

Propiedades emergentes: un reto para el químico intuitivo

Vicente Talanquer*

Abstract (Emergent Properties: A Challenge for the Intuitive Chemist)

Many of the alternative conceptions that science students hold can be explained as the result of the application of common sense or naïve forms of reasoning. In the present work we investigate the intuitive ideas of college students about some emergent properties of chemical compounds such as color, smell, and taste. To this end, we used quantitative methods of research based on multiple-choice questions collected at the end of the first semester of an introductory general chemistry course for science and engineering majors. Our results indicate that most students at this level rely on an additive model to predict the properties of chemical compounds, overlooking the possibility of emergent properties resulting from the interaction of the atoms which compose the system.

Introducción

En los últimos años varios autores han sugerido que una gran proporción de las concepciones alternativas de los estudiantes de ciencias son el resultado de la aplicación de razonamiento guiado por la intuición o el “sentido común” (Driver, Guesne, y Tiberghien, 1985; Driver *et al.*, 1994; Viennot, 2001; Talanquer, 2002, 2005, 2006). Este tipo de razonamiento se basa en una serie de suposiciones sobre la naturaleza del mundo que nos rodea, y en el uso de estrategias de razonamiento que simplifican la toma de decisiones y la construcción de inferencias con base en la información disponible (Pozo y Gómez-Crespo, 1998; Furió y Furió, 2000; Campanario y Otero, 2000; de Cudmani, Pesa y Salinas, 2000; Hilton, 2002). En particular, en un artículo reciente en esta misma revista (Talanquer, 2005) hemos analizado el conjunto de suposiciones (principios intuitivos) y estrategias de razonamiento (procesos heurísticos) que parecen esconderse detrás de muchas de las concepciones alternativas de los estudiantes de química.

De acuerdo con nuestro análisis, el estudiante de química primerizo, representado por el químico intuitivo “QuI,” posee una visión filosófica del mundo cercana al Realismo Ingenuo (Hayes, 1979; Driver, Guesne y Tiberghien, 1985; Pozo y Gómez-Crespo, 1998; Furió y Furió, 2000; Viennot, 2001). Desde esta postura filosófica, QuI manifiesta una

confianza extrema en sus sentidos como instrumentos de investigación y análisis de las propiedades de los objetos y los procesos naturales, y tiende a concebir a los modelos científicos como representaciones fieles de la realidad. Su visión del mundo se complementa con una serie de principios intuitivos sobre la naturaleza y propiedades de las sustancias y procesos químicos, y por un conjunto de procesos heurísticos que guían y restringen su razonamiento (ver tabla 1).

Los principios intuitivos y procesos heurísticos en los que se fundamenta el razonamiento de QuI están relacionados y seguramente se activan de manera simultánea cuando este químico intuitivo enfrenta un problema, busca una explicación o toma una decisión. Sin embargo, su distinción facilita el análisis de las concepciones alternativas del estudiante de química primerizo y de las dificultades que seguramente enfrenta al tratar de reconciliar su visión del mundo con la propuesta por las teorías científicas modernas. En particular, en este artículo se ilustra cómo nuestro modelo del químico intuitivo resulta de gran utilidad para analizar y predecir las dificultades que los estudiantes de química tienen para entender las propiedades emergentes de los compuestos químicos. Nuestro estudio se centra en el análisis de las predicciones de estudiantes de química general a nivel licenciatura sobre el color, olor y sabor de compuestos resultantes de la reacción química entre dos sustancias representadas a nivel molecular. Las predicciones se basan en el conocimiento de las propiedades perceptibles de los reactivos y de la composición y estructura molecular de reactivos y productos.

Propiedades y procesos emergentes

El término “propiedad emergente” en general se refiere a aquellas propiedades de un sistema que son distintas de las propiedades de los componentes individuales y que resultan

Tabla 1. Principios y procesos que guían y restringen el razonamiento del Químico Intuitivo.

