

Aprender a explicar y diseñar con la química

Learning to explain and design with chemistry

Vicente Talanquer

Departamento de Química y Bioquímica, Universidad de Arizona, EE. UU.

PALABRAS CLAVE:

Razonamiento mecanístico
Pensamiento sistémico
Educación química
Explicación
Diseño

RESUMEN:

Los marcos actuales para la educación en ciencias enfatizan la necesidad de que los estudiantes integren conocimientos disciplinares con prácticas y formas de razonamiento que les permitan explicar fenómenos y diseñar soluciones para problemas relevantes. En este artículo se argumenta que la química escolar ofrece un contexto especialmente propicio para desarrollar y coordinar dos formas de razonamiento fundamentales para realizar esas tareas: el razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico. Se analizan las características, metas epistémicas y complementariedades de ambas formas de pensar, así como las razones conceptuales y epistemológicas que hacen de la química una disciplina particularmente adecuada para su desarrollo. Finalmente, se propone un modelo de instrucción orientado a promover su coordinación en el análisis y solución de problemas de interés científico, tecnológico y socioambiental.

KEYWORDS:

Mechanistic reasoning
Systems thinking
Chemistry education
Explanation
Design

ABSTRACT:

Contemporary science education frameworks emphasize the need for students to integrate disciplinary knowledge with practices and modes of reasoning that enable them to explain phenomena and design solutions to relevant problems. This article argues that school chemistry provides a particularly productive context for developing and coordinating two fundamental forms of reasoning to engage in those tasks: mechanistic reasoning and systems thinking. The paper analyzes the characteristics, epistemic goals, and complementarities of these reasoning approaches, as well as the conceptual and epistemological reasons why chemistry is especially well suited to foster their development. Finally, an instructional model is proposed to support their coordination in the analysis of phenomena and the design, implementation, and evaluation of solutions to scientific, technological, and socio-environmental challenges.

Introducción

Los problemas socioambientales que enfrentan las sociedades contemporáneas requieren ciudadanos capaces de comprender fenómenos complejos y profesionales preparados para diseñar, implementar y evaluar posibles soluciones.^[1-4] Afrontar estos desafíos demanda individuos que no solo posean conocimientos fundamentales de química y ciencias en general, sino que puedan utilizarlos para explicar fenómenos, predecir comportamientos e intervenir de manera informada sobre sistemas naturales y tecnológicos.^[5-6] Entre las formas de razonamiento que resultan especialmente relevantes para alcanzar estos objetivos destacan el razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico.^[7,8]

El razonamiento mecanístico es una forma de pensar que permite generar explicaciones y hacer predicciones sobre fenómenos de interés a partir de la identificación de los componentes relevantes de un sistema, así como de sus propiedades, interacciones, actividades y organización en el espacio y el tiempo.^[9] Este tipo de razonamiento se basa en la construcción de explicaciones causales que dan cuenta de cómo las propiedades y comportamientos observados emergen de las interacciones dinámicas entre las partes que conforman el sistema.

Por su parte, el pensamiento sistémico permite comprender cómo las interacciones entre los componentes de un sistema son condicionadas por restricciones, fronteras, flujos y ciclos de retroalimentación, así como analizar cómo estos factores influyen en su comportamiento, estabilidad y capacidad de adaptación.^[10] Esta forma de razonar resulta especialmente útil para anticipar consecuencias, identificar puntos de intervención y diseñar y evaluar estrategias orientadas a modificar, controlar u optimizar el funcionamiento de un sistema.

Estas dos formas de pensar comparten diversas estrategias y elementos de razonamiento, entre ellos la identificación de componentes relevantes, sus propiedades, interacciones y organización. Sin embargo, difieren en sus metas epistémicas. Mientras el razonamiento mecanístico se orienta a explicar cómo se producen los fenómenos observados, el pensamiento sistémico se enfoca en comprender cómo se regulan, modifican o transforman esos fenómenos dentro de un contexto más amplio, y cómo pueden intervenir para alcanzar determinados objetivos.^[11]

En este artículo se argumenta que la química escolar constituye un contexto particularmente propicio para desarrollar el razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico, así como para enseñar a los estudiantes a coordinar ambas formas de

razonamiento al abordar problemas que demandan tanto explicar fenómenos como diseñar estrategias para intervenir sobre ellos. Para sustentar esta idea, comenzaremos analizando las características fundamentales de cada una de estas formas de pensar.

