

CONSIDERACIONES EPISTEMOLÓGICAS EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS: UNA PROYECCIÓN AL EQUILIBRIO QUÍMICO

Ramón L. Espinoza R.^{*}, Mercedes A. Salfate S.^{**}

Resumen

Cumplida la etapa de divulgación inicial, cabe ahondar para su mejor uso, en las componentes esenciales de la Transposición Didáctica. Ello, en primer lugar, porque es necesario explicitarlas tanto en su significado como en su accionar; en segundo lugar, por la relevancia que cobrará a futuro la Transposición, constituyéndose en un aporte indispensable para la construcción curricular. Se buscará una mayor inclusividad sin perder esencia en el conocimiento a impartir. Lo cual es una resultante obligada, dada la extensión incommensurable alcanzada por los saberes actuales, y cuya consecuencia inmediata es la búsqueda de los grandes principios unificadores que permitan articularlos.

Es aquí donde emerge la necesidad de un Análisis Epistemológico que señale con rigor las etapas de desarrollo que tuvo dicho conocimiento, conjuntamente con los respectivos principios epistemológicos, ontológicos y conceptuales, entregando de este modo las mejores pautas para el respectivo Análisis Didáctico.

Ejemplificando, se toma como referente al Equilibrio Químico, tópico básico que ha sido expuesto a la disfunción didáctica durante décadas, por ausencia de las pertinentes consideraciones epistemológicas que le corresponden.

Palabras claves: Transposición Didáctica, Análisis Epistemológico, Análisis Didáctico, Principios Ontológicos, Principios Conceptuales.

Abstract

Once fulfilled the stage of the initial spreading of the Didactic Transposition, it is necessary to go deeper in better use of their essential components. First, because it is necessary to make them explicit both, in their meaning as in their action ; secondly , for the reliableness that the Transposition will have in the future given its fundamental role in the formulation and structure of new curricula. It will be looked for a major inclusiveness without losing essence in the knowledge to be taught.

This is the obliged resultant , according to the immeasurable extension reached by the current lores, and whose immediate consequences is the searching of the origin of the unifying principles that allow to articulate them.

It is here that emerges the need of an Epistemological Analysis which indicates with rigor the stages of development that has reached the above mentioned knowledge, together with the repective epistemological , ontological and conceptual principles , delivering thus the best guidelines for the subsequent Didactic Analysis.

Exemplifying, we take as referring to the Chemical Equilibrium , a basic topic that has been exposed to the didactic dysfunction during decades , because of the absence of the pertinent epistemological considerations that correspond to it.

Key Words: Didactic Transposition , Epistemological Analysis , Didactic Analysis , Ontological Principles, Conceptual Principles.

^{*} Instituto de Ciencias Básicas/ Facultad de Ingeniería de la Universidad Diego Portales / ramon.espinoza@prof.udp.cl

^{**} Departamentos de Educación General Básica y Biología/ Facultad de Ciencias Básicas/ Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación/ msalfate@hotmail.com

Introducción

El permanente y sostenido crecimiento exponencial alcanzado por el conocimiento (Sanmarti, 2002), su casi inmediata divulgación y posterior aplicación tecnológica, plantean severos desafíos a la Educación actual. ¿Cuánto de este conocimiento debe incorporarse al currículum, dado su incuestionable impacto social?

Asistimos desde luego, a singulares circunstancias: no tiene sentido continuar enseñando conceptos con la misma estructura curricular que a mediados del siglo XX, existiendo más aún nuevos campos de investigación interdisciplinarios como son las ciencias ambientales, la biotecnología, la electrónica, la nanotecnología, etc. A ello se suma otra evidencia incontrastable: no se puede enseñar todo en la escuela y el pregrado y, en consecuencia, habrá que optar por criterios de selección de los contenidos que aseguren su validez para el siglo actual. Necesitamos, desde luego, alfabetizar en Ciencias a las generaciones del presente y futuro para que puedan ejercitar el autoaprendizaje de por vida, en un mundo inexorablemente cambiante. Para ello será necesario delimitar un área que contenga los grandes principios básicos y unificadores, formativos por tanto, que sustenten el paradigma anterior, pudiéndose citar entre otros: el principio de interacción materia-energía; la dualidad corpuscular-ondulatoria; el flujo genético; la discontinuidad en la materia y sus cambios, etc., etc.

Por otra parte, la enseñanza de las Ciencias, estando asociada al aprendizaje de conceptos y formulación de modelos, al desarrollo de destrezas experimentales y resolución de problemas, y al cultivo de actitudes y valores, conlleva una serie de tareas y responsabilidades ineludibles: como mediadora entre la Ciencia de los científicos y la ciencia formativa que se imparte en las escuelas, ha de prevenir que dicho conocimiento fluya sin apartarse de su concepción original. En consecuencia, enseñar Ciencias implica establecer puentes entre el conocimiento tal como lo expresan los científicos en sus comunicaciones y textos, y el conocimiento que los estudiantes puedan construir (Jiménez y Sanmarti, 1997).