Visión del Mundo Realismo Ingenuo	
Principios Intuitivos	Procesos Heurísticos
Continuidad Esencialismo Sustancialismo Causalidad Mecánica Teleología	Asociación Reducción Fijación Secuenciación Lineal

Department of Chemistry, University of Arizona. Tucson, AZ 85721
(vicente@u.arizona.edu)

de las interacciones entre sus partes. Tales propiedades no pueden predecirse fácilmente con base en las propiedades de los componentes individuales y desaparecen cuando el sistema se reorganiza o descompone. Aunque hoy día el concepto de “propiedad emergente” se utiliza comúnmente para describir las propiedades de sistemas complejos no-lineales con miles o millones de partículas, la realidad es que se trata de un concepto central en química (Luisi, 2002). Las propiedades químicas de un solo átomo son emergentes con respecto a las propiedades de los electrones, protones y neutrones que lo componen. Las propiedades químicas de una molécula (compuesto) son emergentes con respecto a las de los átomos presentes (elementos). Las propiedades de un líquido como el agua son emergentes con respecto a las de las moléculas individuales presentes en el fluido.

De forma análoga a como hemos descrito las propiedades emergentes de un sistema podríamos hablar de “procesos emergentes.” En este caso nos referimos a procesos que resultan de la interacción simultánea, y en muchos casos azarosa, de los componentes de un sistema. Se trata de procesos que emergen de la acción colectiva, simultánea y continua de las partes sin que sea fácil determinar una causa o una secuencia causal determinada. Un ejemplo típico de proceso emergente es la difusión de un fluido en otro, la cual resulta del movimiento azaroso y de la interacción de todas las partículas en el sistema (otro ejemplo lo constituye el equilibrio químico). Los procesos emergentes se distinguen de los “procesos causales directos” los cuales tienden a ocurrir en sistemas con partes interdependientes y bien diferenciadas que interaccionan de manera restringida y secuencial. Un ejemplo de este tipo de proceso lo constituye la circulación sanguínea.

Recientemente, Micheline Chi (Chi, 2005) ha sugerido que es de esperar que los estudiantes tengan concepciones alternativas más robustas y resistentes sobre procesos emergentes que sobre procesos causales directos, pues de manera intuitiva los seres humanos tendemos a concebir todo proceso como perteneciente a la segunda categoría. En el lenguaje utilizado por Chi, un estudiante que concibe la difusión como un proceso causal directo realiza una categorización ontológica equivocada y tendrá serias dificultades para entender el mecanismo que da lugar al proceso. Desde nuestra perspectiva, esta dificultad conceptual se debe a la aplicación del principio intuitivo de causalidad mecánica (Andersson, 1986; Gutierrez y Ogborn, 1992; Viennot, 2001) y del proceso heurístico de secuenciación lineal (Driver, Guesne y Tiberghien, 1983; Viennot, 2001). Para el químico intuitivo todo cambio o proceso en un sistema es inducido por un agente activo el cual actúa sobre un agente pasivo (causalidad mecánica) haciendo evolucionar al sistema en una secuencia en la que las diversas partes involucradas intervie-

nen de una en una, en momentos específicos, y en una progresión determinada (secuenciación lineal).

Así como los estudiantes tienen problemas para analizar y comprender los procesos emergentes, es de esperar que tengan dificultades para reconocer, comprender y predecir la existencia de propiedades emergentes en sistemas químicos. En general, cuando el químico intuitivo se enfrenta a un problema en el que actúan varias variables o se combinan diversos efectos, QuI tiende a combinarlos linealmente y a distribuir el efecto total homogéneamente entre las diversas partes del sistema (proceso heurístico de aditividad). Si seguimos un razonamiento análogo al utilizado por Chi en su análisis de procesos directos y emergentes y clasificamos las propiedades de los sistemas químicos en aditivas y emergentes, uno debe esperar que QuI considere que las propiedades de sistemas complejos sean esencialmente aditivas y resulten de la combinación lineal de las propiedades individuales de sus componentes. Así, QuI debe tener serias dificultades para reconocer la existencia de propiedades emergentes. En las siguientes secciones describimos la metodología y los resultados de la investigación realizada para comprobar la validez de esta hipótesis.