Razonamiento mecanístico

Aprender a razonar mecanísticamente es de gran utilidad para los estudiantes porque les permite ir más allá de la simple descripción de los fenómenos para realizar inferencias, construir explicaciones y generar predicciones sobre su comportamiento.^[12] Esta forma de pensar facilita la conexión entre eventos y procesos que ocurren a diferentes escalas, desde niveles submicroscópicos hasta niveles macroscópicos.^[9] Asimismo, ayuda a razonar cualitativa y cuantitativamente sobre cambios que tienen lugar en el espacio y en el tiempo, y prepara a los estudiantes para construir argumentos fundamentados en evidencia y conocimiento científico, así como para evaluar críticamente explicaciones alternativas sobre un mismo fenómeno.

Russ y sus colaboradores han propuesto un conjunto de elementos que caracterizan la aplicación del razonamiento mecanístico al análisis de fenómenos naturales.^[7] Consideremos, por ejemplo, la explicación de por qué la acidez del agua de un lago aumenta cuando se disuelve dióxido de carbono (CO_2) en ella. Uno de los primeros pasos consiste en identificar las condiciones bajo las cuales ocurre el proceso, por ejemplo, a temperatura y presión constantes. Posteriormente, se reconocen las entidades relevantes que participan en el fenómeno, en este caso las moléculas de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), así como las propiedades que hacen posible sus interacciones. Por ejemplo, las moléculas de agua son polares y sus átomos de oxígeno, con carga parcial negativa, son atraídos por el átomo de carbono del CO_2 , que posee una carga parcial positiva. Con base en esta información, se construye una explicación causal que describe las actividades e interacciones que ocurren entre las entidades identificadas y cómo su organización en el espacio y el tiempo produce el fenómeno observado. En este caso, la interacción entre las moléculas conduce a la formación de ácido carbónico (H_2CO_3), el cual se disocia parcialmente en solución, incrementando la concentración de iones hidronio (H_3O^+) y, en consecuencia, la acidez del agua.

De forma general, al razonar mecanísticamente (a) se analiza lo que ocurre en un nivel de organización más fundamental que el del fenómeno observado; (b) se identifican las entidades, propiedades e interacciones relevantes en ese nivel; y (c) se construye una explicación causal que muestra cómo la organización y actividad de esos elementos producen el fenómeno de interés.^[13]

Pensamiento sistémico

Mientras el razonamiento mecanístico enfatiza la arquitectura causal que explica cómo se producen los fenómenos, el pensamiento sistémico se enfoca en comprender las condiciones y procesos que influyen en su comportamiento y evolución.^[10,14] Esta forma de pensar ayuda a los estudiantes a reconocer cómo las interacciones entre múltiples elementos generan patrones colectivos y cómo dichos patrones pueden verse afectados por cambios en el sistema o en su entorno. Así, los estudiantes desarrollan las capacidades de analizar relaciones de interdependencia, anticipar consecuencias e identificar oportunidades de intervención, habilidades esenciales para enfrentar desafíos complejos como el cambio climático o la acidificación de los océanos.

Varios autores han propuesto un conjunto de elementos que caracterizan la aplicación del pensamiento sistémico al análisis de fenómenos y problemas complejos.^[15-16] Imaginemos, por ejemplo, que nos interesa controlar los cambios de pH producidos por la disolución de óxidos gaseosos en el lago antes mencionado. En este caso, uno de los primeros pasos consiste en definir el sistema de interés y establecer sus fronteras, identificando los elementos y procesos relevantes tanto dentro como fuera de él. Por ejemplo, además del agua del lago, podrían considerarse las emisiones atmosféricas de dióxido de carbono y óxidos de azufre y nitrógeno, las corrientes de entrada y salida de agua, la composición química del suelo circundante, la presencia de organismos acuáticos y las actividades humanas que afectan al ecosistema. Posteriormente, se analizan las relaciones entre estos componentes, los flujos de materia y energía que los conectan, y los factores que regulan o limitan su comportamiento. A partir de este análisis, es posible identificar ciclos de retroalimentación, anticipar las consecuencias de distintas perturbaciones y reconocer posibles puntos de intervención. Por ejemplo, la reducción de emisiones contaminantes, el control de la escorrentía o el aumento de la capacidad amortiguadora del sistema pueden contribuir a disminuir las variaciones de pH y sus efectos sobre el ecosistema.

