

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA QUÍMICA: TENDENCIAS, DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EDUCATIVAS. REVISIÓN NARRATIVA**Artificial intelligence in chemistry teaching-learning: trends, challenges, and educational opportunities. A narrative review****Inteligência artificial no ensino e aprendizagem de química: tendências educacionais, desafios e oportunidades. Uma revisão narrativa**

Rosa María Elizabeth Sayán-Rivera *, <https://orcid.org/0000-0002-4529-5928>

Universidad San Ignacio de Loyola, Perú

*Autor para correspondencia. email rosa.sayán@epg.usil.pe

Para citar este artículo: Sayán-Rivera, R. M. E. (2025). Inteligencia artificial en la enseñanza-aprendizaje de la Química: tendencias, desafíos y oportunidades educativas. Revisión narrativa. *Maestro y Sociedad*, 22(2), 1010-1024. <https://maestroysociedad.uo.edu.cu>

RESUMEN

Introducción: Existe una creciente incorporación de herramientas basadas en inteligencia artificial (IA) en el ámbito educativo; sin embargo, en el campo específico de la didáctica de la Química, este continúa siendo un espacio emergente y poco explorado. **MAteriales y métodos:** Esta revisión narrativa tiene como objetivo identificar las tendencias, desafíos y oportunidades pedagógicas asociadas al uso de IA en la enseñanza-aprendizaje de la Química, a partir del análisis crítico de estudios seleccionados entre 2020 y 2025, recopilados desde la base de datos Scopus. La metodología empleada se sustenta en el enfoque QR (Question and Reproducibility), orientado a garantizar rigor y transparencia en las revisiones narrativas. **Resultados:** Los hallazgos enfatizan en que la enseñanza de la química con IA incorpora plataformas para prácticas remotas, simulaciones y evaluación automatizada, consolidando una simbiosis docente-tecnología. Sin embargo, persisten desafíos en infraestructura, alfabetización digital y precisión de modelos, además de consideraciones éticas en el manejo de datos. **Discusión:** A pesar de ello, la IA ofrece personalización de contenidos, desarrollo del pensamiento crítico y acceso democratizado a laboratorios virtuales, fomentando la colaboración y la retroalimentación en tiempo real. Estas innovaciones redefinen el rol del docente como mediador y promueven un aprendizaje autónomo, ético y participativo. **Conclusiones:** Se concluye que la inteligencia artificial representa una oportunidad transformadora para renovar las prácticas de enseñanza-aprendizaje en química. No obstante, su implementación requiere una mirada crítica, ética y contextualizada, que considere tanto los avances tecnológicos como las necesidades y potencialidades formativas de los actores educativos.

Palabras clave: inteligencia artificial generativa; educación química; laboratorio virtual; simulación educativa.

ABSTRACT

Introduction: There is a growing incorporation of tools based on artificial intelligence (AI) in the educational field; however, in the specific field of Chemistry teaching, this continues to be an emerging and little-explored space. **Materials and methods:** This narrative review aims to identify the trends, challenges, and pedagogical opportunities associated with the use of AI in the teaching and learning of Chemistry, based on the critical analysis of selected studies between 2020 and 2025, compiled from the Scopus database. The methodology used is based on the QR (Question and Reproducibility) approach, aimed at ensuring rigor and transparency in narrative reviews. **Results:** The findings emphasize that chemistry teaching with AI incorporates platforms for remote practices, simulations, and automated assessment, consolidating a teacher-technology symbiosis. However, challenges persist in infrastructure, digital literacy, and model accuracy, in addition to ethical considerations in data management. **Discussion:** Despite this, AI offers content personalization, the development of critical thinking, and democratized access to virtual laboratories, fostering collaboration and real-time feedback. These innovations redefine the role of the teacher as a mediator and promote autonomous, ethical, and participatory learning.

Conclusions: It is concluded that artificial intelligence represents a transformative opportunity to renew teaching and learning practices in chemistry. However, its implementation requires a critical, ethical, and contextualized approach that considers both technological advances and the training needs and potential of educational stakeholders.

Keywords: generative artificial intelligence; chemical education; virtual laboratory; educational simulation.

