

Construyendo puentes conceptuales entre las varias escalas y dimensiones de los modelos químicos

Construint ponts conceptuals entre les diverses escales i dimensions dels models químics

Building conceptual bridges between the different scales and dimensions of the chemical models

Vicente Talanquer / Universidad de Arizona. Departamento de Química y Bioquímica, Tucson, AZ 85721



resumen

En este trabajo se describen algunas de las dificultades que los estudiantes de química tienen para relacionar conceptos e ideas a través de las diferentes escalas y dimensiones en las que los diversos modelos químicos se definen. También se discuten algunos elementos de la enseñanza tradicional de la disciplina que tienden a exacerbar estas dificultades y se presentan herramientas didácticas computacionales diseñadas para apoyar el aprendizaje en esta área.

palabras clave

Currículo, ideas intuitivas, modelos, química general, simulaciones computacionales.

resum

En aquest treball es descriuen algunes de les dificultats que els estudiants de química tenen per relacionar conceptes i idees a través de les diferents escales i dimensions en les quals es defineixen els diversos models químics. També es discuteixen alguns elements de l'ensenyament tradicional de la disciplina que tendeixen a agreujar aquestes dificultats i es presenten eines didàctiques computacionals dissenyades per donar suport a l'aprenentatge en aquesta àrea.

paraules clau

Curriculum, idees intuïtives, models, química general, simulacions computacionals.

abstract

This paper describes some of the difficulties that chemistry students face when trying to connect concepts and ideas across the different scales and dimensions, from which many chemical models are defined. We also discuss some of the features of traditional chemistry education that tend to aggravate these problems, and we present a set of computer-based educational tools, which are designed to scaffold learning in this area.

keywords

Curriculum, intuitive ideas, models, general chemistry, computer simulations.

Introducción

La sugerencia de que nuestro conocimiento químico se construye y representa a tres grandes niveles: macroscópico, submicroscópico y simbólico, ha sido una de las ideas más poderosas e influyentes en educación química en los últimos veinticinco años (Gilbert y Treagust, 2009; Johnstone, 1982). El ahora famoso «tripleto químico» se ha convertido en un paradigma para gran cantidad de docentes e investigadores educativos, quienes lo utilizan de modo frecuente en el diseño de materiales didácticos y actividades en el aula, simulaciones y animaciones computacionales, instrumentos de evaluación y protocolos de investigación. Adicionalmente, el reconocimiento de que nuestros estudiantes tienen dificultades para traducir conceptos e ideas entre estas tres maneras de describir y representar el conocimiento químico ha sido crucial en el desarrollo de programas educativos que fomentan el aprendizaje significativo en las aulas de química (Gilbert y Treagust, 2009).

En su trabajo original, Johnstone (1982) estableció una clara asociación entre la faceta explicativa de la química y los diversos modelos corpusculares que constituyen el componente submicroscópico del tripleto químico. Con el tiempo, otros autores han ayudado a caracterizar de mejor modo el mundo «submicroscópico» de la química. Por ejemplo, Ben-Zvi, Eylon y Silberstein (1988) reconocieron dos escalas o niveles distintos de descripción de la materia a nivel corpuscular: el nivel «atómico-molecular» (una sola partícula) y el nivel «multiatómico» (muchas partículas). Jensen (1998), por su parte, destaca dos niveles submicroscópicos relevantes: el «molecular» y el «eléctrico».

El objetivo de este trabajo es, por tanto, caracterizar los problemas que los estudiantes enfrentan en esta área, analizar algunos elementos de la enseñanza tradicional que exacerban estas dificultades y presentar herramientas didácticas para facilitar el aprendizaje

Recientemente, Gilbert y Treagust (2009) han enfatizado la importancia de considerar modelos a niveles mesoscópicos que nos permiten explicar las propiedades de nuevos materiales. Estos estudios revelan la naturaleza estratificada del componente «submicroscópico» del tripleto químico, poniendo de manifiesto un nivel de complejidad adicional en el aprendizaje de la química. En nuestra disciplina, los estudiantes no sólo necesitan conectar los fenómenos que observan a su alrededor con los modelos y símbolos que utilizamos para representarlos, sino que también deben establecer relaciones entre la gran variedad de modelos submicroscópicos que se utilizan para describir, explicar o predecir la estructura y propiedades de las sustancias a distintas escalas.