De forma general, al pensar sistémicamente (a) se delimita el sistema de interés y se identifican las restricciones, flujos, retroalimentaciones y factores externos que condicionan su comportamiento; (b) se analiza cómo estos elementos influyen en las interacciones entre los componentes del sistema; y (c) se evalúa cómo cambios en dichas condiciones pueden alterar su funcionamiento, estabilidad o capacidad de adaptación. Este análisis permite anticipar consecuencias e identificar oportunidades para diseñar e implementar intervenciones orientadas a alcanzar determinados objetivos.

El papel de la química

El razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico desempeñan un papel fundamental en las ciencias y las ingenierías. En este artículo se argumenta que la química escolar ofrece un contexto particularmente rico para desarrollar ambas formas de razonamiento y favorecer su coordinación. Por un lado, permite a los estudiantes explorar fenómenos que abarcan desde sistemas relativamente simples hasta situaciones de gran complejidad. Por otro, combina objetivos orientados tanto a la explicación de fenómenos como al diseño, control y optimización de procesos y sistemas químicos.

A) Argumento conceptual

La química estudia sistemas constituidos por entidades que interactúan dinámicamente en múltiples niveles de organización, desde átomos y moléculas hasta células, materiales y sistemas ambientales.^[6,17] Esta diversidad ofrece oportunidades excepcionales para que los estudiantes desarrollen progresivamente el razonamiento mecanístico mediante el análisis de fenómenos cuya complejidad aumenta de manera gradual.

En el estudio de sistemas relativamente simples, como los átomos, los estudiantes pueden construir explicaciones basadas en un conjunto reducido de componentes e interacciones. Por ejemplo, pueden explicar por qué el tamaño de un átomo disminuye cuando pierde un electrón a partir de las fuerzas electrostáticas que actúan entre electrones y protones. A nivel molecular, estas mismas ideas permiten explicar por qué una molécula de agua posee una geometría angular o presenta polaridad. Conforme se avanza hacia sistemas más complejos, los estudiantes pueden relacionar propiedades macroscópicas con

interacciones microscópicas, como al explicar diferencias en la rigidez de una membrana celular a partir de la estructura de sus componentes y las fuerzas intermoleculares presentes. De manera similar, el análisis de las interacciones entre múltiples partículas permite explicar y predecir propiedades como los puntos de ebullición, la solubilidad o la viscosidad relativas de distintas sustancias.

Esta progresión brinda múltiples oportunidades para que los estudiantes aprendan a construir explicaciones causales cada vez más sofisticadas utilizando un conjunto relativamente limitado de principios fundamentales. Asimismo, les permite apreciar cómo nuevas propiedades y comportamientos surgen conforme aumenta el nivel de organización de los sistemas estudiados.^[18-19] Por ejemplo, la capacidad de enlace de un átomo puede explicarse a partir de la organización y comportamiento de partículas subatómicas. La geometría y polaridad molecular emergen de la disposición e interacción de los átomos enlazados. A escalas mayores, propiedades como la fluidez de una membrana celular o el punto de ebullición de una sustancia resultan de la acción colectiva de un gran número de moléculas en interacción. De esta manera, los estudiantes aprenden a relacionar fenómenos observables con procesos que ocurren en niveles de organización subyacentes.

