

Esquemas de conocimiento que guían el razonamiento sobre cómo y por qué ocurren las reacciones químicas

Esquemes de coneixement que guien el raonament sobre com i per què es produeixen les reaccions químiques

Knowledge schemas that guide reasoning about how and why chemical reactions occur

Vicente Talanquer / Department of Chemistry and Biochemistry, University of Arizona, Tucson AZ, 85745 US



resumen

Los resultados de las investigaciones en educación química en los últimos 50 años proporcionan información valiosa sobre el razonamiento de los estudiantes acerca de cómo y por qué ocurren las reacciones químicas. El análisis de estos resultados permite inferir esquemas de conocimiento que parecen guiar el razonamiento de la mayoría de los estudiantes en esta área en diferentes etapas de su formación. En este artículo se describen estos esquemas dominantes y las barreras conceptuales que generan en el proceso de aprendizaje. Esta caracterización hace evidente la complejidad de los conocimientos que queremos que los estudiantes desarrollen y resalta la urgencia de realizar cambios en currículos, métodos de enseñanza y estrategias de evaluación tradicionalmente utilizados en la enseñanza de la química.

palabras clave

Espontaneidad, esquemas de conocimiento, razonamiento de los estudiantes, reacción química.

resum

Els resultats de les investigacions en educació química en els darrers 50 anys proporcionen informació valuosa sobre el raonament dels estudiants sobre com i per què tenen lloc les reaccions químiques. L'anàlisi d'aquests resultats permet inferir esquemes de coneixement que semblen guiar el raonament de la majoria dels estudiants en aquesta àrea en diferents etapes de la seva formació. Aquest article descriu aquests esquemes dominants i les barreres conceptuals que generen en el procés d'aprenentatge. Aquesta caracterització fa evident la complexitat dels coneixements que volem que els estudiants desenvolupin i resalta la urgència de fer canvis en currículums, mètodes d'ensenyament i estratègies d'avaluació tradicionalment utilitzats en l'ensenyament de la química.

paraules clau

Espontaneïtat, esquemes de coneixement, raonament dels estudiants, reacció química.

abstract

Results from research in chemistry education in the last 50 years provide valuable insights into how students reason about how and why chemical reactions happen. The analysis of these results allows us to infer knowledge schemas that seem to guide student reasoning in this area at different stages in their schooling. This paper describes these dominant knowledge schemas and the conceptual barriers they create during the learning process. This characterization makes explicit the complexity of the understandings we want students to develop and highlights the urgent need for changes in traditional curricula, teaching practices, and assessment strategies in chemistry education.

keywords

Chemical reaction, knowledge schemas, spontaneity, student reasoning.

1. Introducción

El tema de reacción química es central en los currículos de cursos introductorios de química en todos los niveles educativos. En general, se busca que los estudiantes entiendan las características distintivas de estos procesos a nivel macroscópico y submicroscópico, aprendan a representarlos en forma simbólica y a modelarlos con diagramas corpusculares, y construyan explicaciones y hagan predicciones cualitativas y cuantitativas sobre los productos de distintos tipos de reacciones, su direccionalidad, extensión y rapidez con base en su comprensión de por qué y cómo ocurren. Alcanzar estos objetivos de aprendizaje requiere la integración de múltiples conceptos e ideas tales como estructura atómica y molecular, enlace químico, energía química y entropía. Por tanto, no es sorprendente que la mayoría de los estudiantes enfrenten grandes dificultades conceptuales durante su aprendizaje en esta área.

Las investigaciones realizadas en los últimos 50 años sobre las ideas y el razonamiento de los estudiantes sobre las reacciones químicas en diferentes niveles educativos proporcionan información valiosa para la enseñanza de la química (Barke et al., 2009; Kind, 2004; Taber, 2002). En particular, nos ayudan a caracterizar patrones comunes de pensamiento que pueden facilitar o interferir con el aprendizaje y a identificar factores que los afectan. En este trabajo se resumen los patrones comunes identificados en el pensamiento de los estudiantes sobre cómo y por qué ocurren las reacciones químicas (Yan & Talanquer, 2015). Formas comunes de pensar sobre cómo ocurren estos procesos se derivan de los resultados de investigaciones que proporcionan información sobre las ideas de los

Diversos estudios han revelado las dificultades que muchos estudiantes tienen para entender las transformaciones de la materia y distinguir distintos tipos de cambio

estudiantes sobre el mecanismo seguido por distintos tipos de reacciones, mientras que formas de pensar sobre por qué se dan los cambios químicos se obtienen de investigaciones que revelan las causas que los estudiantes invocan para justificar la ocurrencia de estos procesos. La identificación de estos patrones sirve de guía para presentar algunas sugerencias didácticas para la enseñanza de estos temas.