RESUMO

Introdução: Há uma crescente incorporação de ferramentas baseadas em inteligência artificial (IA) no campo educacional; no entanto, no campo específico do ensino de Química, este continua sendo um espaço emergente e pouco explorado. Materiais e métodos: Esta revisão narrativa tem como objetivo identificar as tendências, os desafios e as oportunidades pedagógicas associadas ao uso de IA no ensino e aprendizagem de Química, a partir da análise crítica de estudos selecionados entre 2020 e 2025, compilados a partir da base de dados Scopus. A metodologia utilizada baseia-se na abordagem QR (Question and Reproducibility), visando garantir rigor e transparência nas revisões narrativas. Resultados: Os achados enfatizam que o ensino de Química com IA incorpora plataformas para práticas remotas, simulações e avaliação automatizada, consolidando uma simbiose professor-tecnologia. No entanto, persistem desafios em infraestrutura, alfabetização digital e precisão de modelos, além de considerações éticas na gestão de dados. Discussão: Apesar disso, a IA oferece personalização de conteúdo, desenvolvimento do pensamento crítico e acesso democratizado a laboratórios virtuais, fomentando a colaboração e o feedback em tempo real. Essas inovações redefinem o papel do professor como mediador e promovem a aprendizagem autônoma, ética e participativa. Conclusões: Conclui-se que a inteligência artificial representa uma oportunidade transformadora para renovar as práticas de ensino e aprendizagem em química. No entanto, sua implementação requer uma abordagem crítica, ética e contextualizada, que considere tanto os avanços tecnológicos quanto as necessidades e o potencial formativo dos atores educacionais.

Palavras-chave: inteligência artificial generativa; educação química; laboratório virtual; simulação educacional.

Recibido: 21/1/2025 Aprobado: 28/3/2025

INTRODUCCIÓN

Para el proceso de enseñanza-aprendizaje de la química se han realizado numerosos estudios que revelan que, si bien ha habido un crecimiento en información y tecnología, persisten retos significativos. Entre ellos, la necesidad de conectar con la vida real (Demelash et al., 2024); superar una enseñanza centrada en la teoría y la memorización, que genera desinterés (González, 2021); enfrentar las dificultades derivadas del lenguaje técnico y simbólico que caracteriza a esta ciencia (García, 2018); y transformar modelos tradicionales que limitan la participación y autonomía del estudiante (Wang, 2024).

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la enseñanza de la química ha evolucionado notablemente desde sus primeras aplicaciones en las décadas de 1980 y 1990. Un ejemplo inicial es el programa GEORGE, descrito por Cornelius et al. (1986), que permitía a los estudiantes interactuar con la tecnología para resolver problemas mediante explicaciones en lenguaje natural. En la misma línea, Larrechi y Rius (1991) desarrollaron un sistema experto para la separación sistemática de cationes en medios acuosos, que guiaba al estudiante con recomendaciones basadas en reglas químicas, facilitando el aprendizaje autónomo y el razonamiento químico.

Con los avances en capacidades computacionales, se han incorporado enfoques más sofisticados como el aprendizaje automático (machine learning). Kim et al. (2024), por ejemplo, integraron ciencia de datos y aprendizaje automático para enseñar la clasificación y predicción del punto de ebullición de compuestos químicos. Usando la plataforma Orange3, los estudiantes construyeron modelos predictivos sin requerir programación, fortaleciendo la comprensión de la relación entre estructura y propiedades moleculares, así como competencias en ciencia de datos.

ChatGPT (Chat Generative Pre-Trained Transformer) es una herramienta desarrollada por OpenAI en 2022, que interactúa de forma conversacional con el usuario. Inicialmente percibida como una amenaza a la evaluación académica, también ha sido vista como un recurso valioso para la enseñanza y la investigación. Leite (2023) exploró su uso en la definición de conceptos químicos, destacando su potencial si se implementa dentro de marcos pedagógicos críticos. En 2024, el mismo autor evaluó cómo ChatGPT, Gemini y Copilot definían conceptos fundamentales de la química, observando que, aunque coherentes con la terminología oficial, requieren mediación docente para evitar interpretaciones erróneas.