El análisis de sistemas químicos constituidos por múltiples partículas en interacción también ofrece oportunidades valiosas para introducir y desarrollar conceptos estrechamente relacionados con el pensamiento sistémico dentro de explicaciones de carácter mecanístico.^[20] Por ejemplo, explicar la evaporación de un líquido requiere reconocer variaciones estadísticas en la distribución de energías y velocidades de las partículas. El estudio de los equilibrios químicos permite analizar cómo los sistemas responden a perturbaciones e introducir la idea de procesos de retroalimentación que favorecen la estabilidad del sistema. Asimismo, fenómenos como la formación de neblina durante la expansión adiabática del aire abren la puerta a discutir fronteras, intercambios con el entorno y restricciones que condicionan la evolución de un sistema. De esta manera, la química permite familiarizar a los estudiantes con conceptos fundamentales para el pensamiento sistémico a partir de fenómenos relativamente sencillos y accesibles.

En general, la química escolar ofrece múltiples contextos, desde sistemas relativamente simples hasta fenómenos de gran complejidad, en los que el razonamiento mecanístico puede desarrollarse de manera progresiva. Asimismo, brinda oportunidades para introducir muchos de los conceptos asociados al pensamiento sistémico en sistemas relativamente simples antes de enfrentarse a problemas socioambientales complejos. Estas características convierten a nuestra disciplina en un contexto especialmente propicio para el desarrollo articulado de ambas formas de razonamiento.

B) Argumento epistemológico

Una de las características distintivas de la química es su doble orientación hacia la comprensión y la transformación del mundo material.^[21] Además de buscar explicar la composición, estructura y comportamiento de la materia, la química persigue activamente el desarrollo de estrategias para modificarla, controlarla y aprovecharla con fines específicos. Por ello, diversos autores la han caracterizado como una tecnociencia en la que la construcción de modelos y teorías coexiste con el diseño de métodos para analizar y sintetizar sustancias, controlar sus transformaciones y optimizar procesos de interés científico, tecnológico y social.^[21-22]

Esta combinación de metas explicativas y de diseño no solo crea oportunidades para desarrollar el razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico, sino que con frecuencia exige su coordinación al abordar problemas que requieren comprender fenómenos, diseñar soluciones, implementarlas y evaluar sus resultados. En este contexto, explicar, diseñar y actuar dejan de ser actividades independientes para convertirse en prácticas complementarias que se enriquecen mutuamente.

Por ejemplo, al sintetizar un material polimérico en el laboratorio, los estudiantes pueden explicar la formación del producto a través del mecanismo de reacción, así como diseñar, implementar y evaluar estrategias para incrementar el rendimiento, reducir el tiempo de reacción, minimizar la generación de residuos o disminuir el consumo energético del proceso. En este tipo de situaciones, las preguntas de interés evolucionan naturalmente desde “¿cómo se produce este fenómeno?” hacia “¿cómo puede modificarse, controlarse u optimizarse?”, creando un contexto propicio para coordinar ambas formas de razonamiento.

Adicionalmente, a través de la exploración de diversos sistemas y fenómenos químicos, los estudiantes pueden aprender no solo a coordinar el razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico, sino también a reconocer las distintas metas epistémicas de cada uno. Mientras el razonamiento mecanístico permite explicar y predecir cómo se producen los fenómenos observados, el pensamiento sistémico facilita comprender las condiciones que influyen en su comportamiento, identificar oportunidades para modificarlo y anticipar las consecuencias de distintas decisiones o soluciones de diseño.

Una propuesta de coordinación

El desarrollo y la coordinación del razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico pueden promoverse mediante un modelo de instrucción que haga explícitos los procesos involucrados en la construcción de explicaciones y en el diseño, implementación y evaluación de soluciones. El modelo propuesto se organiza en tres etapas (Figura 1):^[11]

- A. Exploración mecanística
- B. Enmarcamiento sistémico
- C. Diseño y revisión coordinados

Estas etapas no deben entenderse como compartimentos aislados, sino como momentos complementarios dentro de un proceso iterativo de aprendizaje. A continuación, se presentan los propósitos y actividades principales asociados con cada una de ellas.

A) Exploración mecanística

La primera fase se centra en construir una explicación causal del fenómeno de interés. Imaginemos que el reto consiste en diseñar una pila de limón capaz de generar al menos 2 V utilizando materiales de bajo costo y bajo impacto ambiental.