Las dificultades en la comprensión de los modelos químicos no sólo descansan en la existencia de «múltiples escalas» de descripción, sino también en la presencia de «varias dimensiones» de análisis. En particular, Jensen (1998) ha identificado tres dimensiones relevantes: composición/estructura, tiempo y energía. La primera dimensión captura los aspectos más estáti-

cos de los sistemas de interés, mientras que las dimensiones temporal y energética encapsulan las propiedades dinámicas. La investigación en educación química sugiere que una gran proporción de nuestros estudiantes es incapaz de establecer relaciones significativas entre las diversas escalas y dimensiones que caracterizan los modelos químicos (Nakhleh, 1992; Barker, 2000). El objetivo de este trabajo es, por tanto, caracterizar los problemas que los estudiantes enfrentan en esta área, analizar algunos elementos de la enseñanza tradicional que exacerban estas dificultades y presentar herramientas didácticas para facilitar el aprendizaje.

Las dificultades

Los químicos construyen modelos para describir, explicar y predecir las propiedades de la materia a diversas escalas y dimensiones. Por ejemplo, una reacción química se puede modelar usando la teoría de colisiones moleculares al nivel de «múltiples partículas» (que denominaremos *escala o nivel corpuscular*), prestando una particular atención a los «aspectos energéticos» o aplicando la teoría RPECV para predecir la geometría molecular y la distribución de carga de cada reactivo en la escala «molecular» (una sola partícula), enfatizando los «factores estructurales». Las escalas y dimensiones que son relevantes para el análisis de las propiedades de un sistema dependen de su naturaleza química, así como del tipo de explicaciones o predicciones que queramos generar. Los químicos expertos han desarrollado la habilidad para construir puentes conceptuales entre las diferentes ideas que son relevantes en cada escala y dimensión de modelaje. Por ejemplo, entre la energía de activación

en un modelo de colisiones de una reacción química y la geometría del estado de transición en un abordaje molecular.

Desafortunadamente, este tipo de conexiones no está presente, ni es fácil de construir, en la mente de la mayoría de nuestros estudiantes.

Es de esperar que los estudiantes tengan dificultades cognitivas cuando se desplazan de una escala o dimensión de modelaje a otra en la que aparecen propiedades o procesos «emergentes» (Jacobson y Wilensky, 2006). El término *emergente* se usa aquí para referirse a aquellas propiedades o procesos de un sistema compuesto que resultan de la interacción entre sus partes, pero que difieren de aquellas propiedades características de los componentes individuales. En este sentido, las propiedades de una molécula, como su geometría, son emergentes con respecto a aquéllas de los electrones y núcleos que la componen y la viscosidad de un líquido emerge de las múltiples interacciones entre las partículas del fluido. El análisis de las concepciones alternativas de los estudiantes en el área de la química revela que sus suposiciones intuitivas están en conflicto con el concepto *emergencia*. Analicemos de qué manera.

El análisis de las ideas de los estudiantes acerca de la naturaleza corpuscular de la materia sugiere la existencia de dos suposiciones implícitas principales, «herencia» y «aditividad», que guían su razonamiento en esta área (Talanquer, 2006; Talanquer, 2009). Por un lado, es común que los estudiantes asuman que las partículas que constituyen un sistema tienen las mismas propiedades que la muestra macroscópica. Por ejemplo, tenderán a pensar que los átomos o moléculas de una sustancia tienen el mismo

color, densidad y punto de fusión que el material de bulto (Nakhleh, 1992; Barker, 2000). Esta suposición de «herencia» está basada en la creencia de que los materiales heredan las propiedades de sus componentes submicroscópicos. Por ello, difícilmente se reconocerá que hay propiedades que emergen a partir de las interacciones dinámicas entre los componentes de un sistema.

La segunda suposición implícita que guía y restringe el razonamiento de muchos estudiantes se basa en la creencia de que las propiedades físicas y químicas de átomos y moléculas, o de las sustancias asociadas, son el resultado del promedio ponderado de las propiedades de los componentes individuales. Desde esta perspectiva, por ejemplo, el color del producto de una reacción entre reactivos de color amarillo y azul es de esperar que sea verde, y la polaridad de una molécula debe incrementarse con el número de átomos electronegativos en el sistema (Talanquer, 2006; Talanquer, 2008). Las decisiones que se toman desde este marco aditivo normalmente se basan en el análisis de la composición química del sistema, descartando los efectos de la estructura, el movimiento azaroso y las

múltiples interacciones entre partículas.

