

Educación en la Química

ISSN 0327-3504

**Revista de la Asociación de Docentes en la Enseñanza de la Química
de la República Argentina**

Educación en la Química

es una publicación semestral de la Asociación de Docentes en la Enseñanza de la Química de la República Argentina, ADEQRA, Personería Jurídica N° 8933 que se distribuye gratuitamente a los miembros de esta Asociación. Es una revista que busca contribuir a la interrelación entre los docentes y los investigadores de las ciencias químicas y de la educación química. En ella se dan a conocer experiencias de aula, resultados de investigaciones, avances tecnológicos, noticias científicas, y todo otro aporte original que oriente el enriquecimiento y profesionalización del docente de química y colabore en el mejoramiento de su tarea.

Los editores agradecen cartas, ideas, sugerencias y artículos que puedan resultar de utilidad a otros colegas.

El contenido de los artículos firmados es responsabilidad de sus autores.

Se recomienda cautela al realizar los experimentos y demostraciones que se proponen.

Se autoriza la reproducción de los materiales, citando la fuente. (Título clave abreviado: Ed. en la Quim.)

Editor Responsable

Luz Lastres Flores

(ex-Universidad de B. Aires)

Co-editora

M. Gabriela Lorenzo

(Universidad de B. Aires)

Editores Asociados

Mónica Steinman

(ISP J. V. González, B. Aires)

Liliana Knabe

(Instituto Belgrano, Berazategui, B. Aires)

Consejo Asesor

Daniel Bartet (UMCE, Chile)

Erwin Baumgartner (Universidad de B. Aires)

Faustino Beltrán (Acad. Argentina de Artes y Ciencias de la Comunicación)

Martha Bulwik (ISP J. V. González, B.A.)

Raúl Chernikoff (Universidad N. de Cuyo)

Norma D'Accorso (Universidad de B. Aires)

Lilia Davel (Universidad de B. Aires)

Lydia Galagovsky (Universidad de B. Aires)

Andoni Garriz (UNAM, México)

Hernán Miguel (Universidad de B. Aires)

Norma Nudelman (Universidad de B. Aires)

Héctor Odetti (Universidad N. del Litoral)

Laura Vidarte (ISP J. V. González, B.A.)

Este número se edita con el aporte de un subsidio del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología

EdenlaQuim-ADEQRA. Depto de Química, Instituto Superior del Profesorado Dr Joaquín V. González. Av. Rivadavia 3577-2° piso (1204) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

e-mail: edenlaq@adeqra.com.ar



ADEQRA, Asociación de Docentes en la Enseñanza de la Química de la República Argentina, Personería Jurídica N° 8933, es una asociación sin fines de lucro que reúne a docentes de los diferentes niveles educativos de nuestro país, interesados en la formación y capacitación continua.

Entre los fines y objetivos de la Asociación que figuran en su Estatuto, pueden citarse:

- Procurar que la enseñanza de la Química sea cada vez más significativa y eficiente en todo el país y en los distintos niveles educativos.
- Promover el estudio y la investigación en la enseñanza de la Química en todos los niveles.
- Fomentar el intercambio y la comunicación entre personas y las instituciones dedicadas a la enseñanza de la Química.
- Contribuir al perfeccionamiento profesional de sus asociados mediante la divulgación de información científica, metodológica y de temas de interés común.
- Suscitar la inquietud de los docentes de Química por temas que contribuyan a ubicarlos frente a los problemas fundamentales de carácter científico y técnico que enfrenta el país.

Comisión Directiva.