Metodología

Con el fin de investigar las ideas de estudiantes de licenciatura sobre propiedades emergentes de los compuestos químicos, se diseñó un cuestionario con doce preguntas de opción múltiple en las que se pide predecir el color (4), el olor (4), o el sabor (4) del compuesto resultante de la reacción química entre dos sustancias representadas a nivel molecular. En cada una de las preguntas del cuestionario se incluyen la representación corpuscular (modelo microscópico) de los reactivos y el producto, utilizando círculos o esferas de diferente color para representar diferentes tipos de átomos, y la descripción de las propiedades pertinentes de cada uno de los reactivos. Las doce preguntas se presentaron secuencialmente en tres diferentes salones de clases utilizando una presentación de *PowerPoint*, dando 15 segundos a los estudiantes para elegir la opción que mejor describe las posibles propiedades del producto representado en cada transparencia. La figura 1 ilustra la estructura típica de las transparencias utilizadas.

El estudio fue realizado en una universidad el suroeste de los Estados Unidos en tres grupos distintos de Química General I, un curso introductorio de química para estudiantes de ciencias e ingeniería. En este curso se cubren conceptos básicos sobre propiedades de la materia, estructura atómica y molecular, estados de agregación y reacciones químicas (estequiometría y termoquímica). El cuestionario fue aplicado al inicio de una de las sesiones regulares del curso en la penúltima semana antes de finalizar el semestre.

Para ese entonces, los conceptos centrales sobre propiedades de compuestos y reacciones químicas ya habían sido presentados en el salón de clases. Un total de 456 estudiantes respondieron y devolvieron el cuestionario, aunque no todos ellos contestaron todas las preguntas. Esto explica la diferencia en el número total de respuestas para cada una de las preguntas analizadas en la siguiente sección. Cada pregunta fue analizada estadísticamente para determinar la frecuencia de selección de las diferentes opciones.

Resultados

Con el fin de facilitar el análisis de resultados, la discusión en esta sección se centra en las respuestas de los estudiantes a las cuatro preguntas que requieren hacer una predicción sobre el color del producto de una reacción química entre dos sustancias. Estas respuestas son ilustrativas del patrón general observado en todas las respuestas del cuestionario. Sin embargo, también se señalan las diferencias significativas detectadas en la predicción del olor y sabor del producto químico.

La figura 2 presenta las predicciones de los estudiantes sobre el color del compuesto químico que resulta de la combinación 1:1 de los átomos de sustancias de color azul y amarillo. La mayoría de los estudiantes (90.4%) indicó que el producto de la reacción sería de color verde de acuerdo con un esquema aditivo para la predicción del color, y sólo el 7.61% consideró que el color del producto podría ser diferente. No es posible determinar con base en estos resultados si los estudiantes que escogieron la opción d) en esta pregunta lo hicieron porque reconocen que el color es una propiedad emergente de los compuestos químicos o por otra razón. Sin embargo, resultados preliminares basados en el análisis de la consistencia de las respuestas a todas las preguntas del cuestionario y en entrevistas individuales indican que una importante proporción de estos alumnos también aplica el proceso heurístico de aditividad pero introduce factores adicionales en la toma de decisiones.

La tendencia de la mayoría de los estudiantes a aplicar el proceso heurístico de aditividad en la predicción del color de un producto químico es confirmada por sus respuestas a las otras tres preguntas de este conjunto. La figura 3 presenta los resultados para la predicción del color del producto resultante de la combinación 4:1 de los átomos de sustancias de color azul y amarillo. En este caso, una gran proporción de los alumnos (79.6%) indicó que el producto tendrá un color azulado como sería de esperar si se aplica un esquema aditivo en el que las propiedades del producto resultan del promedio ponderado de las propiedades de los componentes. Un resultado muy similar se obtuvo en la pregunta en la que se pide a los estudiantes predecir el color del producto de una combinación 1:3 de una sustancia azul oscuro y una