El uso de las suposiciones de herencia y aditividad para construir explicaciones y hacer predicciones es característico de estudiantes novatos con una visión estática del mundo submicroscópico (Talanquer, 2006). Desde de esta postura «estática», el mundo atómico es visto como compuesto por agentes causales, esto es, más o menos capaces de ejercer fuerzas e inducir transformaciones en sus alrededores. Los agentes activos o «líderes» empujan y jalan electrones u otros átomos, iones o moléculas más pasivos con el fin de satisfacer sus necesidades (por ejemplo, volverse más estables, adquirir un octeto de electrones, etc.). La simple presencia de estos agentes acti-

El análisis de las ideas de los estudiantes acerca de la naturaleza corpuscular de la materia sugiere la existencia de dos suposiciones implícitas principales, «herencia» y «aditividad», que guían su razonamiento en esta área

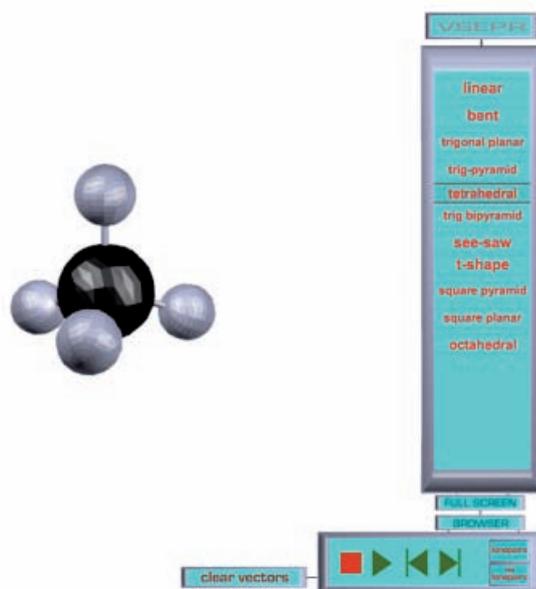


Figura 1. Las propiedades de una molécula, como su simetría, son emergentes con respecto a las de los electrones y los núcleos de los átomos que la componen.

vos en un sistema se piensa que determina sus propiedades: si hay oxígeno, la molécula debe ser polar; si hay hidrógeno, debe formar puentes de hidrógeno. El movimiento azaroso de las partículas constituyentes, sus interacciones dinámicas, sus posiciones relativas, configuraciones y conformaciones, así como la frecuencia y probabilidad de eventos, raramente se consideran elementos determinantes de las propiedades de las sustancias.

La falta de reconocimiento del papel central que los conceptos dinámicos juegan en los modelos corpusculares de la materia limita la habilidad de los estudiantes para aplicar estos modelos en las escalas en las que resultan útiles. También limita su capacidad para construir puentes conceptuales entre los diversos niveles de explicación y descripción comúnmente utilizados en química. Un estudiante con una visión estática y aditiva del mundo submicroscópico seguramente no diferenciará entre conceptos que pueden estar relacionados pero que corresponden a diferentes niveles de modelaje. Por ejemplo, este estudiante novato tendrá problemas para distinguir entre electronegatividad atómica y polaridad molecular, y, por tanto, no reconocerá que la polaridad de una molécula «emerge» de la redistribución de carga entre varios átomos. Es de esperar que este tipo de estudiante también construya explicaciones y predicciones sobre las propiedades y el comportamiento de un sistema macroscópico en base a las propiedades de una sola partícula en lugar de un conjunto de ellas.

Aunque esta visión simplificada del mundo submicroscópico pueda tener raíces profundas en nuestras concepciones intuitivas sobre la naturaleza y el comportamiento del mundo que nos

rodea, hay evidencias que sugieren que el currículum y las prácticas educativas tradicionales pueden fortalecerla. Como se discute en la siguiente sección, la forma en la que las ideas sobre estructura atómica y molecular se introducen en cursos tradicionales de química puede ser parte del problema.