2. Investigaciones en el área

El número y diversidad de las investigaciones educativas sobre las ideas de los estudiantes sobre las reacciones químicas es considerable. Los resultados de estos trabajos han sido resumidos en varios trabajos de revisión en educación química (Barke et al., 2009; Kind, 2004; Taber, 2002), por lo que en esta sección se resaltan solo algunos de ellos.

Diversos estudios han revelado las dificultades que muchos estudiantes tienen para entender las transformaciones de la materia y distinguir distintos tipos de cambio. Estas dificultades están asociadas a concepciones intuitivas sobre los componentes de la materia y sus propiedades (Johnson, 2002; Ngai et al., 2014). Por ejemplo, las personas comúnmente piensan que las propiedades de un material pueden cambiar sin que cambie su identidad química o consideran que las propiedades de las

sustancias pueden transmitirse de unas a otras.

Estudios en los que se les pide a los estudiantes que expliquen qué pasa durante las reacciones químicas revelan que muchos de ellos no piensan en estos procesos como resultado de la interacción entre partículas a nivel submicroscópico (Andersson, 1990). En su lugar, los estudiantes tienden a utilizar las características visibles y explícitas de los reactivos representados en una ecuación química, como el número de sustancias que reaccionan o su estado de agregación, para explicar o hacer predicciones sobre la naturaleza de los productos (Talanquer, 2020).

Muchos estudiantes también manifiestan dificultades para comprender por qué y cómo tienen lugar las reacciones químicas. Por lo general, los estudiantes se refieren a los procesos químicos como causados por agentes con propiedades asimétricas (uno más activo que otro), los cuales actúan motivados por alguna necesidad o voluntad (Talanquer, 2021). La atribución de intencionalidad en las acciones de distintos agentes químicos (electrones, átomos, moléculas) es común en el lenguaje no solo de los estudiantes sino también de los docentes de química, lo que refuerza las suposiciones teleológicas sobre los procesos químicos (Taber, 2013; Talanquer, 2013a).

Las ideas de los estudiantes sobre el cambio químico han sido estudiadas utilizando distintos tipos de reacciones. Estos estudios revelan una diversidad de dificultades conceptuales específicas para cada tema y una alta variabilidad en el pensamiento de los estudiantes dependiendo del contexto. Los estudiantes manifiestan diferentes maneras de pensar y hablar sobre los procesos químicos que en ocasiones se traslapan (Solsona et al., 2003).

Por ejemplo, pueden referirse a un proceso como causado por las acciones de un agente con una meta intrínseca (por ejemplo, volverse más estable) mientras que invocan colisiones entre las moléculas de reactivos para explicar otras reacciones (Yan & Talanquer, 2015; Weinrich & Talanquer, 2015).

3. Esquemas de conocimiento y enmarques de actividad

El análisis y las sugerencias didácticas que se presentan en este trabajo están guiadas por un marco teórico en el que se asume que el razonamiento de los estudiantes cuando enfrentan una tarea involucra la interacción dinámica de una gran variedad de elementos cognitivos (ontológicos, conceptuales, epistemológicos, metacognitivos, afectivos) (Brown & Hammer, 2008). Algunos de estos elementos sirven funciones estructurales y de control, y determinan el tipo y número de otros recursos cognitivos que serán activados para completar la actividad y cómo se usan. De manera general, estos elementos estructurales toman la forma de esquemas de conocimiento o enmarques de actividad (Tannen, 1993).

– Los esquemas de conocimiento afectan las suposiciones y expectativas del individuo sobre las propiedades y el comportamiento de los componentes del sistema o proceso bajo análisis.

– Los enmarques de actividad afectan el posicionamiento del individuo con respecto a la tarea, su uso de los recursos activados y las acciones que implementa.