Desde luego, el rol del docente en dicho proceso es determinante. En efecto, en una situación de enseñanza-aprendizaje, la ciencia que el profesorado imparte en el aula no es necesariamente idéntica a la del científico consagrado y, por ende, también diferente de la que construye el alumnado. La ciencia del profesor –otorguémonos la libertad de llamarla así– es el resultado de un proceso no

siempre explícito, de reelaboración del conocimiento de los expertos. Tradicionalmente, tanto el profesor de aula como autores de textos y otros involucrados en la docencia, han ideado “modelos didácticos” (los cuales incluyen analogías, lenguaje, ejemplos, simplificaciones, etc.) para facilitar el acceso de los alumnos al campo de la ciencia. Por esta vía, se ha dado cuerpo a un verdadero arsenal de “creaciones didácticas”, que aunque legítimas en su intención, pueden apartarse significativamente de la fuente original, cayendo en la “disfunción didáctica” cuyo producto final es la creación de “objetos patológicos de enseñanza”.

A objeto de prevenir lo anterior, y con motivo de las muchas creaciones didácticas que originó la enseñanza de las “Matemáticas Modernas” allá por la década de los sesenta durante el siglo pasado, en las últimas décadas surge en Europa, principalmente en Francia, una corriente de pensamiento que bajo el nombre de Transposición Didáctica se alza como mediadora entre el “conocimiento sabio” y el “conocimiento enseñado”, destinada a preservar la esencia del conocimiento erudito, no obstante las simplificaciones que se le puedan haber impuesto a este último (Verret, 1975); (Brousseau, 1980); (Chevallard, 1989); (Johsua y Dupin, 1993).

Transposición Didáctica

Nacida históricamente con motivo de la enseñanza de las “nuevas matemáticas o matemáticas modernas”, la transposición didáctica se difunde más allá de dicho ámbito, alcanzando a las llamadas “ciencias duras”. Además, Chevallard, su gran mentor, la incluye en la actualidad en la Teoría Antropológica de lo didáctico, con lo cual adquiere el marco teórico que la cobija adecuadamente. (Chevallard, 1999).

Como es sabido, dos son sus herramientas fundamentales: **Análisis Epistemológico** y **Análisis Didáctico** (Chevallard, 1991). El primero asegura la transformación y expresión de **un objeto de saber científico en objeto a enseñar**. El segundo, la transformación de un objeto a enseñar en **objeto de enseñanza** (Chevallard, 1991).

Si se le analiza dentro del contexto histórico de la Didáctica, se verá que su gran contribución ha sido la **revisión o resguardo epistemológico** (Brousseau, 1983) que todo contenido a enseñar debe experimentar, convirtiéndose virtualmente así en el “control de calidad” obligado del conocimiento que se pretenda impartir.

La generalización alcanzada en su corto periodo de vida es tal, que se ha llegado a identificarla con el pasaje de cualquier contenido de saber a una versión didáctica del mismo. Lo cual, evidentemente, no la favorece porque desdibuja o hace olvidar su misión originaria: resguardar la mejor transferencia del conocimiento sin desmedro de la legitimidad de este último.

Cabe señalar finalmente, que en la actualidad, dadas las urgencias educacionales que provienen en su mayoría de los procesos de globalización y convergencia en marcha, la Transposición Didáctica puede prestar sus mejores oficios. En efecto, la extensión incommensurable del conocimiento acumulado, con pronóstico igual o más acelerado aún para el futuro, hace imperioso delimitar áreas conteniendo los grandes principios unificadores que capaciten durante la formación inicial y pregrado, para asimilar nuevos contenidos a través del autoaprendizaje. Por ello, la elección y dosificación del currículo ha de hacerse con espíritu de inclusividad. Los grandes y actuales temas han de contener una red conceptual legítima en sus fundamentos y polivalente en sus proyecciones, tarea en la cual jugará especial papel la Transposición Didáctica, al proporcionar contenidos debidamente certificados en su validez. Un riguroso Análisis Epistemológico resguardará la autenticidad y proyección del conocimiento a impartir, así como el Análisis Didáctico señalará las mejores pautas para encauzar el aprendizaje en el aula y su entorno, al tener en cuenta los cambios epistemológicos, ontológicos y conceptuales que habrán de producirse.

Análisis Epistemológico

En sus términos más generales, le corresponde la revisión de las concepciones epistemológicas que sustentan a cualquier **objeto de saber** y, por supuesto e inexcusablemente, a todo **objeto de enseñanza**.

La Epistemología en su rol de filosofía de las ciencias o teoría del conocimiento como se le suele llamar, debe realizar una reflexión recursiva de los saberes establecidos, juzgando su formalidad y la metodología seguida en la generación de dichos conocimientos. Así, por ejemplo, se habla de una metodología de primer orden cuando nos referimos a las técnicas de investigación o técnicas de análisis empleadas, a una de segundo orden si nos situamos en la estructura de una teoría científica, etc.

Durante su quehacer, al señalar el camino seguido en la construcción de un determinado contenido de

saber, irán aflorando los respectivos principios epistemológicos que se pusieron en vigor. Por principio epistemológico se entiende el enfoque o mirada con que el hombre elaboró conocimiento: de un empirismo inicial pasó a un racionalismo, y por último a un constructivismo. De igual modo, y durante dicho accionar, se manifestarán los correspondientes **principios ontológicos**, y como producto final obligado y concreto, los **principios conceptuales** que correspondan al caso. Ejemplificando al respecto, cuando se establecen categorías ontológicas (Moulines, 1982), se puede concluir que la ecuación de Schrödinger corresponde a una ontología de primer orden (O1) al encadenarla con el electrón en su carácter de onda, carácter que le hace perder toda noción de ubicación clásica y, por ende, caer inevitablemente en una concepción y lenguaje probabilístico.