Un estudiante con una visión estática y aditiva del mundo submicroscópico seguramente no diferenciará entre conceptos que pueden estar relacionados pero que corresponden a diferentes niveles de modelaje

Un enfoque «atómico» y «estático»

La revisión de libros de texto comúnmente utilizados en cursos introductorios de química revela la existencia de un abordaje monolítico en la presentación de los modelos submicroscópicos de la materia. En la mayoría de estos textos, la presentación comienza con una discusión sobre la naturaleza atómica de la materia y la descripción de los componentes centrales del modelo nuclear del átomo (por ejemplo, electrones, protones y neutrones). De ahí, el siguiente paso típicamente consiste en introducir el modelo de capas o el modelo cuántico del átomo y discutir cómo construir la configuración electrónica de distintos átomos. Estas configuraciones electrónicas se utilizan entonces para describir y explicar las propiedades periódicas, así como para introducir el enlace químico iónico y covalente. Una vez que la conectividad de una molécula se establece a través de su estructura de Lewis, la teoría

RPECV es introducida para hacer predicciones sobre su geometría, seguidas de discusiones sobre polaridad molecular y fuerzas intermoleculares. Esta discusión abre la puerta al análisis de diferentes estados de la materia y tipos de materiales.

Esta secuencia sigue una progresión lineal, paso a paso, desde el nivel subatómico al nivel macroscópico de descripción y análisis de los sistemas químicos. Su justificación parece ser lógica y simple: la secuencia permite construir una historia coherente sobre nuestro conocimiento químico comenzando con la descripción de los ladrillos fundamentales de la materia y avanzando de manera sucesiva en el análisis de estructuras cada vez más complejas. Sin embargo, si consideramos el gran número de estudiantes que tienen dificultades para entender y utilizar de un modo adecuado los modelos submicroscópicos de la materia aún después de haber sido expuestos a este currículum, las bondades de la secuencia curricular tradicional deben ser cuestionadas. Quizás el problema sea que tal secuencia de presentación se basa en la estructura lógica del conocimiento químico, sin tomar en cuenta la evidencia existente sobre cómo facilitar el aprendizaje en química. Por ejemplo, la investigación educativa ha demostrado que, en general, los estudiantes de química, desde el bachillerato hasta el posgrado, tienen serias dificultades para entender y aplicar las diferentes suposiciones en las que se basan las teorías atómicas y moleculares sobre estructura de la materia (Nakhleh, 1992; Talanquer, 2009). Es por ello que varios autores han sugerido introducir estos temas comenzando con el análisis del mundo macroscópico, ayudando a los estudiantes a construir modelos submicroscópicos apropiados para

explicar las observaciones experimentales (Gilbert y Treagust, 2009).

Por otra parte, el currículum tradicional de química tiende a centrarse en explicaciones basadas en las propiedades de una sola partícula (por ejemplo, un solo átomo o molécula), prestando mucha más atención a los factores estructurales que a los dinámicos. Por ejemplo, se habla de las configuraciones electrónicas de átomos aislados, o de la geometría de una sola molécula, o de los pasos sucesivos en un mecanismo de reacción. La discusión de los aspectos dinámicos de los modelos químicos se confina a la aplicación de la teoría cinética molecular para explicar el comportamiento de gases ideales y a una breve introducción a la teoría de colisiones cuando se discute cinética química. Quizás esta tendencia a enfatizar los aspectos estáticos del mundo submicroscópico sea un rasgo inherente de nuestra disciplina. A pesar del interés de los químicos por comprender los «cambios» en el mundo que nos rodea, es costumbre que expliquemos los fenómenos temporales a través de entidades atemporales: una molécula con múltiples estados vibracionales y conformacionales se modela como un objeto tridimensional rígido; una reacción química dinámica se modela como una secuencia de pasos mecanísticos estáticos; un conjunto de electrones en constante movimiento e interacción se modela con distribuciones de probabilidad espacial estáticas. Aunque sin duda se trata de un modo muy poderoso y útil de modelar el mundo, tiende a propiciar una visión estática sobre la estructura de la materia.

La atención a los aspectos estáticos sobre los dinámicos en química es tan pronunciada que la investigación educativa y el desarrollo de currículos innovadores



Figura 2. Portal de acceso a la colección de simulaciones FIDO: <http://www.chem.arizona.edu/chemt/ido.html>.