Presidente: Luis Mario Costa

Vicepresidente: Celia E. Machado

Secretaria: Estela Zamudio

Prosecretaria: Myriam Klein

Tesorero: Dante Oscar Tegli

Protesorero: Raúl Enrique Fernández

1° Vocal titular: Andrés Raviolo

2° Vocal titular: Adriana Letícia Rocha

1° Vocal suplente: Violeta Torres

2° Vocal suplente: Gustavo Rodolfo Borro

Comisión revisora de cuentas

1° Titular: Karina Roxana Di Francisco

2° Titular: Luz Enriqueta Lastres Flores

3° Titular: Graciela Assenza Parisi

1° Suplente: Héctor Ricardo González

2° Suplente: Mónica Cristina Steinman

Domicilio legal, sede de ADEQRA

Instituto Superior de Formación Docente N° 24, B. Houssay. Pasaje Crámer (bis) 923 (1876) Bernal, Pcia de Buenos Aires, Argentina

Para reflexionar

DESTILACIÓN FRACCIONADA DE IDEAS CONDENSADAS. UNA INVITACIÓN AL DEBATE SOBRE LA NATURALEZA DE LA QUÍMICA.

María Gabriela Lorenzo

Centro de Investigación y Apoyo a la Educación Científica (CIAEC). Facultad de Farmacia y Bioquímica. Universidad de Buenos Aires. Argentina
ciaec@ffyb.uba.ar

Resumen

Se presenta un ensayo que pone sobre la mesa de discusión la naturaleza de la química comentando diferentes posiciones presentes en la bibliografía. Se propone una reinterpretación del triángulo de Johnstone y se alienta a la comunidad de profesores e investigadores en la química a participar del debate.

Palabras clave: naturaleza de la química, filosofía de la química, niveles de la química, Alex. H. Johnstone

Abstract

This essay discusses the nature of chemistry taking into account different point of view present in the bibliography. A new way for interpretation Johnstone's triangle is proposed. In addition, this is an invitation to professors and researchers in chemistry to participate in the debate.

Key words: nature of chemistry, philosophy of chemistry, chemistry levels, Alex. H. Johnstone

DISTINTAS POSTURAS SOBRE LA NATURALEZA DE LA QUÍMICA

Definir una postura difiere de la mera opinión porque requiere argumentos para fundamentarla; por ello, comenzaremos nuestra presentación preguntándonos: ¿Qué es la Química? El diccionario de la Real Academia Española de Lengua, en su Vigésima segunda edición nos entrega las siguientes acepciones:

1. *adj. Perteneciente o relativo a la **química**.*
2. *adj. Por contraposición a físico, concerniente a la composición de los cuerpos.*
3. *m. y f. Persona que profesa la **química** o tiene en ella especiales conocimientos.*
4. *f. Ciencia que estudia la estructura, propiedades y transformaciones de la materia a partir de su composición atómica.*
5. *f. Relación de peculiar entendimiento o compenetración que se establece entre dos o más personas.*

Tal vez nosotros podríamos decir que la Química es eso que en un cierto momento de nuestras jóvenes vidas nos deslumbró y nos atrapó para siempre, o en una expresión de seguramente exagerada pasión, hasta podríamos decir que la Química es *todo*¹.

¹ Un reconocido profesor universitario de Física, muy querido por mí, cierta vez al escucharme hablar sobre las "bondades" de la química, me corrigió diciendo que *todo* podía ser explicado por la Física, incluida la existencia de Dios. Ante mi asombro, seriamente agregó "*Dios es h*" (h = constante de Planck) Glup!

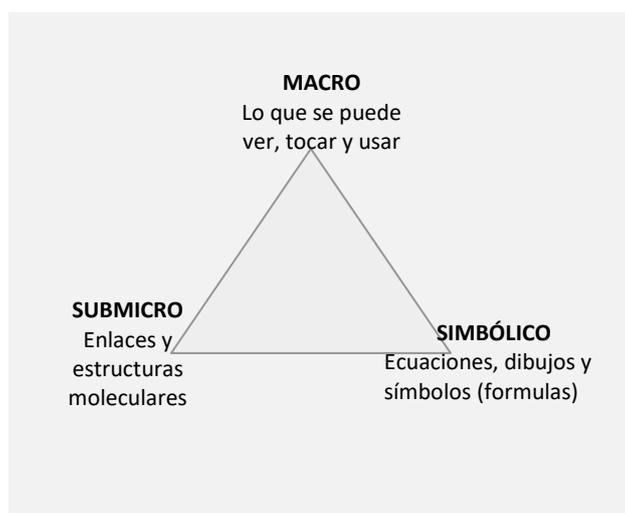
Más concretamente, o mejor más acotadamente, entre aquellos que han intentado responder a esta pregunta, o dicho de otro modo, de explicar la naturaleza de la Química, figura el profesor Alex H. Johnstone, en la actualidad “oficialmente retirado”. Graduado como químico en la Universidad de Edinburgo, Escocia, realizó posteriormente su doctorado en Educación Química en la Universidad de Glasgow. Enseñaba química inorgánica y su investigación se enfocaba a la Educación Química. Así estableció el Centro para la Educación Científica en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Glasgow, con más de doscientas publicaciones como resultado de sus trabajos.