Por ejemplo, si un estudiante intuitivamente adopta un esquema aditivo en la conceptualización de las propiedades de un sistema, es muy probable que su atención se dirija a identificar las propiedades de los componentes

individuales y a combinarlas de manera sopesada para predecir las propiedades globales (por ejemplo, si una sustancia es azul y otra es amarilla, el producto de su combinación química será verde) (Talanquer, 2013b). El estudiante podrá o no cuestionarse esta respuesta intuitiva dependiendo de cómo enmarque la tarea. Si el estudiante atribuye bajo valor a la actividad, o su respuesta no es cuestionada por otros, es probable que acepte su idea inicial sin cuestionamiento. Si el estudiante se ve motivado a reflexionar, es posible que active otros esquemas de conocimiento y adopte un enfoque de actividad más analítico.

Desde esta perspectiva, los esquemas y enmarques que son activados guían, pero también constriñen las explicaciones, predicciones, evaluaciones y decisiones que un individuo genera. Su activación en una situación particular dependerá de factores personales (conocimientos y experiencias previas, motivación) y contextuales (tipo de tarea, interacciones con otros). Estos mismos factores afectarán el tipo y número de recursos cognitivos que son activados y cómo se usan. Las experiencias personales y antecedentes socioculturales de los estudiantes determinan los recursos cognitivos que desarrollan, así como las condiciones en las que los activan. Individuos con experiencias compartidas probablemente tendrán acceso a esquemas y enmarques similares, pero las condiciones, frecuencia y consistencia con las que los activan dependerá de características personales y de la situación en la que se encuentran. Los esquemas y enmarques que se activan durante una actividad pueden cambiar dependiendo de interacciones del individuo con la actividad y otros elementos del contexto.

A pesar de la gran variabilidad en el razonamiento de los estudiantes que se puede inferir del modelo teórico propuesto, la caracterización de los esquemas y enmarques que son más comúnmente activados por estudiantes de química durante diferentes etapas de su formación proporciona información útil para diseñar experiencias de aprendizaje que motiven la reflexión, la comprensión y la activación de esquemas y enmarques sustentados por pensamiento químico normativo. Siguiendo esta perspectiva, en la siguiente sección se describen los esquemas de conocimiento que las investigaciones educativas en el área revelan como dominantes en el razonamiento de los estudiantes sobre cómo y por qué suceden las reacciones químicas.

4. Esquemas de conocimiento sobre cómo y por qué suceden las reacciones

Los esquemas de conocimiento de los estudiantes sobre las reacciones químicas guían sus respuestas a dos preguntas fundamentales:

– ¿Cómo suceden las reacciones químicas? (Mecanismo químico)

– ¿Por qué ocurren las reacciones químicas? (Causalidad química)

Las ideas de los estudiantes sobre el mecanismo de una reacción incluyen conceptualizaciones sobre cómo empiezan estos procesos, qué sucede durante la reacción y cómo y cuándo concluye el proceso. Las ideas de los estudiantes sobre la causalidad de las reacciones químicas incluyen conceptualizaciones sobre por qué se dan estos procesos, qué factores los dirigen y qué factores determinan su extensión.

Los resultados de investigaciones en educación en estas áreas

sugieren que los estudiantes de química manifiestan esquemas de conocimiento y modos asociados de razonar que progresan (fig. 1) a medida que avanzan en sus estudios (Yan & Talanquer, 2015). Esta figura no intenta sugerir que el razonamiento de los estudiantes progresa de manera lineal o pasando por los mismos estadios, sino solo resaltar la existencia de esquemas de conocimiento que ganan dominancia a medida que el conocimiento de los estudiantes se torna más normativo. Estos esquemas se traslapan y pueden ser manifestados por un mismo estudiante en distintos contextos en una misma etapa de aprendizaje.

Yan y Talanquer (2015) para más detalles.

Esquema de causalidad centralizada

Múltiples investigaciones realizadas en esta área sugieren que las ideas de la mayoría de los estudiantes sobre el mecanismo y causalidad de las reacciones químicas son inicialmente guiadas por un esquema de causalidad centralizada que domina el pensamiento de los estudiantes novatos en diversas áreas (Talanquer, 2021).

En el esquema de causalidad centralizada, los procesos se conciben como espontáneos (simplemente pasan) o iniciados y dirigidos por un agente activo que

identifique como actor principal sea aquel presente en mayor cantidad o el que tiene mayor masa o sea más polar o un ácido más fuerte. Cuando este agente es difícil de identificar, es probable que el estudiante inicie la búsqueda por agentes o fuerzas externas que puedan ser responsables. Por ejemplo, los estudiantes invocan la acción de agentes externos como la temperatura o la presión con más frecuencia para explicar cómo empiezan las reacciones de descomposición que involucran a un solo reactivo, que al analizar reacciones de combinación en las que participan dos o más sustancias (Yan & Talanquer, 2015).