Por otra parte, el currículum tradicional de química tiende a centrarse en explicaciones basadas en las propiedades de una sola partícula (por ejemplo, un solo átomo o molécula), prestando mucha más atención a los factores estructurales que a los dinámicos

en los últimos veinte años se ha centrado en el estudio y desarrollo de la habilidad de los estudiantes para establecer conexiones entre experiencias, modelos y visualizaciones a diferentes escalas espaciales, enfatizando la dimensión composición/estructura del conocimiento químico. Mucho menos esfuerzo se ha invertido en explorar las ideas de los estudiantes y apoyar su comprensión de fenómenos que ocurren en diferentes escalas temporales y energéticas. Por ejemplo, aunque el sentido de los estudiantes sobre el tamaño y la lon-

gitud comparativas de objetos ha sido bien estudiado, poco sabemos de su sentido de escala temporal cuando se comparan diferentes procesos submicroscópicos (por ejemplo, vibraciones moleculares, formación y rompimiento de enlaces, transiciones electrónicas), mesoscópicos (por ejemplo, nucleación de gotas, transporte de iones) y macroscópicos (por ejemplo, reacción química). De un modo similar, no tenemos una idea clara de los retos pedagógicos asociados con ayudar a los estudiantes a desarrollar un mejor sentido de la energía necesaria para excitar una vibración, romper un enlace o separar dos moléculas.

Uno puede considerar extremadamente difícil el introducir más aspectos dinámicos en la discusión de los modelos submicroscópicos de la materia analizados en la clase de química. Todos sabemos que se trata de un currículum abarrotado de temas. Sin embargo, sería conveniente reconceptualizar tanto la secuencia en la que las ideas centrales son presentadas como los aspectos que se enfatizan con el fin de facilitar el aprendizaje de la disci-

plina. Con el fin de promover la discusión y la reflexión educativa en esta área, en la siguiente sección se describen algunos recursos didácticos que pueden ser útiles para introducir dichos cambios.

Recursos dinámicos

En base a los problemas descritos en las secciones anteriores, en los últimos años hemos trabajado en el desarrollo e implementación de estrategias y herramientas didácticas para ayudar a los estudiantes a construir puentes conceptuales más sólidos entre las diversas escalas y dimensiones de los modelos que tradicionalmente se discuten en los cursos introductorios de química. Muchas de las herramientas desarrolladas son recursos computacionales flexibles, dinámicos e interactivos a los que se puede acceder individualmente a través de internet o incluirse como parte de una presentación en clase (Pollard y Talanquer, 2005). Se trata de «pantallas interactivas» que pueden ser utilizadas para explicar un concepto o idea, iniciar y guiar una discusión, realizar una investigación individual o grupal, completar un experimento virtual o aplicar las ideas discutidas en clase. Su diseño y construcción están motivados por el deseo de contar con más recursos didácticos que no sólo ilustren la variedad de escalas y dimensiones en la que los modelos químicos se definen, sino que también faciliten la construcción de conexiones entre ellos. Todas las herramientas que se describen a continuación son de uso público y pueden ser accedidas o descargadas en la siguiente dirección electrónica:

<http://www.chem.arizona.edu/chemt/EduQ/>; sólo se requiere contar con un ordenador, un navegador y el *plug-in* de Flash disponible sin costo en internet.