^[23] En esta etapa, los estudiantes buscan explicar cómo se genera la corriente eléctrica en el sistema. Para ello identifican los componentes relevantes de la pila, como los electrodos metálicos, el jugo de limón y los conductores eléctricos. Posteriormente analizan las propiedades e interacciones que hacen posible el funcionamiento del dispositivo, por ejemplo, las reacciones de oxidación y reducción que ocurren en los electrodos y el movimiento de cargas a través del sistema. Con base en esta información construyen una explicación causal que describe cómo las transferencias de electrones y el transporte de iones dan lugar a una diferencia de potencial eléctrico observable.

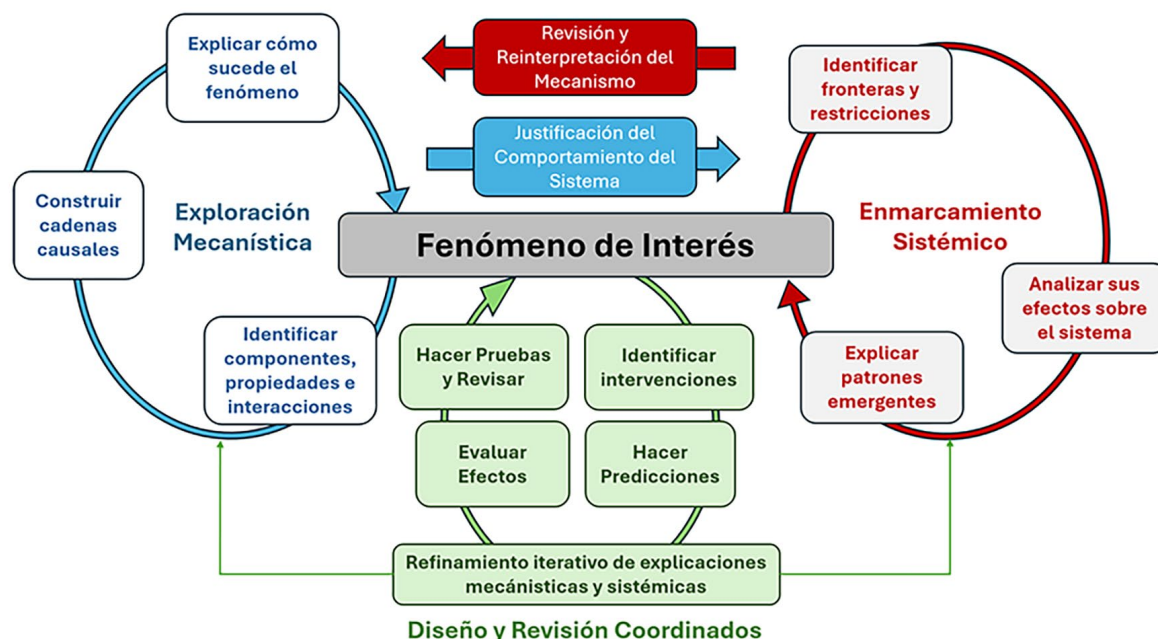


Figura 1. Diagrama del modelo de coordinación del razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico.

B) Enmarcamiento sistémico

Una vez construido el modelo mecanístico básico, los estudiantes amplían el análisis para identificar factores que condicionan el funcionamiento del sistema. En el caso de la pila de limón, esto implica considerar variables como la naturaleza de los metales utilizados como electrodos, la acidez del limón, la distancia entre los electrodos, el tamaño del fruto, el número de celdas conectadas en serie o paralelo, y los requerimientos energéticos del dispositivo que se desea alimentar. Los estudiantes analizan cómo estos factores limitan o favorecen el desempeño de la pila y cómo interactúan entre sí. También pueden extender las fronteras del sistema para considerar aspectos relacionados con el costo de los materiales, su disponibilidad, seguridad e impacto ambiental. El objetivo es comprender cómo las condiciones bajo las cuales opera la pila influyen en su comportamiento y en la viabilidad de distintas alternativas de diseño.