Dentro de este esquema de conocimiento, los procesos se consideran dirigidos y gobernados por los deseos, metas o voluntades intrínsecas del agente activo. Desde esta perspectiva, los estudiantes que aplican este esquema frecuentemente adoptan una perspectiva teleológica sobre las reacciones químicas (Talanquer, 2013a). Por ejemplo, pueden considerar que la reacción permitirá que el agente activo se vuelva más estable, ya sea porque disminuye su energía o porque alcanza un estado más deseable (llena su capa de electrones de valencia, se distribuye homogéneamente en el sistema). En general, las reacciones químicas se describen como procesos unidireccionales que proceden a través de la combinación o fragmentación de reactivos y terminan cuando el agente activo cumple su objetivo o todos los reactivos son consumidos.

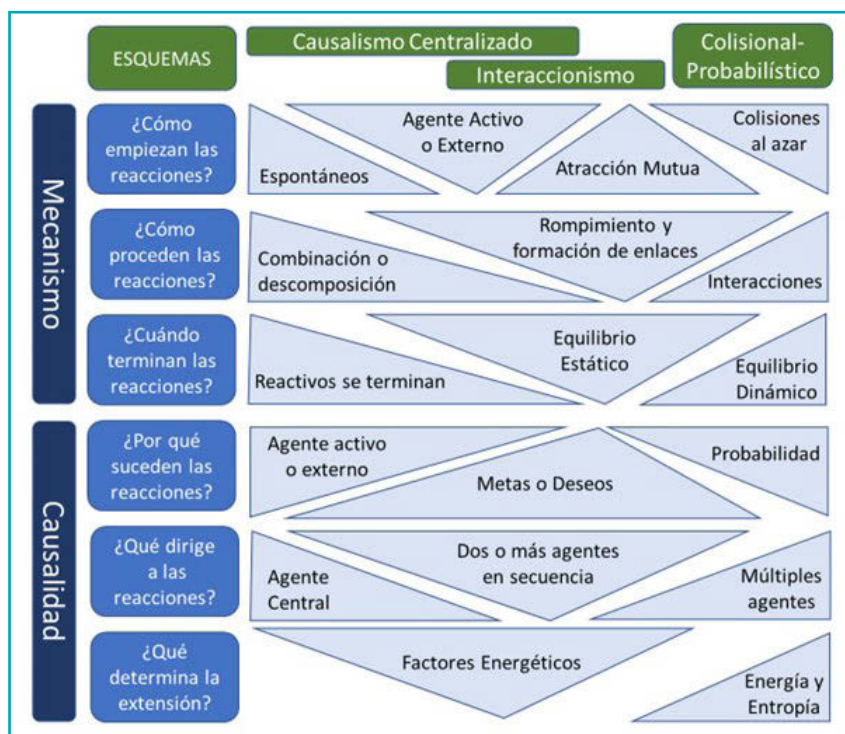


Figura 1. Progresión en esquemas de conocimiento y modos de razonar dominantes de los estudiantes sobre cómo (mecanismo) y por qué (causalidad) pasan las reacciones.

En las siguientes secciones se resumen las características de cada uno de los esquemas de conocimiento dominantes en el razonamiento de los estudiantes sobre el mecanismo y causalidad de las reacciones químicas. Se recomienda leer el artículo de

actúa sobre otros agentes más pasivos. Qué agente se identifica cómo el más activo depende del contexto y de las características que resulten más sobresalientes para el estudiante en un momento determinado. Por ejemplo, puede ser que el agente que se

Esquema interaccionista

A medida que los estudiantes adquieren más conocimientos normativos en química y son expuestos a modelos corpusculares sobre la composición de la materia, su razonamiento co-

A medida que los estudiantes adquieren más conocimientos normativos en química y son expuestos a modelos corpusculares sobre la composición de la materia, su razonamiento comienza a ser guiado por un esquema más interaccionista

mienza a ser guiado por un esquema más interaccionista. Dentro de este esquema, las reacciones entre sustancias se visualizan como iniciadas por la atracción entre sus partículas, particularmente si estas partículas exhiben propiedades explícitas que activan ideas sobre interacción (por ejemplo, se reconoce la presencia de cargas eléctricas). Estas interacciones se consideran causantes del rompimiento y formación de nuevos enlaces. Este esquema facilita la interpretación de reacciones en el que el mecanismo está determinado por la atracción directa entre especies que se combinan, como sucede en reacciones de doble desplazamiento (Yan & Talanquer, 2015).