Con el advenimiento de nuevos campos del conocimiento, ha sido necesario abrir regiones epistemológicas que como su nombre lo refleja, muestran la textura epistemológica propia de cada uno de tales sectores. Desde este ángulo, al referirse a las "ciencias duras", es perfectamente lícito hablar de una epistemología de la Química, de la Física, de las Matemáticas, etc. La ventaja de ello es que no solo mejora la mirada regional, sino que además los hechos se relacionan e integran en un tejido contextual que proviene de distintos campos del saber, con lo cual los riesgos del solipsismo se reducen drásticamente.

Muy importantes dentro de las proyecciones del Análisis Epistemológico son los principios a que da lugar, porque ello permite enfrentar y superar en mejor forma las llamadas concepciones alternativas (Garret y Hackling, 1995) y "teorías de dominio" (Hirschfeld y Gelman, 1994), que el alumno trae tanto de su entorno social como de la transferencia o transmisión cultural que deviene en toda sociedad. Justamente, es con esas teorías que debe luchar el docente en su tarea de superarlas y reemplazarlas por nuevos esquemas conceptuales, cuando enfrenta lo que en décadas pasadas se designaba genéricamente como ideas previas o "pre-conceptos", traídos anticipadamente al aula.

Por último, es tal la incidencia o importancia de la Epistemología en Educación, que algunos pensadores y pioneros la reflejan planteando el siguiente dilema: ¿Existe la Transposición Didáctica o la Vigilancia Epistemológica? Término este último, bastante severo porque plantea que todo el nervio del asunto **validez del conocimiento**, está en cautelar su legítimo origen para que su posterior transposición se encauce debidamente. Reconociendo esta

potencial primacía, es que algunos zanján el dilema refiriéndose simplemente a las **Consideraciones Epistemológicas**.

Concepciones Epistemológicas de la Química

Las ciencias físicas y químicas en su desarrollo contemporáneo, pueden caracterizarse desde el punto de vista epistemológico como campos del pensamiento que rompen abiertamente con el conocimiento vulgar (doxa).

El solo hecho del carácter indirecto de muchas determinaciones experimentales en el contexto científico, nos sitúa en un nuevo ámbito epistemológico. Por ejemplo, cuando se trató de determinar los pesos atómicos bajo el influjo positivista, la técnica de la balanza—muy precisa por cierto—fue suficiente. Pero cuando en el siglo XX se conciben, detectan, y se pesan los isótopos, se necesita una técnica indirecta. El espectroscopio de masa indispensable para tales efectos, está basado en la acción de los campos eléctrico y magnético. Es un instrumento que se podría calificar de indirecto si se compara con la balanza. El quehacer de Lavoisier fundamentado en el positivismo de la balanza, está en relación inmediata con los aspectos continuos de la experiencia usual. No ocurre lo mismo cuando se añade un “electricismo” al materialismo. Los fenómenos eléctricos de los átomos están velados y hay que “instrumentarlos” en un aparato que no tiene correlato en la vida diaria. En la Química de Lavoisier se pesa el cloruro de sodio igual como se pesa la sal de cocina en el cotidiano. Esto es, no se cambia el pensamiento de la medida. En lo que respecta al espectroscopio de masa, es necesario un largo circuito en la ciencia teórica para comprender sus datos. De hecho, los datos ahora son resultados. Se trata nada menos, que de la primacía de la reflexión sobre la percepción, de la concepción e inspiración de fenómenos que habrá que provocar técnicamente: las trayectorias que permiten separar los isótopos en el espectroscopio de masa no existen en la naturaleza. La tarea actual será entonces, articular dichos resultados en una estructura conceptual que sea consistente y representativa del modelo en vigencia.

Resumiendo, la relación que se haga entre los fenómenos observados a escala macroscópica y su explicación a nivel microscópico, define la gran tarea permanente de la Química, y plantea un nuevo problema epistemológico que puede configurar el discurso en el aula de varias maneras; el término microscópico tan solo alude a un modelo que trata de describir de la mejor forma posible, una realidad a la que sólo podemos acceder indirectamente.

Ello nos lleva a impregnar la epistemología con un pluralismo filosófico, que sea capaz de informar elementos tan diversos de la experiencia y de la teoría, los cuales distan de situarse en igual nivel de madurez filosófica.

Caemos de este modo dentro de un espectro filosófico en que, para los efectos de su mejor manejo, las filosofías del conocimiento científico se ordenan a partir del eje racionalismo aplicado y materialismo técnico.

Cuando al racionalismo se le caracteriza según su poder de aplicación y su poder de extensión, se hace indispensable examinar los sectores particulares de la experiencia científica en donde se le aplica; con lo cual los hechos aislados o irregulares se tornarán en hechos científicos al estar interrelacionados lógicamente. Los sectores aludidos anteriormente, se constituyen luego en Regiones Epistemológicas, dentro de las cuales se sitúan la Epistemología de la Química, la Epistemología de la Física, etc.

Cabe señalar dentro de la Epistemología de la Química, el protagonismo central que tienen el Materialismo Racional y el Materialismo Técnico (Bachelard, 1989). En términos muy breves, la doctrina del Materialismo evoluciona desde su gran mentor, Thomas Hobbes, al materialismo científico que domina el segundo tercio del siglo XIX, hallándose dentro de sus cultores al notable químico Wilhelm Ostwald.