C) Diseño y revisión coordinados

En la tercera fase, los estudiantes coordinan las perspectivas mecanística y sistémica para diseñar, implementar y evaluar soluciones. Por ejemplo, pueden proponer incrementar el voltaje conectando varias celdas en serie, aumentar la acidez del medio para favorecer ciertas reacciones electroquímicas o seleccionar materiales alternativos para los electrodos. El razonamiento mecanístico les permite anticipar cómo estas modificaciones afectarán los procesos responsables de la generación de corriente eléctrica. El pensamiento sistémico les ayuda a evaluar cómo dichas decisiones afectan simultáneamente el costo, la seguridad, la disponibilidad de materiales, la durabilidad del dispositivo y su impacto ambiental. Los diseños propuestos se construyen y ponen a prueba experimentalmente, utilizando los resultados obtenidos para revisar supuestos, comparar alternativas y refinar iterativamente la solución desarrollada. Este proceso permite que explicar el funcionamiento de la pila y diseñar una mejor pila se conviertan en actividades mutuamente dependientes.

Conclusiones

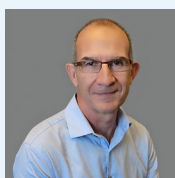
Los marcos y estándares contemporáneos para la educación en ciencias enfatizan la necesidad de que los estudiantes integren ideas centrales de las disciplinas con prácticas y formas de razonamiento que les permitan generar explicaciones y diseñar soluciones para problemas relevantes.^[24-26] La tesis central de este artículo es que la química escolar ofrece un contexto especialmente favorable para alcanzar estos objetivos. Por un lado, brinda oportunidades para desarrollar progresivamente el razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico a través del análisis de sistemas que abarcan múltiples niveles de organización. Por otro, su orientación simultánea hacia la comprensión y la transformación del mundo material crea contextos auténticos en los que los estudiantes pueden aprender a coordinar ambas formas de razonamiento al explicar fenómenos, diseñar soluciones, implementarlas y evaluar sus consecuencias.

El logro de estos objetivos de aprendizaje se facilita cuando la enseñanza se ancla en el análisis de fenómenos o problemas de interés para los estudiantes, las comunidades en las que viven o los grandes retos planetarios que enfrentamos como sociedad.^[27] De hecho, los conocimientos y formas de pensar y actuar en química son de utilidad para comprender desde por qué y cómo blanquear mejor la ropa hasta diseñar estrategias para reducir la contaminación ambiental, contribuir a mitigar el calentamiento global y el cambio climático, o evaluar métodos de purificación de agua económicos y accesibles para comunidades remotas. Todas estas situaciones pueden abordarse mediante estrategias similares a las descritas en este trabajo.

De esta manera, promover el desarrollo articulado del razonamiento mecanístico y el pensamiento sistémico puede contribuir a formar estudiantes mejor preparados para comprender la complejidad de los sistemas naturales y tecnológicos, así como para participar de manera informada y responsable en la búsqueda de soluciones a los desafíos científicos, tecnológicos y socioambientales del siglo XXI.^[3,4]