El esquema interaccionista reconoce la existencia de entidades corpusculares cuyas atracciones pueden dar lugar a nuevas combinaciones, pero la visión del mundo submicroscópico tiende a ser macro-corpuscular y homogénea. Esto es, los estudiantes probablemente concebirán las propiedades de las partículas como similares a las propiedades macroscópicas de las sustancias asociadas con ellas, y estas propiedades y comportamientos se concebirán como homogéneos a través del sistema (Talanquer, 2015). Esto dificulta el reconoci-

miento de procesos distintos ocurriendo de manera simultánea durante una reacción química (por ejemplo, procesos de formación y descomposición de productos), así como la adopción de una visión probabilística de los eventos a nivel submicroscópico. Por tanto, los mecanismos de reacción tienden a concebirse como secuencias concatenadas de eventos en los que todas las partículas sufren la misma transformación de manera simultánea, en los que cada paso se inicia una vez que el paso anterior termina, y en los que la reacción se acaba al alcanzar un equilibrio concebido de forma estática (balance de reactivos y productos).

Esquema colisional-probabilístico

Las investigaciones en educación química sugieren que el esquema de causalidad centralizada y el esquema interaccionista descritos en los párrafos anteriores guían el razonamiento de la mayoría de los estudiantes aún en cursos avanzados de química (Weinrich & Talanquer, 2015). Esto indica que el desarrollo y aplicación consistente del esquema colisional-probabilístico que es normativo en química parece requerir considerable tiempo y esfuerzo cognitivo. En este esquema las reacciones se conciben como resultado de la colisión azarosa entre partículas en el sistema, lo que da lugar a rompimientos y formación de enlaces con una probabilidad que depende de la naturaleza química de las partículas en interacción y de su orientación espacial y energía durante la colisión. Dentro de este esquema se reconoce heterogeneidad en la distribución de materia y energía en el sistema, así como la posibilidad de ocurrencia de diversos procesos simultáneos que tienen lugar con distintas probabilidad-

des, lo que facilita la conceptualización de estados emergentes de equilibrio dinámico en el sistema y la existencia de diversas rutas mecánicas en competencia. La extensión de las reacciones químicas se considera determinada por factores energéticos (energía potencial de las entidades en interacción) y entrópicos (número de configuraciones que las entidades en interacción pueden adoptar).

La comparación entre las suposiciones implícitas en el esquema colisional-probabilístico que queremos que los estudiantes de química desarrollen y las suposiciones asociadas con los esquemas de causalidad centralizada e interaccionista que comúnmente guían el razonamiento de los estudiantes pone en evidencia el gran abismo conceptual que existe entre ellos. Reconocer y reflexionar sobre estas diferencias es importante para diseñar currículos y actividades de aprendizaje y evaluación formativa que ayuden a los estudiantes a construir puentes entre sus formas comunes de pensar y el esquema normativo que buscamos se apropien.

5. Barreras adicionales para el aprendizaje

Las ideas introducidas en la sección anterior sugieren que el esquema de conocimiento sobre las reacciones químicas que queremos que los estudiantes desarrollen es complejo y distante de los esquemas más intuitivos que comúnmente se activan. El esfuerzo cognitivo necesario para desarrollarlo y aplicarlo de forma espontánea será seguramente alto para la mayoría de los alumnos. A estas dificultades hay que sumarles las barreras creadas por formas convencionales de organizar los currículos de química y orquestar la enseñanza sobre estos temas.

La comprensión de cómo y por qué ocurren las reacciones químicas también enfrenta dificultades de aprendizaje relacionadas con la integración de conocimientos

Enfoques macroscópicos desconectados de enfoques submicroscópicos

Es común que las discusiones sobre el cómo y por qué de las reacciones químicas en los salones de clase se aborden en diferentes momentos y desde diversas perspectivas en cursos introductorios de química. En particular, podemos distinguir entre enfoques fenomenológicos macroscópicos basados en conocimientos empíricos sobre las propiedades y el comportamiento de las sustancias y procesos químicos (enfoques termodinámicos y cinéticos), y enfoques mecánicos y estructurales basados en modelos submicroscópicos sobre estructura de la materia (modelos corpusculares o atómico-moleculares) (Talanquer, 2018).