Consideraciones Epistemológicas aplicadas al objeto de enseñanza Equilibrio Químico

Se ha seleccionado el Equilibrio Químico por ser éste un ejemplo emblemático de disfunción didáctica. La casi totalidad de los textos de Química General presentan la deducción de la constante de equilibrio, K_{eq} , igualando las presuntas velocidades de reacción directa e inversa intervinientes, y en las cuales se **confunden coeficientes estequiométricos con orden de reacción**, esto es, con exponentes cinéticos que deben obtenerse experimentalmente. Con ello, en primer lugar, se omite que tratándose precisamente de un equilibrio, habría que aplicar entonces el tratamiento cinético correspondiente a reacciones reversibles, tal cual se presenta en obras clásicas (Laidler, 1970); en segundo lugar, un problema netamente energético se enfoca cinéticamente.

No es infrecuente que los autores respectivos enlacen las Unidades Programáticas de Cinética Química y Equilibrio Químico, lo cual nos parece prudente, siempre que la síntesis conceptual de ambas sea legítima en sus fundamentos y no se recubran

indebidamente. Así, por ejemplo, de la reacción global:



se puede formular el decrecimiento de B estableciendo con rigor la respectiva ley de velocidad:

$$v_B = (-d[B] / dt) = k[B]^\beta [D]^\gamma - k' [E]^\delta [F]^\epsilon \quad (2)$$

en que el exponente β es una magnitud experimental que puede o no coincidir con el coeficiente estequiométrico b , puesto que entre ambos no hay relación alguna; otro tanto acontece con γ y δ , y así sucesivamente. Sin embargo, al formular la respectiva constante de equilibrio para la reacción (1), nadie dudará de la participación de los coeficientes estequiométricos en la expresión:

$$K_{eq} = [E]^\epsilon [F]^\epsilon / [B]^b [D]^d \quad (3)$$

,en cuanto β y los otros exponentes tendrían que determinarse experimentalmente durante el estudio cinético de la reacción.

Aplicando un enfoque racionalista al desarrollo histórico del principio o ley del Equilibrio Químico, se concluye que K_{eq} es una constante termodinámica, de origen energético por tanto, y, en consecuencia, dependiente de la cantidad de materia que se considere puesto que de por medio hay una propiedad extensiva, cual es la energía G . Ello explica por sí solo, la presencia de los coeficientes estequiométricos en K_{eq} : que lo hagan como exponentes es algo que habrá que aclarar en el encadenamiento histórico y conceptual respectivo.

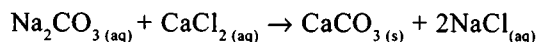
1.- Análisis Epistemológico del Equilibrio Químico

Implica su revisión histórica y la correspondiente interpretación o reflexión filosófica, para de ahí extraer las respectivas consecuencias ontológicas y conceptuales que tendrán especial gravitación en el Análisis Didáctico del problema bajo estudio.

Al hacer el análisis histórico conviene establecer que no se trata de emular el trabajo del historiador sino del epistemólogo, puesto que para el primero las ideas son hechos, en cambio para el segundo los hechos son ideas (Bachelard, 1974).

Explorando nuestro caso, hallamos que los primeros alcances al Equilibrio Químico se sitúan allá por el año 1799, cuando Claudio Luis de Berthollet, que se desempeñaba como asesor científico de Napoleón en su expedición a Egipto, observó durante este periodo los depósitos de carbonato de sodio que

cristalizan en las playas de los lagos salados de aquel país. Su inmediata inferencia no se hizo esperar: en el laboratorio al practicar la reacción, ...



se separaba por precipitación el $CaCO_3$, esto es, tenía lugar la reacción opuesta. Berthollet ante tal evidencia hubo de admitir que cuando existía un gran exceso de $NaCl$, la reacción podía ser inversa, transformando la calcita, materia también abundante en dichos lagos, en carbonato de sodio. Este episodio más otras reacciones que practicó en su laboratorio, le llevaron en 1803 a formular sus conclusiones en la siguiente forma: "la actividad química de una sustancia depende de la fuerza de su afinidad y de la masa que esté presente en un volumen dado".

Lamentablemente, Berthollet llevó sus conclusiones demasiado lejos llegando a sostener por último, que la composición final de los productos podía modificarse al variar las proporciones de la mezcla reactante. En la controversia que siguió con Luis Proust y que sirvió para establecer la Ley de las Proporciones Definidas, tanto sus aciertos como yerros se confundieron en el descrédito y sus ideas sobre el equilibrio químico quedaron olvidadas por espacio de unos cincuenta años. No obstante, la idea acerca de la influencia de las masas reactantes siguió rondando, y es así como en 1850, L. Wilhelmy, investigando la hidrólisis del azúcar en presencia de ácido, demostró que su velocidad es proporcional a la cantidad de azúcar aún presente, esto es, sin descomponer en aquel instante.

Curiosamente, con ello se abre un nuevo paréntesis que encierra una serie de estudios sobre la velocidad de las reacciones y no de los equilibrios químicos, y cuyas consecuencias se hacen sentir didácticamente hasta ahora. En 1862, Marcellin Berthelot y Peán de St.Gilles publicaron resultados similares a los anteriores en su famoso trabajo sobre la hidrólisis de ésteres (Ann. Chim. Phys., 3, 65, 385, 1862), donde se aprecia el efecto que sobre los productos finales provoca una variación en la concentración de los cuerpos reaccionantes.