Figura 1. Prof. Alex H. Johnstone



Entre sus aportes a la educación química se destaca su propuesta, ya clásica por estos días, del *triángulo de los niveles de la Química* (Johnstone, 1982, 1993, 2000). Según esta idea, el aprendizaje de la Química requiere el control de tres niveles de pensamiento (Figura 2), en el que cada vértice de un hipotético triángulo constituye un nivel representacional diferente, el nivel macroscópico, el submicroscópico y el simbólico.

Figura 2. Niveles de la Química según Johnstone



El nivel correspondiente a la macroquímica se relaciona con los fenómenos y las transformaciones que pueden ser directamente percibidas a través de los sentidos, esto es por lo tanto, cercano a la experiencia cotidiana de las personas y origen de numerosas concepciones sobre la Química (Nakhleh, 1992; Pozo & Gómez Crespo, 1998, 2005). La macroquímica, sin embargo, es asumida por los químicos como un reflejo o una consecuencia de lo que ocurre en un remoto e inaccesible lugar, el nivel de la submicroquímica, un mundo hecho de moléculas y átomos y de leyes que los gobiernan (Francoeur, 2000). Así, basándose en el pensamiento analógico, los científicos construyen modelos, físicos o simbólicos, para visualizar, comprender e interpretar los hechos considerando que sus propiedades encajan (al menos parcialmente) con las propiedades del objeto representado (Del Re, 2000).

De manera simultánea y paralela, se volvió necesaria la creación de un sistema de representaciones externas de modo tal que permitiera el análisis y la producción de nuevo conocimiento químico. Este nivel simbólico está presente en la comunicación química y le da sentido a lo observable en la macroquímica, a partir de las teorías derivadas de la submicroquímica. Así, Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2003, p.1354) escribieron sobre las explicaciones químicas:

“In order to talk about these macroscopic phenomena, use the symbolic level of representation that includes the pictorial, algebraic, physical and computational forms such as chemical equations, graphs, reaction mechanisms, analogies and model kits.”

En este nivel simbólico, el lenguaje de la química desempeña un papel trascendental. Permite conectar en un ida-y-vuelta los otros dos niveles. Así, trabajando sobre el papel pueden predecirse nuevas estructuras que podrán ser posteriormente sintetizadas, aisladas, purificadas, caracterizadas e identificadas en el laboratorio de química. Por otro lado, un nuevo sólido desconocido aislado de un medio de reacción, podrá ser interpretado y transformado en una fórmula sobre el papel (Jacob, 2001) gracias a la poderosa red de clasificación de sustancias y reacciones que constituyen el corazón de la Química (Schummer, 1998).

Esta propuesta de los tres niveles de pensamiento químico ha sido ampliamente aceptada al menos por muchos de los que se dedican a la investigación en la didáctica de la química, de reconocido prestigio a nivel internacional como John Gilbert (editor en jefe del Journal of Science Education y Profesor en la Universidad de Reading, Gran Bretaña) o David F. Treagust (de la Curtin University of Technology, Australia).