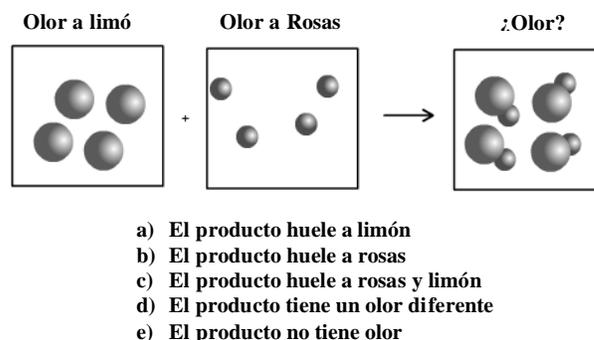


Figura 1. Estructura de las transparencias utilizadas en las preguntas del cuestionario diseñado para investigar las ideas de los estudiantes sobre propiedades emergentes de los compuestos químicos.

sustancia sin color (ver figura 4). En este caso muchos estudiantes consideraron que el producto tendría un color azul claro (68.7%). Los resultados preliminares de entrevistas individuales indican que la pregunta tal y como se formuló no es del todo clara, pues algunos estudiantes interpretaron la frase “sin color” como equivalente a transparente y otros como “blanco.” Esta diferencia de interpretación puede llevar a los estudiantes a dudar entre las opciones a) y b), sin embargo esta confusión no afecta el hecho de que su razonamiento se basa en la aplicación de un esquema aditivo para hacer la predicción.

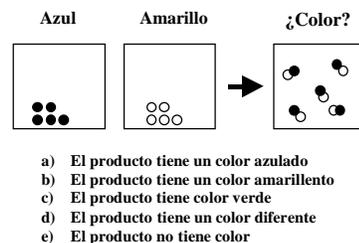
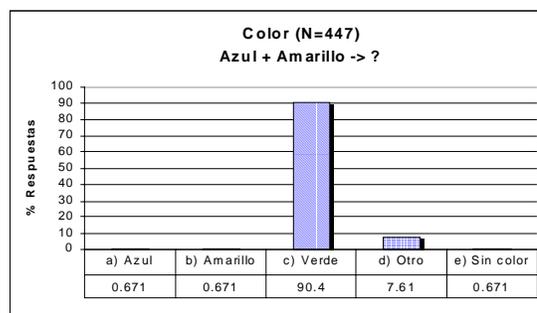


Figura 2. Distribución de frecuencias de respuesta (porcentaje) para las diferentes opciones consideradas en la pregunta que se muestra.

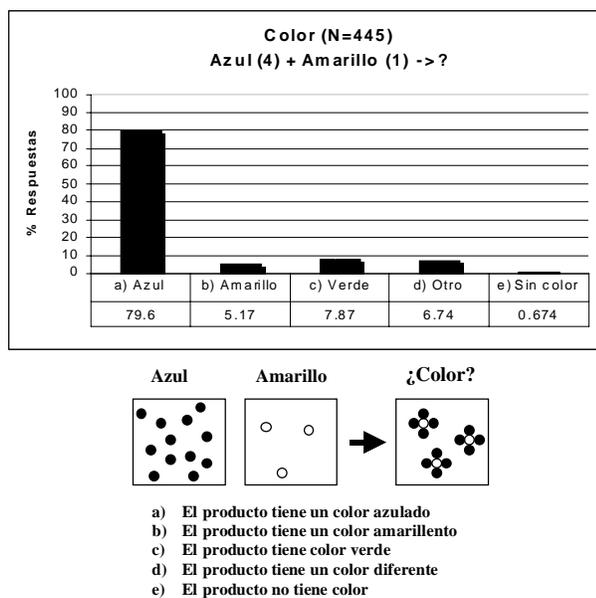


Figura 3. Distribución de frecuencias de respuesta (porcentaje) para las diferentes opciones consideradas en la pregunta que se muestra.

La última pregunta en esta serie se diseñó para explorar si la predicción de los estudiantes también se ve afectada por el tamaño de las partículas que participan en la reacción química. En principio, uno puede esperar que el químico intuitivo considere que tanto el número de partículas como su tamaño determinan su influencia en las propiedades del producto final. Los resultados que se ilustran en la figura 5 confirman en gran medida nuestra hipótesis (cerca del 50% de los estudiantes predijo que el producto tendría el color de los átomos más grandes), aunque el efecto no parece ser tan pronunciado como lo es el del número de partículas de cada componente. Sin embargo, nótese que de nuevo cerca del 90% de los estudiantes eligió una respuesta consistente con la aplicación del proceso heurístico de aditividad (opciones a) y c)).