Se sucedieron a continuación una serie de trabajos siguiendo la técnica cinética, esto es, midiendo variación de concentraciones en función del tiempo, aunque unilateralmente, a veces aplicada a los reactantes y otras a los productos. Coincidencia simple o fortuita, además, fue el hecho de que la mayor parte de las reacciones investigadas caen actualmente en la categoría de reacciones de primer orden o pseudo-primer orden, lo cual explicaría algunas de las conclusiones alcanzadas en aquella época.

No obstante, de aquel pasaje queda para la posteridad un hallazgo determinante: alcanzado el equilibrio final, la relación entre las masas de los productos y de los reactantes para una reacción reversible, guarda una constancia que permanece inalterable aunque se varíen las concentraciones iniciales de los reactantes. Lo cual, unido a la idea de que el equilibrio era dinámico y que por consiguiente, el proceso respectivo parecía estático debido a que tanto la reacción directa como la inversa tenían lugar con la misma velocidad, lleva a los químicos noruegos C. M. Guldberg y P. Waage durante el periodo 1864-1867, a formular matemáticamente la influencia de la masa sobre la actividad química, expresada esta última como velocidad (C.M. Guldberg y P. Waage: Journ. prakt. Chem., 19, pág. 69, 1879).

1.1.- Ley de acción de masas

Como se expuso anteriormente, Guldberg y Waage, basándose en datos experimentales que muestran el efecto que sobre los productos de una reacción se produce al variar las concentraciones de los reactantes (representadas genéricamente por c_B , c_D , ...etc.), generalizaron tales relaciones y las vincularon con el equilibrio químico. Asumiendo para este último una condición dinámica y considerando el posible número de colisiones moleculares que conducirían al cambio químico en una reacción tipo como la (1), postularon un vínculo entre aquellas y la velocidad de reacción. Mediante un simple análisis combinatorio se puede hallar que el total de dichas colisiones es aproximadamente proporcional al producto entre $(n_B)^b$ y $(n_D)^d$, siendo n_B y n_D las respectivas poblaciones actuantes de **B** y **D**, y **b** y **d** el número de moléculas que participan en cada acción elemental de la reacción.

Aplicando la unidad cierta de concentración a la reacción en equilibrio, y que permita expresar las cantidades de B y C actuantes en su forma genérica, c_B y c_D , se tendría finalmente que:

$$\text{Velocidad de reacción} \propto (c_B)^b (c_D)^d \quad (4)$$

Expresión de proporcionalidad esta última, que se puede transformar en igualdad incluyendo, para ello, una constante de proporcionalidad que en primera instancia fue conceptualizada como constante de **afinidad**, invocando a este concepto como la fuerza impulsora del cambio. Posteriormente, Guldberg y Waage (1879) rectificaron el carácter de dicha constante, invistiéndola como constante de velocidad, con lo cual la relación (4) quedó definitivamente en su forma:

$$\text{Velocidad de reacción} = k (c_B)^b (c_D)^d \quad (5)$$

Relación ésta, que se encuentra desprovista de una serie de consideraciones que en la actualidad forman parte de la Cinética Molecular; sin embargo, su lectura constituye el postulado fundamental de Guldberg y Waage, el cual se conoce contemporáneamente como **Ley de acción de masas**: "Al permanecer constantes los otros factores intervinientes, la velocidad de una reacción química es proporcional a las masas activas de las sustancias reactantes", entendiéndose por tales, la concentración de cada una de ellas elevada a una potencia igual al coeficiente estequiométrico respectivo que aparece en la ecuación ajustada.

Una consecuencia de (5) es que si se considera la reacción inversa, su velocidad apegada a la concepción cinética originalmente espuria, tendría que ser:

$$V_{\text{inversa}} = k_i (c_E)^e (c_L)^l \quad (6)$$

y, asumiendo que en el estado de equilibrio, $V_{\text{directa}} = V_{\text{inversa}}$, se tendría finalmente que:

$$(c_L)^l (c_M)^m / (c_B)^b (c_D)^d = (k_{\text{directa}} / k_{\text{inversa}}) = K \quad (7)$$

Esta relación deducida de (5) y (6), no obstante los reparos que se le deben formular respecto a su origen, proporciona en efecto la condición de equilibrio de una reacción química reversible, y en virtud de ello se le conoce como la expresión de la **Ley del Equilibrio Químico**. Cualesquiera que sean las concentraciones iniciales de B, D, L y E, cuando se alcanza el equilibrio las concentraciones respectivas deberán relacionarse de tal manera que se cumpla (7); por tal motivo, K se denomina constante de equilibrio de la reacción.

En la actualidad, la llamada ley de acción de masas estatuida por Guldberg y Waage no constituye un antecedente válido para la ley del equilibrio, puesto que se basa en un tipo muy particular de ecuación de velocidad de reacción, que sólo se cumple escasamente en contadas ocasiones según se puede testimoniar al adentrarse en el estudio de la Cinética Química. Confirmando lo dicho, algunos textos recientes la omiten totalmente, e incluso citan a la relación $[E]^e [L]^l \dots / [B]^b [D]^d \dots$, esto es, a la constante de equilibrio, como **expresión de acción de masas** (Umland y Bellama, 2000).

Por consiguiente, habrá que buscar en otras fuentes la verdadera demostración de la **ley del equilibrio químico**, lo cual se producirá históricamente cuando surge la concepción de la masa como variable termodinámica.