Sin embargo, también ha generado controversias, entre ellas la que presenta Lydia Galagovsky, una de las investigadoras en didáctica de la química más respetadas de la Argentina. Ella defiende la idea que el nivel submicroscópico de Johnstone, aquel de las moléculas y partículas varias, no deja de ser o pertenecer al nivel simbólico (Galagovsky y otros, 2003).

Y, dado que pensando sobre átomos y moléculas debemos convenir en que no son más (ni menos) que interpretaciones del mundo que se muestran como representaciones externas (Martí y Pozo, 2000) entonces, estaríamos tentados a compartir su opinión.

Mientras resuena en nuestra mente la pregunta si por ejemplo los átomos son o no son símbolos, descubrimos una nueva y emergente filosofía de la química que puede ayudarnos a responderla.

Martín Labarca, quien es pionero en la Filosofía de la Química en nuestro País, nos dice que los químicos y los educadores en química tienen una visión realista *“en el sentido que creen en los orbitales como si fueran entidades reales y concretas”* (Labarca, 2006, pp.65). Y agrega que esto es correcto si se acepta un pluralismo ontológico, es decir concede entidad ontológica a ciertos conceptos de la química. Y por si nos quedaran

dudas expresa contundentemente “*los orbitales son entidades reales pertenecientes a la ontología química*” (Labarca, 2006, pp.67).

Una lectura apresurada de los argumentos de Labarca nos llevaría a rechazar su propuesta. ¿Cómo que los orbitales son reales? ¿Cuántos investigadores y profesores de química creen eso? ¿Qué datos lo avalan cuando expresa “*la posición natural de los docentes de química es aceptar a los orbitales como entidades reales existentes en el mundo*”? (Labarca, 2006, pp. 66).

Sin embargo, ahondando en sus escritos, él no dice que sean “reales” en el sentido de que posean características materiales, concretas y perceptibles, porque nos aclara “*la ontología de la ciencia siempre resulta de la síntesis entre un esquema conceptual provisto por la teoría científica, y la realidad nouménica independiente*” (Labarca, 2006, pp.65). En realidad, intenta decirnos que son “tan reales” como otros conceptos de la Física, y con esto intenta rescatar a la Química del imperialismo de la Física², el cual parece ser una preocupación central entre los filósofos de la Química (Scerri, 2003, 2004, Labarca, 2005, Lombardi y Labarca, 2005, 2007).

Es aquí donde la confusión se apoderó de mi mente y a partir de la cual surgieron los pensamientos y consideraciones que compartiré con el amable lector, a continuación.

¿MODELO? ¿REALIDAD? ¿SÍMBOLO?

El haber tenido la oportunidad y el privilegio de escuchar personalmente a dichos autores argentinos, ha despertado en mí la necesidad de escarbar en algunas ideas de carácter filosófico (porque no me atrevo a decir, filosofar) sobre la naturaleza de la química.

Volviendo atrás, al triángulo de Johnstone, pareciera que el nivel submicroscópico es el que está causando más ruido entre aquellos preocupados por la naturaleza de la Química. En forma simplificada, entre aquellos que dicen que en realidad, es simbólico (Galagovsky) y los que sostienen que es real (Labarca), al menos desde una ontología química.

Entonces invito al amable lector a responder ¿qué es simbólico? ¿Será lo mismo que abstracto? Tal vez frases como la siguiente contribuyan a la confusión:

“La mayoría de los conceptos que nos son familiares tienen algo de tangible, algo que puede ser reconocido por nuestros sentidos. El aprendizaje de este tipo de conceptos nos resulta más sencillo que el de conceptos abstractos” (Galagovsky y otros, 2003, pp. 108).

Qué nos queda entonces por decir del amor o del miedo que siendo abstractos son conceptos ampliamente arraigados en nosotros.

Si como defiende Galagovsky las moléculas y los átomos son símbolos (por pertenecer al nivel simbólico) para explicar el mundo macroscópico, ¿será que lo *real* sea precisamente ese mundo macroscópico? ¿Podemos decir entonces que una solución anaranjada de, pongamos, dicromato de potasio, es más *real* que el catión potasio?