Por ejemplo, en clases de química es común que los estudiantes aprendan a calcular entalpías y entropías de reacción por métodos puramente algorítmicos y utilizarlas para determinar la direccionalidad de procesos químicos con base en el signo de la energía libre de Gibbs del proceso o del cambio en la entropía total del universo. Dentro de esta perspectiva termodinámica, la direccionalidad o espontaneidad de los procesos químicos muchas veces se justifica de forma teleológica, argumentando que las reacciones ocurren porque la entropía del universo aumenta o la energía

libre de Gibbs disminuye (Talanquer, 2007).

Esta estrategia termodinámica frecuentemente se presenta desconectada de la introducción y análisis de modelos submicroscópicos que permiten hacer predicciones sobre la direccionalidad o el mecanismo de una reacción. Por ejemplo, al estudiar termoquímica es común establecer conexiones entre calores de reacción y balances energéticos entre la energía absorbida durante el rompimiento de enlaces químicos en moléculas de los reactivos y la generada durante la formación de enlaces en moléculas de los productos. Al introducir el concepto de entropía, frecuentemente se involucra a los estudiantes en predicciones sobre el incremento o disminución de esta propiedad en procesos químicos con base en la comparación del estado de agregación y masa molecular de reactivos y productos. Al abordar el tema de la cinética química, es común introducir la teoría de colisiones para comprender los factores que afectan la rapidez de una reacción, pero no su direccionalidad o extensión.

Por lo general, estos diversos análisis se presentan de manera desintegrada, transitando entre descripciones a nivel macroscópico, submicroscópico y simbólico de manera aparentemente azarosa y sin la intención explícita, y sostenida a lo largo del curso, de ayudar a los estudiantes a construir historias mecanísticas causales que conecten los cambios estructurales que ocurren a nivel submicroscópico con variaciones en la energía potencial y número de configuraciones de las partículas involucradas, los cuales determinan el mecanismo de reacción y la direccionalidad, extensión y rapidez de los procesos químicos a nivel macroscópico.

Necesidad de integrar múltiples conceptos e ideas

La comprensión de cómo y por qué ocurren las reacciones químicas también enfrenta dificultades de aprendizaje relacionadas con la integración de conocimientos. El aprendizaje significativo en esta área demanda desarrollar esquemas de conocimientos normativos no solo sobre reacciones químicas, sino también sobre la relación entre cambios estructurales a nivel molecular y las transformaciones e intercambios de energía que se inducen y los cambios en el número de configuraciones accesibles a las partículas en el sistema (Talanquer, 2021). Las investigaciones sobre el razonamiento de los estudiantes en estas dos últimas áreas son extensas y apuntan, de nuevo, a la existencia de esquemas de conocimiento intuitivo distantes de los esquemas normativos.

Por ejemplo, los estudiantes inicialmente tienden a conceptualizar a la energía como un cuasi-sustancia que puede contenerse y transferirse de un lugar a otro como un fluido. Esta sustancia está contenida dentro de los enlaces químicos y se libera cuando los enlaces se rompen (Boo, 1998). A medida que los alumnos avanzan en sus estudios, pueden reconocer a la energía cinética como energía de movimiento que se transmite a través de colisiones entre partículas, pero tienen dificultades para comprender el concepto de energía potencial y sus variaciones como resultado de fuerzas de atracción entre las partículas. Consecuentemente, tienden a invocar conceptos macroscópicos para explicar las transformaciones de energía a nivel submicroscópico (por ejemplo, pueden considerar qué energía se genera debido a la fricción entre las partículas o se conceptualiza

como ondas de calor emitidas durante una colisión). Muy pocos estudiantes terminan los cursos introductorios de química con una idea clara de cómo las interacciones entre átomos en una molécula determinan su energía potencial, cómo estas interacciones dependen de la naturaleza de los átomos en interacción y cómo los intercambios de energía en una reacción química se relacionan con transformaciones entre la energía potencial y cinética de las partículas involucradas (Macrie-Shuck & Talanquer, 2020).