1.2.- Deducción termodinámica de la Ley del Equilibrio Químico

Se atribuye a J. Willard Gibbs y G.N. Lewis (Lewis, *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, 43, 259, 1907), el haber introducido **la masa como variable termodinámica**, al desarrollar el concepto de propiedades molares parciales en el último cuarto del siglo XIX. Aplicaron para ello el hecho de que cada forma de energía se puede expresar como el producto de dos variables: una extensiva y otra intensiva. Así, por ejemplo, en el caso del trabajo mecánico (W) se puede escribir: $dW = pdV$, y, en general, para cualquier tipo de trabajo se tendrá: $dW = \sum_i y_i dX_i$, donde y_i es la variable intensiva X_i la extensiva conjugada correspondiente. De este modo, y utilizando alguna unidad de masa (el mol), el trabajo originado por cualquier cambio químico-físico que haga variar las masas de los componentes de una mezcla, vendrá expresado por:

$$dW = \sum_i \mu_i dn_i \quad (8)$$

en que n_i es el número de moles del componente i , y μ_i la variable intensiva que por ahora no identificaremos. Combinando los principios esenciales de la Termodinámica Clásica, y agregando que el contenido energético de un sistema se puede expresar como función de las coordenadas termodinámicas escogidas y de las masas de sus constituyentes, se llega a:

$$dE = TdS - pdV + \sum_i \mu_i dn_i \quad (9)$$

de donde se desprende la definición de μ_i ,

$$\mu_i = (\partial E / \partial n_i)_{S,V, n_j} \quad (10)$$

Cabe además a Gibbs, el haber introducido la función de **energía libre**, $G = E - TS + PV$, a partir de la cual y en combinación con (9), se deduce que:

$$dG_{P,T} = \sum_i [(\partial E / \partial n_i)_{S,V, n_j}] dn_i = \sum_i \mu_i dn_i \quad (11)$$

Traduciendo el sentido físico e implicancia de (11), μ_i recibirá de aquí en adelante, el nombre de **energía libre molar parcial o potencial químico** del componente i de una mezcla. Además, adoptando su mayor generalidad, que puede implicar tanto a un cambio químico como físico, y teniendo en cuenta que G es una función de estado, ΔG será igual al estado final del sistema ($n_1' \mu_1' + n_2' \mu_2' + \dots$) menos su estado inicial ($n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \dots$), esto es:

$$\Delta G_{P,T} = (n_1' \mu_1' + n_2' \mu_2' + \dots) - (n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \dots) \quad (12)$$

La aplicación de (12) a nuestra reacción general (1) es inmediata y, por tanto:

$$\Delta G_{P,T} = (e \mu_E + l \mu_L + \dots) - (b \mu_B + d \mu_D + \dots) \quad (13)$$

Ahondando en el estudio acerca de la variación del potencial químico con respecto a la temperatura y presión, y aplicando ello a la termodinámica de las mezclas de gases, se llegó a la relación:

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln a_i \quad (14)$$

en que μ_i° es el potencial químico de la sustancia dada en el estado tipo elegido de actividad unidad, y a_i es su actividad en la mezcla que se considera. La relación (14) se generalizó muy pronto a las mezclas líquidas, siendo a_i ahora, la actividad del componente i en la disolución, y μ_i° su potencial cuando a_i es la unidad, esto es, cuando se halla precisamente en su estado tipo. Puesto que el potencial químico en un sistema ideal es independiente de la presencia de otros componentes (lo cual ahorra una serie de complicaciones y justifica la persistencia en la búsqueda de tales sistemas), es posible introducir la relación (14) en (13), obteniendo de este modo el cambio de energía libre de Gibbs:

$$\Delta G_{P,T} = \Delta G_T^\circ + RT \ln [a_L^l \cdot a_E^e / a_B^b \cdot a_D^d] \quad (15)$$

en la cual,

$$\Delta G_T^\circ = (l \mu_L^\circ + e \mu_E^\circ + \dots) - (b \mu_B^\circ + d \mu_D^\circ + \dots)$$

La expresión (15) suele citarse de una forma más abreviada :

$$\Delta G_{P,T} = \Delta G_T^\circ + RT \Pi_i (a_i)_{i_i}^{\nu_i} \quad (16)$$

donde Π_i representa el producto de las actividades a_i de los participantes de la reacción, cada una elevada a la potencia, ν_i , que se corresponda con el coeficiente estequiométrico respectivo en la ecuación química balanceada. Pasaje este último que hace recordar la heteróclita ley de acción de masas, agregando ahora que a los coeficientes estequiométricos de los reactantes se les considera como números negativos, y positivos en el caso de los productos.

La cantidad ΔG_T° conocida como **el cambio normal de la energía libre de Gibbs**, es la diferencia entre la energía libre de los números de moles de productos y la energía libre de los números de moles de los reactantes, indicados por la ecuación estequiométrica.

Alcanzado el equilibrio, $\Delta G_{P,T} = 0$, y en consecuencia,

$$\Delta G_T^\circ = - RT \Pi_i (a_i)_{i_i}^{\nu_i} \quad (17)$$

esto es,

$$- RT \Pi_i (a_i)_{i_i}^{\nu_i} = \Delta G_T^\circ = [(l \mu_L^\circ + e \mu_E^\circ + \dots) - (b \mu_B^\circ + d \mu_D^\circ + \dots)] \quad (18)$$

A temperatura constante el segundo miembro de (18) es constante, dado que los potenciales μ° se consideran como las energías libres standard, G°_T , las cuales a su vez son constantes que se hallan tabuladas y, por tanto, $\Delta G^\circ_T = [(l G^\circ_L + e G^\circ_E + \dots) - (b G^\circ_B + d G^\circ_D + \dots)] = C^{te}$.