Y es aquí, donde permítame Ud. la licencia de emitir mis opiniones. Creo que deberíamos hacer un esfuerzo por definir qué entendemos por realidad, sobre todo los que no somos expertos en el estudio de estas cuestiones. Por ejemplo, todos hemos

² ¿No podríamos considerar simplemente a la Física como una poderosa herramienta que permite explicar algunos aspectos de la Química?

escuchado hablar de la *realidad virtual*, esto encierra una paradoja en sí misma y sin embargo, la aceptamos y ya está instalada entre nosotros, pero si nos detenemos sólo un poco sobre esa idea, no puede menos que provocarnos desconcierto ¿es real o es virtual?

Y ¿qué es lo *real*? Recurriendo una vez más al diccionario (RAE,22a Ed.):

real¹. (Del lat. *res, rei*).

1. adj. Que tiene existencia verdadera y efectiva.

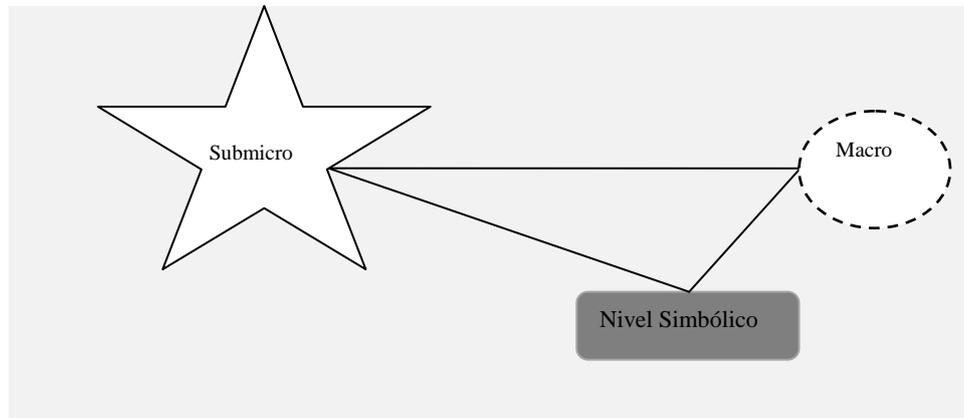
virtual.

1. f. Inform. Representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real.

¿Qué pasaría si definiésemos *realidad* como aquello que podemos conocer³? Esta definición, creo, me posiciona en un punto de vista racionalista, y deja de lado el nouménico kantiano. Ahora bien ¿cómo podemos conocer los seres humanos? Aquí creo, que hay al menos dos grandes maneras; a través de los sentidos (exteriores e interiores), y a través de la razón. Estas dos vías me las imagino complementarias pero de sentidos opuestos (desde un punto de vista vectorial del término). Como dos formas válidas de interactuar con lo que está fuera de nosotros, con una roca, con la Internet, o con los sentimientos del otro.

De esta manera, si aceptamos que la realidad es aquello externo o interno a nosotros *conocible*, así tal vez, los modelos y los precipitados, no serían tan distintos como se hubiera pensado inicialmente. Entonces, podríamos reinterpretar al triángulo de Johnstone girándolo de la siguiente manera:

Figura 3. Reinterpretación del triángulo de Johnstone



Esta nueva forma de representarlo conlleva una nueva forma de ver el problema y pone de manifiesto una vez más la importancia que los sistemas externos de representación tienen a la hora de pensar sobre el mundo, de construir conocimiento (Gilbert, 2005, Pozo, 2001, Wu, Krajcik & Soloway, 2001).

A través de la redescipción de este modelo intento condensar las siguientes ideas: No sé por qué el triángulo deba suponerse equilateral. En primer lugar, yo aquí me he decidido por uno escaleno, en un intento de ponderar los distintos niveles; y, en segundo

³ He aquí otro problema. Ante esta posición se podrá argüir que podemos conocer cosas que no existen, como los fantasmas y los dragones. Parece cierto que no hay evidencia científica que avale su existencia ¿por eso no existen? (Y evitemos aquí discutir otras existencias más sublimes).

lugar, en vez de apoyarlo sobre un lado, lo he dibujado pivotando sobre un ángulo. ¿Qué estoy intentando transmitir con todo esto?

