. (1984). *The development of modern chemistry*. New York: Dover Publications.

Islas, S. M. y Pesa, M. A. (2003). ¿Qué rol asignan los profesores de física de nivel medio a los modelos científicos y a las actividades de modelado? *Enseñanza de las Ciencias*, Número Extra, 57 – 66.

Islas, S. M. y Pesa, M. A. (2004). Concepciones de los profesores sobre el rol de los modelos científicos en clases de física. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol. 17, No. 1, 43 – 50.

Izquierdo, M. (1988a). La contribución de la teoría del flogisto a la estructuración actual de la ciencia química. Implicaciones didácticas. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(1), 67 – 74.

Jensen, W. B. (1998a). Logic, history and the chemistry textbooks I: Does chemistry have a logical structure? *Journal of Chemical Education*, Vol. 75, No. 6, 679 – 687.

Jensen, W. B. (1998b). Logic, history and the chemistry textbooks II. Can we unuddle the chemistry textbook? *Journal of Chemical Education*, Vol. 75, No. 7, 917 – 828.

Jensen, W. B. (1998b). Logic, history and the chemistry textbooks III: One chemical revolution or tree? *Journal of Chemical Education*, Vol. 75, No. 8, 961 – 969.

Justi, R. S. (2002). Modeling Teachers' views on the Nature of modeling and implications for the Education of modelers. *International Journal of Science Education*, Vol. 24, No. 4, 369 – 387.

Kossel, W. (1916). Der Molekülbildung als Frage des Atombaus. *Annalen der Physik*, 4(49), 229 – 362.

Langmuir, I. (1819). The arrangement of electrons in atoms and molecules. *Journal of American Chemical Society*, 41, 868 – 934.

Leidler, K. J. (1995). *The world of Physical Chemistry*. New York: Oxford University Press.

Lewis, G. N. (1916). The atom and the molecule. *Journal of American Chemical Society*, 38, 762 – 785.

Lewis, G. N. (1923). *Valence and the structure of atoms and molecules*. New York: Chemical Catalog.

Lockemann, G. (1960). *Historia de la química*. México: Uteha.

Lombardi, O. (1986). Lombardi, O. (1998). La noción de modelo en ciencias. *Educación en Ciencias*, Vol. II, No. 4, 5 – 13.

Mason, S. F. (2001). *Historia de las ciencias. 4. La ciencia del siglo XIX*. Madrid: Alianza.

Nelson, G. (2002). Teaching chemistry progressively: From substances, to atoms and molecules, to electrons and nuclei. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, Vol. 3, No. 2, 215 – 228.

Oliva, J. M., Aragón, M. M., Bonat, M, y Mateo, J. (2003). Un estudio sobre el papel de las analogías en la construcción del modelo cinético-molecular de la materia. *Enseñanza de las Ciencias*, 21(3), 429 – 444.

Pérez Miranda, R., Gallego Badillo, R., Torres de Gallego, L. N. y Cuellar Fernández, L. (2004). *Las competencias interpretar, argumentar y proponer en química. Un problema pedagógico y didáctico*. (Memoria de investigación). Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional

Pérez Miranda, R., Gallego Badillo, R. y Torres de Gallego, L. N. (1996). La química básica: un mapa conceptual. *Química. Actualidad y Futuro*, 5(2), 94 – 100.

Restivo, S. (1992). La ciencia moderna como problema social. *Fin de Siglo*, No. 3, 20 – 39.

Scerri, E. (2003). Philosophical confusion in chemical education research. *Journal of Chemical Education*, Vol. 8, No. 5, 468 – 474.

Scerri, E. (1997). Has the periodic table been successfully axiomatized? *Erkenntnis*, 47, 229 – 243.

Scerri, E. (2001). The new philosophy of chemistry and its relevance to chemical education. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, Vol. 2, No. 2, 165 – 170.

Schneer, C. J. (1975). *Mente y materia*. Barcelona: Bruquera.

Scheler, M. (1926). *Erkenntnis und Arbeit*. Leipzig: Der Neue Geist.

Stengers, I. (1991). La afinidad ambigua: el sueño newtoniano de la química del siglo VIII. En: *Historia de las ciencias*, Serres, M. (Ed.), pp. 337 – 361. Madrid: Cátedra.

Tomasi, J. (1999). Towards “chemical congruence” of the models in theoretical Chemistry. *International Journal for Philosophy of Chemistry*, Vol. 5, No. 2, 79 – 115. <http://hyle.org/journal/issues/5-2/tomasi.html>

Toulmin, S. (1977). *La comprensión humana. Vol. 1. El uso colectivo y la evolución de los conceptos*. Madrid: Alianza.