Como RT, obviamente es constante, entonces:

$$[(a_L)^l (a_E)^e \dots / (a_B)^b (a_D)^d \dots] = C^{te}, \text{ esto es, } K_{eq} \quad (19)$$

$$\text{o de un modo más general, } K_{eq} = (\prod_i a_{ii})_{eq} \quad (20)$$

donde K mercedamente se denomina la **constante de equilibrio**. Ahora, las actividades son las propias que corresponden al sistema en equilibrio, y se hallan elevadas a una potencia que coincide con el coeficiente estequiométrico respectivo, dada la relación logarítmica que rige energéticamente a los potenciales químicos implicados en (14). La expresión (17) se conoce como la **Ley de equilibrio**, puesto que suministra una relación sencilla entre las actividades (más adelante presiones parciales o concentraciones en sistemas ideales, o bien, fugacidades o actividades en sistemas reales) de las sustancias reaccionantes y de los productos resultantes, cuando se alcanza el equilibrio en una reacción a una cierta temperatura.

Cabe señalar finalmente, que tanto (15) como (17) corresponden a la **Isoterma de reacción**, deducida por J.H. van't Hoff (1886), aunque sus bases fueron sentadas por Gibbs (1876) y H. von Helmholtz (1882).

1.3.- Principios Epistemológicos, Ontológicos y Conceptuales implicados en la malla del Equilibrio Químico

Hay una vasta gama de experiencias que muestran la existencia de una serie de dificultades en el aprendizaje de la Química (Gómez Crespo, 1996), las cuales persisten incluso después de intensos y prolongados periodos de instrucción. El cambio conceptual que viene a constituir la culminación de todo un proceso constructivista, tropieza con la forma en que el alumno organice y encaje el conocimiento que se le imparte, dentro del marco de sus **propias teorías implícitas** acerca de la naturaleza y comportamiento de la materia. Estas últimas se diferencian de las **auténticas teorías científicas**, en una serie de supuestos subyacentes de carácter epistemológico, ontológico y conceptual, que evidentemente chocan y obstaculizan el flujo de apren-

dizaje previsto (Pozo, 1996).

Es por ello que se hace imperioso, a través de las consideraciones epistemológicas correspondientes, **marcar el curso que siguió en sus diferentes etapas y componentes**, el conocimiento que se pretende construir o reconstruir según sea la filosofía educacional adoptada. Reconocido dicho curso, será tarea más fácil organizar el flujo de aprendizaje, evitando la creación de situaciones que pudiesen activar o superponer las teorías implícitas del estudiante.

Por consiguiente, y siguiendo el camino que se insinúa en los párrafos precedentes, la sinopsis histórica acerca de la génesis y elaboración del conocimiento propio del Equilibrio Químico, nos muestra esencialmente tres pasajes epistemológicos: partiendo de un **realismo** absoluto, se ha pasado a un **realismo-interpretativo** y, por último, a un **constructivismo** que proporciona modelos alternativos para interpretar la realidad. En el estudio de los fenómenos naturales no basta su observación atenta y profunda, sino que hay que construir representaciones idealizadas de los mismos, que aunque suponen una caracterización distinta de la realidad, mantienen vínculo estricto con ésta.

Dicho en términos más cercanos a la Epistemología de la Química, de un Empirismo inicial se transita a un Racionalismo aplicado: de este modo, los hechos se encadenan más sólidamente por cuanto se hallan implicados en una red de razones (Bachelard, 1974). Por esta vía vemos cómo de la observación inicial de Berthelot, y sumando experimentalmente otros casos similares, se alcanza un primer hito: muchos de estos sistemas cuando alcanzan el estado de equilibrio presentan una relación constante entre las masas de los productos y de los reactantes. La búsqueda de una justificación para ello, lleva a Guldberg y Waage a formular la ley de acción de masas, basándose en argumentos cinéticos no comprobados debidamente. Con el advenimiento de las propiedades molares parciales dentro de la Termodinámica, se alcanza por último la plena justificación de la Ley del Equilibrio Químico, la cual viene a superponerse a la primitiva ley de acción de masas.

Cabe señalar por último, que las dificultades de aprendizaje que puedan presentarse, tienen asiento en la forma en que el alumno organice sus conocimientos a partir de sus propias teorías implícitas sobre la naturaleza de la materia. Los supuestos epistemológicos impuestos por dichas teorías al sis-

tema de creencias del alumno, se contraponen a los supuestos subyacentes a la teoría científica, lo cual debe constituir un llamado de alerta para el subsecuente Análisis Didáctico. He ahí una tarea permanente para este último.

Desde el punto de vista ontológico, corresponde establecer las unidades mínimas sobre las cuales se basa la secuencia de construcción del conocimiento. Evidentemente, el aprendiz parte reconociendo **estados** y propiedades de la materia; los cambios entre estados o de propiedades bajo estudio controlado, lo llevan a explicarlos mediante **procesos**, para finalmente, interpretar la materia en términos de relaciones entre los elementos constitutivos de un **sistema** (Chi, Slotta, y Leeuw, 1994). La proyección a nuestro caso es inmediata: del reconocimiento de reactivos y productos de una reacción, se pasa al **proceso** de equilibrio, para establecer por último, un sistema que explique lo acontecido.