Las respuestas de los estudiantes a las preguntas en que se requiere hacer una predicción sobre el olor y el sabor del producto de la reacción química entre dos sustancias siguen un patrón similar al antes descrito. Los resultados para las ocho preguntas correspondientes a estas propiedades se resumen en la tabla 1. Es interesante observar que en el caso del olor y el sabor un porcentaje mayor de los estudiantes predice que el producto tendrá propiedades diferentes a la de los componentes originales. Sin embargo, resultados preliminares basados en entrevistas con estudiantes indican que en la mayoría de los casos esto no se debe que reconozcan que las propiedades químicas del producto son emergentes y no aditivas con respecto a las de sus componentes. Los

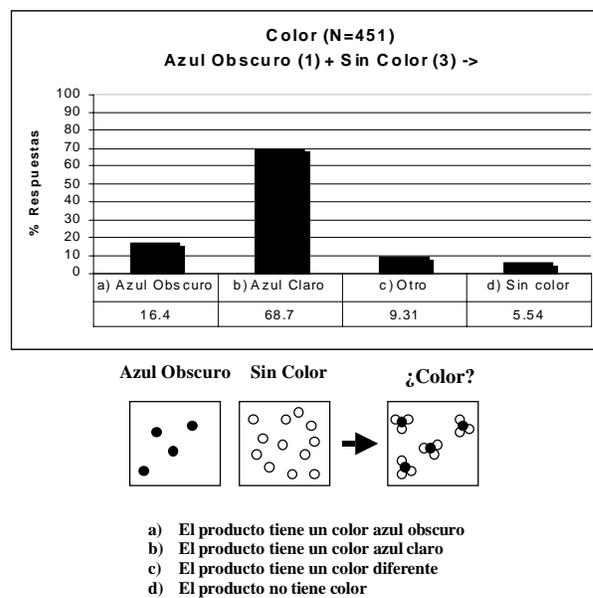


Figura 4. Distribución de frecuencias de respuesta (porcentaje) para las diferentes opciones consideradas en la pregunta que se muestra.

argumentos de los estudiantes que predicen que el producto tendrá un olor o sabor distinto se basan principalmente en sus creencias personales sobre la existencia de olores y sabores más dominantes que otros, y en su experiencia culinaria que les hace pensar que la mezcla y el cocinado de varios ingredientes puede resultar en algo que "huele o sabe

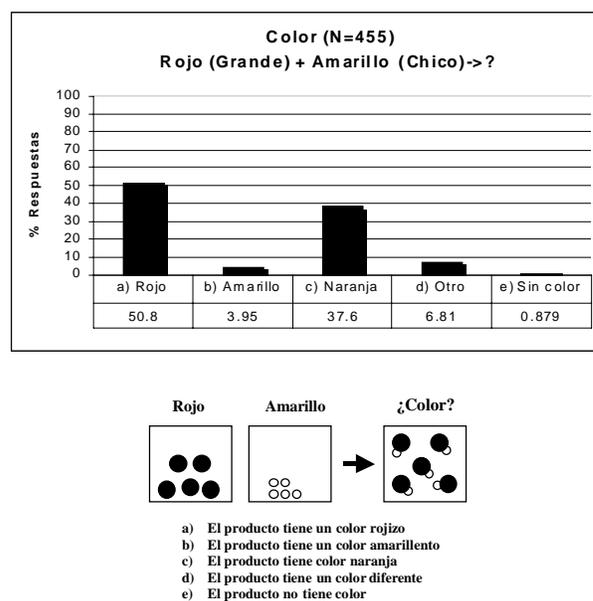


Figura 5. Distribución de frecuencias de respuesta (porcentaje) para las diferentes opciones consideradas en la pregunta que se muestra.

distinto.” Este tipo de estudiantes tienden a ser inconsistentes en sus predicciones, aplicando el proceso heurístico de aditividad como base de su razonamiento pero introduciendo factores idiosincráticos que varían de una pregunta a otra de acuerdo con experiencias personales. Esto permite explicar las grandes variaciones en el porcentaje de estudiantes que predice que las propiedades del producto serán diferentes a las de los reactivos de una pregunta a otra.