El nivel macroscópico correspondería a la realidad perceptible de bordes imprecisos y variables (trazo discontinuo), a aquello que podemos conocer a través de los sentidos, a través de la percepción, ya no en forma individual (que yo uso lentes, que tú no oyes) sino como especie. Esto también parece importante resaltarlo. La Química, más allá de sus niveles, como cualquier otra ciencia o forma de conocimiento humano, trasciende lo personal por ser un producto histórico y colectivo. No se vale para su análisis las consideraciones individuales y egocéntricas.

Por su lado, el nivel submicroscópico sería un mundo de *realidad ideal*, que se aleja del carácter platónico porque está construido colectivamente, discutido y consensuado a través del razonamiento humano (si no por el de todos, al menos por la subespecie de químicos). La estrella y la circunferencia de trazo discontinuo, de diferente tamaño, también intenta representar la idea de la mayor relevancia que va adquiriendo día a día este mundo ideal y submicroscópico. La posibilidad que brindan las nuevas tecnologías de *ver chocar moléculas* o ver cómo se modifica una gráfica modificando algunas variables en la pantalla de una computadora para ilustrar el mecanismo de una reacción química, seguramente terminará por eliminar de nuestra química diaria muchas experiencias de laboratorio que demandan más tiempo y recursos, cuando no riesgos, para implementarlas, aunque esta idea sea en extremo dolorosa para los químicos de mesada. Esto ya se observa en numerosas propuestas de enseñanza de la Química que utilizan programas informáticos o el más sencillo presentador de diapositivas o películas (en computadora o DVD, y hasta que ya casi es innecesaria tal distinción).

Estas *realidades*, la perceptible y la ideal, quedarían balanceándose sobre sistemas de recursos simbólicos y notacionales que nos permiten hablar sobre ellas, representarlas y a partir de allí, producir explicaciones y predicciones, objetivos centrales de la actividad científica (Klimovsky, 1997).

¿A dónde nos lleva esta línea de pensamiento? ¿Vale la pena discutir e invertir nuestro tiempo en estas cuestiones? Obviamente estoy convencida no sólo de que vale la pena, sino que además, creo que van en camino de convertirse en imperiosa necesidad.

Los “datos reales” del mundo en que vivimos nos muestran que las cosas han cambiado y que seguramente continuarán modificándose. Eso hace que nuestros alumnos tampoco sean los de antes y para complicar aún más el panorama, las sociedades desarrolladas requieren cada vez de un número mayor de científicos (químicos incluidos) a la vez que cada vez son menos los jóvenes interesados en la ciencia.

Nosotros podríamos cruzarnos de brazos esperando a que mágicamente todo se solucione, podríamos acompañar el proceso con algunas quejas y lamentaciones o podríamos hacer algo. Reflexionar sobre nuestra propia disciplina fundamentadamente, usando los aportes de la historia, la filosofía y la sociología de la ciencia podría ser un buen comienzo.

COROLARIO

Como ya he dicho, el sentido de estas breves páginas ha sido un esfuerzo de reflexión a la vez de un intento por encontrar (o construir) un terreno menos pantanoso por donde movernos. La metáfora de la destilación me pareció adecuada pensando que, tal vez, también las ideas pudieran ser purificadas si nos decidiéramos a recapacitar sobre ellas. Pero también he querido provocar el debate y la discusión de estos temas entre aquellos preocupados por la química y su naturaleza. Espero haberlo conseguido.