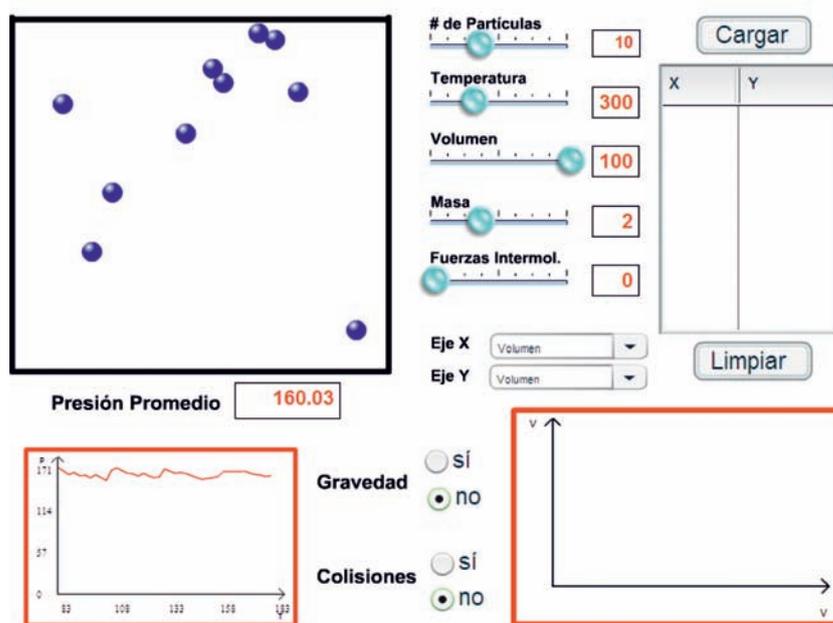


Figura 3. Pantalla de la simulación de un sistema interactuante de partículas usando dinámica molecular. Esta herramienta puede utilizarse para explorar las transiciones de fase de gas a líquido y de líquido a sólido en la escala corpuscular.

Muchas de las herramientas desarrolladas son recursos computacionales flexibles, dinámicos e interactivos a los que se puede acceder individualmente a través de internet o incluirse como parte de una presentación en clase

Una proporción importante de los recursos desarrollados son simulaciones de dinámica molecular que representan el comportamiento de varios tipos de sistemas físicos y químicos en la escala «corpuscular» o de «múltiples partículas». Nuestro énfasis en este nivel de descripción se basa en el convencimiento de que, una vez que los estudiantes han tenido la oportunidad de analizar un sistema o fenómeno a nivel macroscópico en clase o en el laboratorio, éste es el primer nivel de modelaje submicroscópico que debería discutirse en cur-

sos introductorios de química. Existen varias razones para hacerlo. Primera: éste es el nivel de modelaje submicroscópico más cercano al mundo real y muchas propiedades físicas y químicas de los sistemas macroscópicos emergen a esta escala (por ejemplo, puntos de ebullición, densidad, rapidez de reacción, constante de equilibrio); esto facilita el establecimiento de puentes entre conceptos definidos en la escala «macroscópica» (por ejemplo, temperatura) y en la «corpuscular» (por ejemplo, energía cinética promedio). Segunda: las explicaciones y predicciones que se construyen a esta escala deben incluir factores dinámicos (por ejemplo, movimiento de partículas, tipo de interacciones, energía de activación) para ser efectivas. Tercera: el análisis comparativo del comportamiento de distintos sistemas a este nivel puede utilizarse para generar la necesidad de entender cuál es el origen de las diferencias observadas: ¿cuál es el origen de las fuerzas intermoleculares?, ¿cómo explicamos diferencias en energías de activa-

ción? La respuesta a estas preguntas sólo puede darse si cambiamos la escala de modelaje y comenzamos a analizar qué sucede a nivel molecular, atómico o electrónico.

La figura 3 muestra la estructura prototípica de las simulaciones computacionales desarrolladas para explorar las propiedades y el comportamiento de sistemas a nivel «corpúscular». En este caso en particular, la simulación permite investigar el efecto de distintas variables (por ejemplo, temperatura, número de partículas) sobre las transiciones de fase de gas a líquido y de líquido a sólido en un sistema con un solo componente. La simulación no sólo ilustra la evolución dinámica del sistema a través de la representación de la posición y el movimiento de las partículas en una sustancia modelo, sino que también permite manipular variables, recabar datos y representar resultados en diversas formas. En nuestro caso, herramientas como éstas son utilizadas en clase para crear oportunidades de aprendizaje en las que los estu-

diantes hacen predicciones sobre el efecto de varias variables y verifican sus ideas en tiempo real. Es común que los alumnos trabajen en pareja durante estas actividades, lo que no sólo disminuye los recursos computacionales necesarios, sino que también facilita la generación de ideas y enriquece el análisis y la reflexión de los resultados.