Comentarios finales

El análisis de todos los cuestionarios indica que menos del 3% de los estudiantes que participaron en este estudio considera de manera sistemática que es de esperar que las propiedades del producto de la reacción entre dos sustancias sean diferentes a las de los reactivos involucrados. Aún en estos casos es común encontrar una que otra respuesta que parece indicar que el alumno aplica un esquema aditivo para

Tabla 1. Distribución de frecuencias de respuesta (porcentaje) para las diferentes opciones consideradas en las preguntas que requieren hacer una predicción sobre el olor y el sabor del producto de una reacción química entre dos sustancias.

O L O R		a) Menta 5.97%	b) Rosa 3.98%	c) Menta-Rosa 69.0%	d) Otro 20.6%	e) Sin olor 0.442%
	N = 455 	a) Lavanda 62.2%	b) Canela 4.83%	c) Lavanda-Canela 18.5%	d) Otro 14.1%	e) Sin olor 0.439%
	N = 434 	a) Muy acre 14.8%	b) Acre 56.0%	c) Otro 14.8%	d) Sin olor 14.5%	
	N = 451 	a) Limón 25.7%	b) Rosa 1.99%	c) Limón-Rosa 41.2%	d) Otro 30.8%	e) Sin olor 0.222%
S A B O R	N = 447 	a) Dulce 2.46%	b) Salado 9.40%	c) Dulce-Salado 59.7%	d) Otro 23.7%	e) Sin sabor 4.70%
	N = 453 	a) Dulce 45.7%	b) Ácido 11.0%	c) Dulce-Ácido 21.4%	d) Otro 20.1%	e) Sin sabor 1.77%
	N = 449 	a) Muy salado 10.7%	b) Salado 71.9%	c) Otro 10.9%	d) Sin sabor 6.46%	
	N = 451 	a) Dulce 38.6%	b) Agrio 5.99%	c) Dulce-Agrio 42.3%	d) Otro 11.8%	e) Sin sabor 1.33%

hacer su predicción. Estos resultados son en gran medida sorprendentes si consideramos que los participantes en este estudio son estudiantes universitarios que prácticamente han terminado el primer semestre de química general para estudiantes de ciencias e ingeniería en los Estados Unidos.

Nuestros resultados indican que al menos en términos de propiedades como el color, el sabor y el olor, la mayoría de los estudiantes considera que las propiedades del producto son el resultado de la combinación de las propiedades de los componentes elementales y que tanto el número de átomos del elemento como su tamaño tienen una influencia determinante en las características perceptibles. Desde esta perspectiva, los estudiantes parecen concebir a los compuestos químicos como mezclas de sustancias que conservan sus propiedades originales.

Se podría argumentar que los resultados obtenidos se deben en gran medida a que los estudiantes desconocen los mecanismos y procesos de interacción responsables del color, olor y sabor de los compuestos químicos. De hecho sabemos que particularmente en el caso del olor y el sabor se trata de mecanismos complejos que no están del todo entendidos. Sin embargo es precisamente la falta de familiaridad con estos procesos lo que hace de estas propiedades casos ideales para explorar las ideas intuitivas de los estudiantes. En la ausencia de conocimientos previos, la mayoría de los estudiantes en este estudio aplicaron el proceso heurístico de aditividad para hacer sus predicciones y no fueron capaces de transferir los conocimientos que pudieran tener sobre propiedades y procesos químicos en otros contextos.