Agradecimientos

La investigación y redacción de este artículo fue realizado con el financiamiento recibido a través de los siguientes proyectos de investigación: UBACYT B-051 (2004-2007), PICT 2005 N° 31947, y PICT-O 2005 N° 35552.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- del Re, G.** (2000) Models and analogies in science. *HYLE, An International Journal for the Philosophy of Chemistry*, 6 (1), 5-15.
- Francoeur, E.** (2000) Beyond dematerialization and inscription. Does the materiality of molecular models really matter? *HYLE, An International Journal for the Philosophy of Chemistry*, 6(1), 63-84.
- Galagovsky, L., Rodríguez, M., Stamati, N. y Morales, L.** (2003) Representaciones mentales, lenguajes y códigos en la enseñanza de las ciencias naturales. Un ejemplo para el aprendizaje del concepto de *reacción química* a partir del concepto de *mezcla*, *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (1), 107-121.
- Gilbert, J.** (2005) Visualization: A metacognitive skill in science and science education, in: Gilbert, J., Ed., *Visualization in Science Education*, Dordrecht: Springer.
- Jacob, C.** (2001) Analysis and synthesis. Interdependent operations in chemical language and practice. *HYLE, An International Journal for the Philosophy of Chemistry*, 7(1), 31-50.
- Johnstone, A.** (1982) Macro- and micro-chemistry. *School Science Review*, 64, 377-379.
- Johnstone, A.** (1993) The development of chemistry teaching. *Journal of Chemical Education*, 70, 701-705.
- Johnstone, A. H.** (2000) Teaching of chemistry- logical or psychological? *Chemistry education: Research and practice in Europe*, 1(1), 9-15.
- Klimovsky, G.** (1997) *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*, Buenos Aires: AZ Editora.
- Labarca, M.** (2005) La filosofía de la química en la filosofía de la ciencia contemporánea, *Redes*, 11 (21), 155-171.
- Labarca, M.** (2006) La filosofía de la química y su impacto en la educación científica, *Educación en la Química*, 12 (2), 59-70.
- Lombardi, O. y Labarca, M.** (2005) The ontological autonomy of the chemical world, *Foundations of Chemistry*, 7, 125-148.
- Lombardi, O. y Labarca, M.** (2007) The philosophy of chemistry as a new resource for chemistry education, *Journal of Chemical Education*, 84 (1), 187-192.
- Martí, E. y Pozo, J. I.** (2000) Más allá de las representaciones mentales: la adquisición de los sistemas externos de representación. *Infancia y Aprendizaje*, 90, 11-30.
- Nakhleh, M. B.** (1992). Why some students don't learn chemistry. Chemical misconceptions. *Journal of Chemical Education*, 69 (3), 191-196.
- Pozo, J. I.** (2001) *Humana mente. El mundo, la conciencia y la carne*, Madrid: Morata.
- Pozo, J. I.** (2003). *Adquisición de conocimiento: Cuando la carne se hace verbo*. Madrid: Morata.
- Pozo, J. I., & Gómez Crespo, M. A.** (2005) The embodied nature of implicit theories: The consistency of ideas about the nature of matter. *Cognition and Instruction*, 23, 351-387.

- Pozo, J.I. & Gómez Crespo, M.A.** (1998). *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Madrid, Morata.
- Scerri, E.** (2003) Constructivism, Relativism and Chemistry, In *Chemical Explanation, Proceedings of New York Academy of Sciences*, vol , 988, J. E Earley (ed.), New York.
- Scerri, E.** (2004) Just How Ab Initio is Ab Initio Quantum Chemistry? *Foundations of Chemistry*, 6, 93-116.
- Schummer, J.** (1998) The chemical core of chemistry I: A conceptual approach. *HYLE, An International Journal for the Philosophy of Chemistry*, 4 (2), 129-162.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., & Mamiala, T. L.** (2003) The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25, 1353-1368.
- Weininger, S. J.** (1998) Contemplating the finger: Visuality and the semiotics of chemistry. *HYLE, An International Journal for Philosophy of Chemistry*, 4 (1), 3-27.
- Wu, H. K., Krajcik, J. S., & Soloway, E.** (2001) Promoting understanding of chemical representations: students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38, 821-842.