Los estudiantes también tienden a asociar inicialmente la estabilidad de una sustancia o un sistema con propiedades macroscópicas, como su tamaño, su masa u otras percepciones de fortaleza. Con la enseñanza, los estudiantes desarrollan una fuerte asociación entre estabilidad y energía, pero en algunos casos pueden considerar que los estados con menos energía son más estables, mientras que en otros, la estabilidad se asocia con estados con mayor energía (asociación heurística más A-más B). En general, la mayoría de los estudiantes tiene grandes dificultades para reconocer que la estabilidad de un sistema también está determinada por el número de configuraciones, tanto espaciales como energéticas, que sus partículas pueden adoptar. Desde esta perspectiva, los análisis de los alumnos en cursos más avanzados de química sobre cómo y por qué pasan las reacciones tienden a estar sesgados hacia la consideración de factores energéticos sobre factores entrópicos (Talanquer, 2021).

6. Implicaciones para la enseñanza

El análisis presentado en este ensayo resalta la complejidad de los esquemas de conocimiento

sobre cómo y por qué ocurren las reacciones químicas que quisiéramos que los estudiantes desarrollen. Por tanto, alcanzar estos objetivos de aprendizaje seguramente demandará cambios sustantivos en los currículos, métodos de enseñanza y estrategias de evaluación convencionalmente utilizados en cursos introductorios de química.

A nivel curricular, es fundamental reducir la extensión de los programas tradicionales para enfocarse en la construcción de un número mínimo de ideas centrales en la disciplina. Una de estas ideas centrales se resume en el esquema colisional-probabilístico descrito con anterioridad. La construcción de este esquema demanda reflexionar sobre cómo secuenciar el aprendizaje, de manera que ayudemos a los estudiantes a transitar de la activación de esquemas más intuitivos al esquema normativo. Esta progresión de aprendizaje (Talanquer, 2020) debe facilitar el desarrollo e integración de conceptos fundamentales y establecer conexiones claras y explícitas entre modelos macroscópicos y submicroscópicos de las reacciones químicas. Debemos escapar de la fragmentación curricular en la que el abordaje de cuestiones relacionadas con la reacción química se organiza con base en categorizaciones académicas convencionales (estequiometría, termodinámica, cinética) en lugar de seguir progresiones de aprendizaje sustentadas por resultados de la investigación educativa.

La enseñanza también debe modificarse para crear espacios y oportunidades de aprendizaje en los que los estudiantes se involucren de manera activa y colaborativa en la construcción y aplicación de modelos que los ayuden a dar sentido a fenómenos relevantes. La investigación

en educación en ciencias ha demostrado que anclar el aprendizaje en el análisis y resolución de problemas de interés personal y socioambiental, así como desarrollar conocimientos a través de la participación en prácticas científicas (analizar datos, desarrollar y aplicar modelos, generar argumentos, hacer predicciones y construir explicaciones), reporta grandes beneficios para el aprendizaje de diversos tipos de estudiantes (Caamaño, 2011). Ejemplos concretos de actividades de este tipo pueden encontrarse en la literatura (Caamaño, 2022).

Finalmente, cualquier cambio significativo en educación demanda repensar las prácticas e instrumentos que se utilizan para evaluar el aprendizaje de los estudiantes. Si queremos que los estudiantes modifiquen y enriquezcan sus formas de razonar, debemos crear oportunidades de manera periódica para que los alumnos hagan visible su pensamiento, reciban retroalimentación específica sobre sus ideas y reflexionen sobre sus avances y los pasos a seguir para alcanzar las metas de aprendizaje deseadas. Esta evaluación formativa crea espacios para que los estudiantes se cuestionen sus formas de pensar y se vean expuestos a visiones alternativas que los ayuden a construir puentes conceptuales entre distintos esquemas de razonamiento. Las evaluaciones sumativas también deben ser modificadas para reducir el énfasis en la demostración de conocimientos declarativos aislados y la aplicación mecánica de algoritmos, e incrementar las oportunidades para aplicar de manera integrada conocimientos, prácticas científicas y formas disciplinarias de razonar en el análisis de problemas de relevancia (Talanquer, 2019).