Es también posible que las representaciones microscópicas utilizadas induzcan a algunos estudiantes a seguir un esquema aditivo. Por convención, los átomos de los elementos presentes en una molécula conservan su color y normalmente su tamaño antes y después del proceso. Esto sin duda fortalece la idea de que las propiedades del elemento se conservan durante la reacción química. Sin embargo, todos los estudiantes participantes en este estudio debían estar familiarizados con esta forma de representar átomos, moléculas y procesos químicos ya que están presentes de manera sistemática en el libro de texto asociado con el curso y los profesores las utilizan cotidianamente en el salón de clases. La representación no debería entonces inducir confusiones en individuos que han asimilado la idea de que las propiedades químicas de un compuesto son emergentes, y no aditivas, con respecto a las de sus componentes.

Nuestro estudio no sólo confirma la utilidad del modelo del químico intuitivo para analizar las concepciones alternativas de los estudiantes de química y sus dificultades conceptuales, sino revela una seria deficiencia en el proceso de enseñanza-aprendizaje en las aulas de química. El concepto

de propiedades emergentes de los sistemas químicos es central en nuestra disciplina tanto para entender las propiedades de átomos y moléculas, como para analizar las propiedades de sistemas con muchas partículas (estados de agregación). De hecho, el concepto cobra cada día más relevancia en la química moderna interesada en procesos de auto-organización tanto en sistemas físicos como biológicos (estructura y funcionamiento de proteínas, micelización, formación de membranas). Es entonces fundamental reconocer que se trata de un concepto no trivial que se contrapone a las ideas intuitivas de nuestros estudiantes y que por tanto requiere del diseño de estrategias didácticas que los ayuden primero a reconocer la existencia de propiedades emergentes y después a diferenciarlas de las propiedades aditivas en diversos tipos de sistemas. ■

Referencias

- Andersson, B. The experiential gestalt of causation: A common core to pupils' preconceptions in science. *Eur. J. Sci. Educ.* **8**, 155-171, 1986.
- Campanario, J. M. y Otero, J. C. Más allá de las ideas previas como dificultades de aprendizaje: las pautas de pensamiento, las concepciones epistemológicas y las estrategias metacognitivas de los alumnos de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*. **18**(2), 155-169, 2000.
- Chi, M. T. H. Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *The Journal of the Learning Sciences*. **14**(2) 161-199, 2005.
- de Cudmani, L. C., Pesa, M. A. y Salinas, J. Hacia un modelo integrador para el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*. **18**(1), 3-13, 2000.
- Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. *Children's Ideas in Science*. Open University Press: Buckingham, England, 1985.
- Driver, R., Squires, A., Rushword, P. y Wood-Robinson, V. *Making Sense of Secondary Science: Research into Children's Ideas*. Routledge: London, 1994.
- Furió, C. y Furió, C. Dificultades conceptuales y epistemológicas en el aprendizaje de los procesos químicos. *Educ. quim.* **11**(3), 300-308, 2000.
- Gutierrez, R. y Ogborn, J. A causal framework for analyzing alternative conceptions. *Int. J. Sci. Educ.* **14**, 201-220, 1992.
- Hayes, P. The naïve physics manifesto. En Michie, D. (Ed.) *Expert Systems in the Microelectronic Age*. Edinburgh University Press: Edinburgh, 1979; pp 242-270.
- Hilton, D. Thinking about causality: pragmatic, social and scientific rationality. En Carruthers, P., Stich, S. y Siegal, M (Eds.) *The cognitive basis of science*. Cambridge University Press: Cambridge, 2002; pp. 211-231.
- Luisi, P. L. Emergence in chemistry: Chemistry as the embodiment of emergence. *Foundations of Chemistry*. **4**, 183-200, 2002.
- Pozo, J. I. y Gómez Crespo, M. A. *Aprender y Enseñar Ciencia*. Morata: Madrid, 1998.
- Talanquer, V. Minimizing misconceptions: Tools for identifying patterns of reasoning. *The Science Teacher*. **69**(8) 46-49, 2002.
- Talanquer, V. El químico intuitivo. *Educ. quim.* **16**(4), 540-547, 2005.
- Talanquer, V. Common-sense chemistry: A model for understanding students' alternative conceptions. *J. Chem. Educ.* **83**(5), 811-816 (2006).
- Viennot, L. *Reasoning in Physics: The Part of Common Sense* Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2001.