Naturalmente, en esta primera exploración ontológica lo que se ha hecho es determinar las unidades de base sobre las que se elaboró una ley. Distinto sería si se pretendiese explorar las categorías que el epistemólogo va a utilizar para estudiar los productos científicos, respondiendo a interrogantes tales como: ¿Todo elemento de una teoría científica debe tener contrapartida en el mundo real?, o bien, ¿se admite la existencia de conceptos instrumentales puramente teóricos y carentes por tanto, de un posible correlato en el mundo real?

Las consecuencias sobre el campo conceptual fluyen naturalmente: partiendo de hechos o datos, los fenómenos se **describen** en función de las propiedades y cambios observables, para luego pasar a **explicarlos** mediante relaciones causales simples. Vendrá luego su **interpretación** como un sistema de relaciones de **interacción**, para culminar en el ámbito de **modelos y teorías** que no sólo explican e interpretan, sino que además predicen. Por cierto, todos estos elementos se encuentran en cada pasaje de la Ciencia y serán determinantes para la enseñanza respectiva. En suma, el tan buscado cambio conceptual necesario para que el estudiante progrese desde sus conocimientos intuitivos hacia los conocimientos científicos, requiere ante todo interactuar con los diversos modelos y teorías desde los cuales se pueda interpretar la realidad.

ACÁPITE FINAL

El pasaje que acabamos de analizar, nos muestra cómo la falta de consideraciones epistemológicas puede conducir a una disfunción didáctica, que in-

cluso se prolonga hasta ahora en el tiempo. La creación de un objeto patológico como debe calificarse el presunto origen cinético de la Ley del Equilibrio Químico, es evidente (Espinoza y Salfate, 2004).

Las consecuencias de ello se han hecho sentir: las legítimas y múltiples aplicaciones de una ley del equilibrio químico basadas en su origen energético, han quedado veladas y dispersas restando con ello coherencia en el retículo conceptual respectivo.

El cambio conceptual, síntoma del crecimiento y ampliación cognitiva, se construye sobre la base de sus antecesores epistemológicos y ontológicos, y es el punto inicial para acceder a las grandes y culminantes categorías conceptuales con que se puede interpretar el estado de evolución de cada sector científico. Queda planteado el dilema respectivo: ¿por acaso son éstas las teorías (Moulines), o los paradigmas (Kuhn), o los programas de investigación (Lakatos)?

REFERENCIAS

- Bachelard, G., *Epistemología*, Editorial Anagrama, Barcelona, Sección I, p. 82-124, 1989.
- Bachelard, G., *Epistemología*, Editorial Anagrama, Barcelona, p. 187-193; p. 31-34.a, 1974.
- Brousseau, G., L'echec et le contrat, *Recherches*, **41**, pp.177-182, 1980.
- Brousseau, G., Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques, *Recherches en Didactique des mathématiques*, **4** [2], p. 165-198, 1983.
- Chevallard, Y., Le concept de rapport au savoir, *Proceedings of Seminaire de Grenoble IREM*, Université de Grenoble, France, 1989.
- Chevallard, Y. Traducción: El análisis de las prácticas docentes en la teoría antropológica de lo didáctico, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, **19** [2], p. 221-266, 1999.
- Chevallard, Y., *La transposición didáctica: "Del saber sabio al saber enseñado"*, Aique Grupo Editor S.A., Buenos Aires: (a) Cap. 4, p. 58; (b) Cap. 3, p. 52-53; (c) Cap. 1, p. 46, 1991.
- Chi, M.T.H., Slotta, J. & Leeuw, W., From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts, *Learning and Instruction*, **4** [1], p.27-43, 1994.
- Espinoza, R. & Salfate, M., Transposición Didácti-

ca: Una aplicación a las Ciencias Experimentales, *Rev. Chil. Educ. Cient.*, 3 [1], p. 26-33, 2004.

Garret, P.I., & Hackling, M.W., Students alternative conceptions in Chemistry, *Studies in Science Education*, 25, p. 69-95, 1995.

Gómez Crespo, M.A., Ideas y dificultades en el aprendizaje de la Química, *Alambique*, 7, p. 37- 49, 1996.

Hirschfeld, L., & Gelman (eds), *Mapping the mind*, Cambridge University Press, 1994.

Jiménez, R., & Sanmarti, N., La enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias de la Naturaleza en Educación Secundaria, *ICE*, 9, p. 17-45, 1997.

Johnsua, S. & Dupin, J., *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Presses Universitaires de France, PUF, París, 1993.

Laidler, K.L., *Reaction Kinetics. I*, Pergamon Press, Oxford, Chapter 1, 1970.

Moulines, U., *Exploraciones metacientíficas. Estructura, desarrollo y contenido de la ciencia*, Alianza Universidad, Madrid, 1982.

Pozo, J.I., *Aprendices y maestros*, Alianza/ Psicología Minor, Madrid, 1996.

Sanmarti, N., *Didáctica de las Ciencias en la ESO*, Síntesis, S.A., Madrid, p. 11-29, 2002.

Verret, M., *Le temps des études*, Librairie Honoré Champion, París, 1975.

Umland, J.B., & Bellama, J.M., *Química General*, Internacional Thomson Editores, S.A. de C.V., p. 533, 2000.