Referencias

- ANDERSON, B. (1990). «Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12–16)». *Studies in Science Education*, vol. 18, n.º. 1, p. 53-85.
- BURKE, H. D.; HAZARI A.; YITBAREK, S. (2009). *Misconceptions in chemistry: Addressing perceptions in chemical education*. Berlin: Springer-Verlag.
- BOO, H. K. (1998). Students' understanding of chemical bonds and the energetics of chemical reactions. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 35, n.º. 5, p. 569-581.
- BROWN, D. E.; HAMMER, D. (2008). «Conceptual change in physics». En S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*, p. 127-154. New York, NY: Routledge.
- CAAMAÑO, A. (2011). «Enseñar química mediante la contextualización, la indagación y la modelización». *Alambique*, n.º. 69, p. 21-34.
- CAAMAÑO, A. (2022). «Energía, espontaneidad y equilibrio (Monografía)». *Alambique*, n.º. 107, p. 4-7.
- JOHNSON, P. (2002). «Children's understanding of substances, part 2: Explaining chemical change». *International Journal of Science Education*, vol. 22, n.º. 7, p. 719-737.
- KIND, V. (2004). *Beyond appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas* (2nd ed.). London: Royal Society of Chemistry.
- NGAI, C.; SEVIAN, H.; TALANQUER, V. (2014). «What is this substance? What makes it different? Mapping progression in students' assumptions about chemical identity». *International Journal of Science Education*, vol. 36, n.º. 14, p. 2438-2461.
- MACRIE-SHUCK, M.; TALANQUER, V. (2020). «Exploring students' explanations of energy transfer and transformation». *Journal of Chemical Education*, n.º. 97, vol. 4225-4234.
- SOLSONA, N. J.; IZQUIERDO, M.; DE JONG, O. (2003). «Exploring the development of students' conceptual profiles of chemical change». *International Journal of Science Education*, vol. 25, n.º. 1, p. 3-12.
- TABER, K. (2002). *Chemical misconceptions—Prevention, diagnosis and cure. Vol. I: Theoretical background*. London: Royal Society of Chemistry.
- TABER, K. S. (2013). «A common core to chemical conceptions: Learners' conceptions of chemical stability, change and bonding». En G. Tsaparlis & H. Sevian (Ed.), *Concepts of matter in science education*, p. 391-418. Dordrecht: Springer.
- TALANQUER, V. (2007). «Explanations and teleology in chemistry education». *International Journal of Science Education*. vol. 29, n.º. 7, p. 853-870.
- TALANQUER, V. (2013a). «When atoms want». *Journal of Chemical Education*, n.º. 90, p. 1419-1424.
- TALANQUER, V. (2013b). «How do students reason about chemical substances and reactions?» In G. Tsaparlis and H. Sevian (Eds.) *Concepts of matter in science education*. Series Innovations in Science and Technology Education, vol. 19, p. 331-346. Springer: Dordrecht.
- TALANQUER, V. (2015). «Threshold concepts in chemistry: The critical role of implicit schemas». *Journal of Chemical Education*, n.º. 92, p. 3-9.
- TALANQUER, V. (2018). «Chemical rationales: Another triplet for chemical thinking». *International Journal of Science Education*, n.º. 40, p. 1874-1890.
- TALANQUER, V. (2019). «Assessing for chemical thinking». En M. Schultz, S. Schmid & G. A. Lawrie, (Eds.) *Research and Practice in Chemistry Education: Advances from the 25th IUPAC International Conference on Chemistry Education*, p. 123-133. Singapore: Springer.
- TALANQUER, V. (2020). «La progresión de los aprendizajes sobre la composición, estructura y transformación química de la materia». *Educató Química*, n.º. 27, p. 4-11.
- TALANQUER, V. (2021). «¿Cómo progresan las ideas de los estudiantes sobre las relaciones estructura-propiedades?» *Educató Química*, n.º. 28, p. 21-27.
- TANNEN, D. (1993). *Framing in discourse*. New York: Oxford University Press.
- WEINRICH, M. L.; TALANQUER, V. (2015). «Mapping students' conceptual modes when thinking about chemical reactions used to make a desired product». *Chemistry Education Research and Practice*, n.º. 16, p. 561-577.
- YAN, F.; TALANQUER, V. (2015). «Students' ideas about how and why chemical reactions happen: Mapping the conceptual landscape». *International Journal of Science Education*, vol. 37, n.º. 18, p. 3066-3092.



Vicente Talanquer

Profesor en la Universidad de Arizona. Autor o coautor de más de diez libros de primaria y secundaria y de más de cien artículos arbitrados de investigación en educación química y pensamiento docente. Su trabajo se centra en el estudio de las formas de razonamiento de los estudiantes y de los profesores de química. C. e.: vicente@arizona.edu