Bibliografía

- [1] C. H. Middlecamp, M. M. Kirchhoff, P. Mahaffy, K. Kummerer, *Chemistry Education for a Sustainable Future*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, **2025**, <https://doi.org/10.1039/9781837676576>.
- [2] J. Garcia-Martinez, E. Serrano-Torregrosa, *The Chemical Element: Chemistry's Contribution to Our Global Future*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, **2011**, <https://doi.org/10.1002/9783527635641>.
- [3] R. W. Tytler, M. C. Monroe, C. Eames, P. J. White, *Res. Sci. Ed.* **2025**, 55, 1129-1147, <https://doi.org/10.1007/s11165-025-10276-8>.
- [4] T. D. Sadler, Z. Xu, D. Fortus, *Int. J. Sci. Educ.* **2025**, 47, 2093-2112, <https://doi.org/10.1080/09500693.2025.2490777>.
- [5] H. Sevan, V. Talanquer, *Chem. Educ. Res. Pract.* **2014**, 15, 10-23, <https://doi.org/10.1039/c3rp00111c>.
- [6] V. Talanquer, *Unlocking Chemical Thinking: Reimagining Chemistry Teaching and Learning*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, **2026**, <https://doi.org/10.1039/9781837072538>.
- [7] R. S. Russ, R. E. Scherr, D. Hammer, J. Mikeska, *Sci. Educ.* **2008**, 92, 499-525, <https://doi.org/10.1002/sce.20264>.
- [8] M. Orgill, S. York, J. MacKellar, *J. Chem. Educ.* **2019**, 96, 2720-2729, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00169>.
- [9] P. Machamer, L. Darden, C. F. Craver, *Philosophy of Science* **2000**, 67, 1-25, <https://doi.org/10.1086/392759>.
- [10] B. Richmond, *Syst. Dyn. Rev.* **1993**, 9, 113-133, <https://doi.org/10.1002/sdr.4260090203>.
- [11] V. Talanquer, *Chem. Educ. Res. Pract.* **2026**, <https://doi.org/10.1039/d6rp00160b>.
- [12] M. Haskel-Ittah, P. K. Illari, F. Russo, *Sci. & Educ.* **2026**, 35, 7-28, <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00676-7>.
- [13] C. Krist, C. V. Schwarz, B. J. Reiser, *J. Learn. Sci.* **2019**, 28, 160-205, <https://doi.org/10.1080/10508406.2018.1510404>.
- [14] O. B.-Z. Assaraf, N. Orion, *J. Res. Sci. Teach.* **2005**, 42, 518-560, <https://doi.org/10.1002/tea.20061>.
- [15] N. Orion, J. C. Libarkin, en *Handbook of Research on Science Education*, Vol. III (Eds.: N. G. Lederman, D. L. Zeidler, J. S. Lederman), Roudlege, New York, **2023**, pp. 692-716, <https://doi.org/10.4324/9780367855758-26>.
- [16] R. Mehren, A. Rempfler, J. Buchholz, J. Hartig, E. M. Ulrich-Riedhammer, *J. Res. Sci. Teach.* **2018**, 55, 685-711, <https://doi.org/10.1002/tea.21436>.
- [17] H. Tümay, *J. Chem. Educ.* **2023**, 100, 3925-3933, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00474>.
- [18] P. L. Luisi, *Found. Chem.* **2002**, 4, 183-200, <https://doi.org/10.1023/a:1020672005348>.
- [19] H. Tümay, *Chem. Educ. Res. Pract.* **2016**, 17, 229-245, <https://doi.org/10.1039/c6rp00008h>.
- [20] J. Saba, H. Hel-Or, S. T. Levy, *Instruc. Sci.* **2023**, 51, 475-507, <https://doi.org/10.1007/s11251-023-09624-w>.
- [21] B. Bensaude-Vincent, J. Simon, *Chemistry — The Impure Science*, Imperial College Press, London, **2008**, <https://doi.org/10.1142/p569>.
- [22] J. A. Chamizo, *Found. Chem.* **2013**, 15, 157-170, <https://doi.org/10.1007/s10698-013-9179-z>.
- [23] V. Talanquer, *Alambique* **2024**, 115, 34-41.
- [24] OECD, PISA 2025 Science Framework, disponible en <https://pisa-framework.oecd.org/science-2025/>, **2025** (consultado: 16/07/2026).
- [25] National Research Council, Next Generation Science Standards, The National Academies Press, Washington, DC, 2013, <https://doi.org/10.17226/18290>.
- [26] T. R. Kelley, J. G. Knowles, *Int. J. STEM. Educ.* **2016**, 3, 11, <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>.
- [27] S. Adipat, *Front. Educ.* **2024**, 9, 1346403, <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1346403>.



Vicente Talanquer

Departamento de Química y Bioquímica,
Universidad de Arizona, Tucson

C-e: vicente@arizona.edu

ORCID: 0000-0002-5737-3313

Vicente Talanquer es Profesor Distinguido en la Universidad de Arizona, donde su investigación se centra en el razonamiento estudiantil, el aprendizaje de la química y el diseño de enfoques educativos innovadores. Ha publicado más de 170 trabajos académicos y recibido varios reconocimientos por sus contribuciones a la enseñanza y aprendizaje de la química. Entre ellos destacan el RSC Nyholm Prize for Education (2025) y el ACS Award for Achievement in Research for the Teaching & Learning of Chemistry (2021). En la actualidad es editor asociado del *Journal of Chemical Education* y editor de la serie RSC Advances in Chemistry Education.