Las simulaciones en la escala «corpúscular» que hemos desarrollado permiten explorar tanto fenómenos físicos, tales como transiciones de fase, difusión y ósmosis, como procesos químicos, entre los que se incluyen la formación de compuestos iónicos y moleculares, la cinética de reacciones simples (isomerización, combinación, disociación) y el establecimiento del equilibrio químico en sistemas prototípicos. En todos estos casos, los estudiantes tienen la oportunidad de explorar el efecto de diversas variables en las dimensiones estructural, temporal y energética. Nuestra experiencia trabajando con estos recursos en clases introductorias de química a nivel

universitario indica que las simulaciones tienen un efecto positivo en la capacidad de los alumnos para reconocer la existencia de propiedades emergentes y establecer conexiones significativas entre parámetros o variables de modelaje definidos a distintas escalas (principalmente, entre las escalas «macroscópica» y «corpúscular» y entre esta última y la «molecular»). Adicionalmente, el uso de estas herramientas didácticas ha tenido un efecto benéfico en la motivación de los estudiantes, dado que permite su participación activa en la construcción del conocimiento en clase.

Junto con las simulaciones computacionales que se han descrito, también hemos elaborado un conjunto de herramientas interactivas que permiten la construcción de representaciones submicroscópicas de diferentes tipos de sistemas, ya sea a nivel subatómico, molecular o corpúscular. La mayoría de estos recursos enfatiza la dimensión composición/estructura del conocimiento químico y crea oportunidades para que los estudiantes manipu-

Las simulaciones en la escala «corpúscular» que hemos desarrollado permiten explorar tanto fenómenos físicos, tales como transiciones de fase, difusión y ósmosis, como procesos químicos, entre los que se incluyen la formación de compuestos iónicos y moleculares, la cinética de reacciones simples (isomerización, combinación, disociación) y el establecimiento del equilibrio químico en sistemas prototípicos

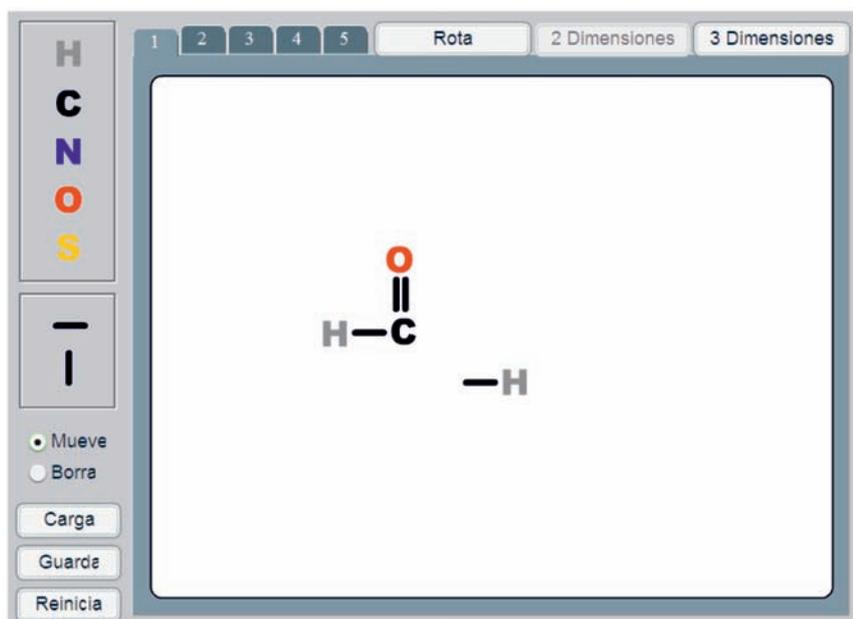


Figura 4. Pantalla de la herramienta que permite la construcción de estructuras moleculares en dos y tres dimensiones.

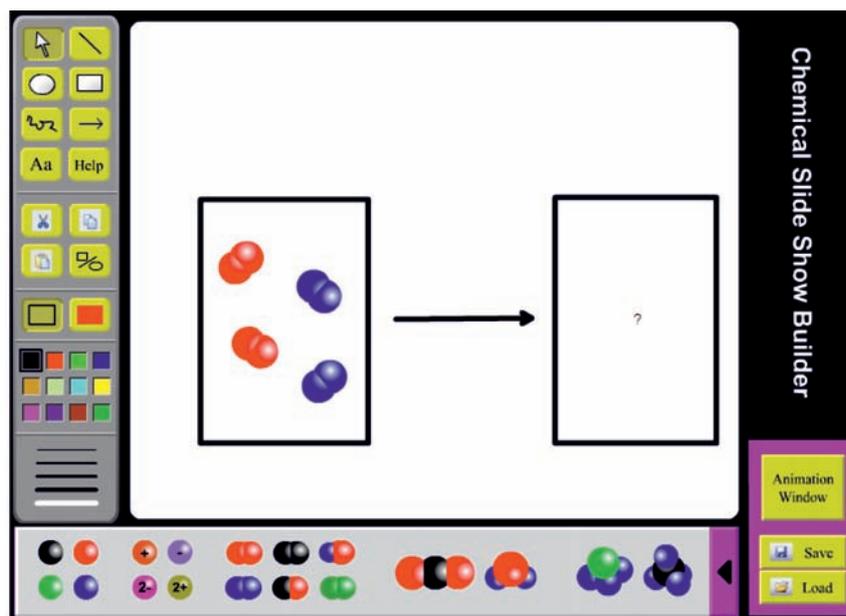


Figura 5. Pantalla de la herramienta que permite la construcción de películas moleculares en base a la presentación sucesiva de pantallas estáticas construidas por el usuario.

len y traduzcan información entre diferentes formas de representación. Por ejemplo, la herramienta que se ilustra en la figura 4 puede utilizarse para construir la estructura de Lewis de diversas moléculas y generar la estructura tridimensional correspondiente; la herramienta de la figura 5 puede usarse para construir películas moleculares en base a una secuencia de imágenes construidas por el usuario. Es importante reconocer que la mayoría de estos recursos presenta una visión estática del mundo submicroscópico, hecho que debe hacerse explícito a los alumnos. En general, no importa de qué tipo de recursos computacionales se trate, ya sean estáticos o dinámicos; el análisis de las suposiciones implícitas y explícitas en las que se basan los modelos químicos que se presentan en clase, junto con la reflexión de sus alcances y limitaciones, es una arma poderosa en la tarea de ayudar a los estudiantes a construir puentes conceptuales entre la diversidad de escalas y dimensiones en las que tales modelos se definen.

Referencias

- BARKER, V. (2000). *Beyond appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas* [en línea]. Londres: Royal Society of Chemistry. <<http://www.chem-soc.org/networks/learnnet/miscon.htm>>.
- BEN-ZVI, R.; EYLON, B.; SILBERSTEIN, J. (1988). «Theories, principles and laws». *Education in Chemistry*, mayo: 89-92.
- GILBERT, J. K.; TREAGUST, D. [ed.] (2009). *Multiple representations in chemical education*. S. l.: Springer Netherlands.
- JACOBSON, M. J.; WILENSKY, U. (2006). «Complex systems in education: Scientific and educational importance and implications for the learning sciences». *The Journal of the Learning Sciences*, 15(1): 11-34.
- JENSEN, W. B. (1998). «Logic, history and the chemistry textbook: I. Does chemistry have a logical structure?». *Journal of Chemical Education*, 75(6): 679-687.
- JOHNSTONE, A. H. (1982). «Macro and microchemistry». *School Science Review*, 64: 377-379.

- NAKHLEH, M. B. (1992). «Why some students don't learn chemistry». *Journal of Chemical Education*, 69(3): 191-196.
- POLLARD, J.; TALANQUER, V. (2005). «Interactive digital overheads: Dynamic teaching tools for the chemistry classroom». *The Chemical Educator*, 10: 36-40.
- TALANQUER, V. (2006). «Common sense chemistry: A model for understanding students' alternative conceptions». *Journal of Chemical Education*, 83(5): 811-816.
- (2008). «Students' predictions about the sensory properties of chemical compounds: Additive versus emergent frameworks». *Science Education*, 92(1): 96-114.
- (2009). «On cognitive constraints and learning progressions: The same of structure of matter». *International Journal of Science Education*, 31(15): 2123-2136.



Vicente Talanquer

es profesor asociado en la Universidad de Arizona. Autor o coautor de más de diez libros de texto para primaria y secundaria y de cerca de ochenta artículos arbitrados de investigación en fisicoquímica, educación química y pensamiento docente. En la actualidad, su trabajo de investigación se centra en el estudio de la ideas intuitivas de los estudiantes de química.
C. e. vicente@email.arizona.edu