Desde una mirada didáctica, Sayán (2024) plantea la socioformación experiencial estética como método de enseñanza en química, donde la IA puede enriquecer la vivencia sensitiva, reflexiva y creativa del estudiante. Lejos de constituir una amenaza tecnocrática, los modelos de lenguaje como ChatGPT o las plataformas

multimodales pueden convertirse en mediadores sensibles que expanden las fronteras de la experiencia estética. Desde una perspectiva pedagógica más amplia, Mena et al. (2025) destacan que las tecnologías emergentes pueden transformar la educación cuando se integran críticamente en procesos que favorecen el aprendizaje activo, el desarrollo de habilidades cognitivas y la innovación metodológica.

Lyamuremye et al. (2024) en una revisión de 62 artículos, resaltan oportunidades como la personalización del aprendizaje y la asistencia al docente, pero advierten también sobre riesgos como los sesgos algorítmicos y la escasa formación docente. Subrayan la urgencia de establecer marcos pedagógicos sólidos y políticas claras para una adopción crítica de la IA en la educación química.

Una línea emergente consiste en emplear la IA para mejorar la sostenibilidad en entornos experimentales. Montes-Bageneta et al. (2020) integraron aprendizaje automático en laboratorios para predecir residuos químicos durante prácticas estudiantiles, fomentando así tanto la conciencia ecológica como las habilidades en modelado predictivo. Finalmente, Yuriev et al. (2024) proponen el marco conceptual CATALyST para analizar el impacto de la IA generativa en la educación química, considerando siete dimensiones (Contextos, Aplicaciones, Tecnología, Actitudes, Aprendizaje, Habilidades y Tareas). Este modelo destaca la necesidad de acompañar el desarrollo tecnológico con reflexión pedagógica profunda, aportando una mirada crítica y estructurada al campo.

Este estudio tiene como objetivo identificar las tendencias, desafíos y oportunidades pedagógicas asociadas al uso de IA en la enseñanza-aprendizaje de la Química.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio adopta el método Question and Reproducibility (QR) como enfoque central para el análisis de literatura científica, con el propósito de garantizar coherencia epistemológica, lógica crítica y trazabilidad metodológica en revisiones narrativas (Deroncele Acosta, 2025). El método QR tiene dos dimensiones: Question: se construye una o varias preguntas de investigación, que guía todo el análisis; la otra dimensión Reproducibility que asegura que cualquier lector pueda seguir el camino del análisis, desde la selección de artículos hasta las conclusiones. La reproducibilidad no se refiere únicamente a replicar resultados numéricos, sino a seguir el razonamiento y las decisiones del investigador, lo que permite evaluar la validez interpretativa del estudio. Esta perspectiva crítica, situada y reproducible, es especialmente útil cuando se abordan fenómenos interdisciplinarios en expansión, como el uso educativo de la inteligencia artificial.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

PREGUNTA 1. ¿Cuáles son las dimensiones teóricas asociadas a la integración de la inteligencia artificial en el campo de la enseñanza-aprendizaje de la química?

PREGUNTA 2. ¿Cuáles son las principales tendencias, desafíos y oportunidades educativas asociadas a la integración de la inteligencia artificial en el campo de la enseñanza-aprendizaje de la química?

REPRODUCIBILIDAD

La Reproducibilidad se basó en los siguientes procesos: (1) Formulación de la ecuación de búsqueda, (2) Selección de bases de datos, (3) Aplicación de filtros automatizados (4) Implementación de estrategias adicionales de búsqueda (5) Jerarquización y selección de estudios. La ecuación de búsqueda conformada consta de dos clústeres temáticos, un clúster asociado a la enseñanza-aprendizaje de la química y otro clúster relacionado con la inteligencia artificial, este segundo clúster fue tomado del estudio de Rojas Vistorte et al. (2024) (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuación de búsqueda

Clúster 1	"chemistry teaching" OR "teaching chemistry" OR "chemistry education" OR "teaching of chemistry" OR "chemical education" OR "chemistry instruction" OR "learning chemistry" OR "chemistry pedagogy" OR "teaching chemistry" OR "laboratory teaching"
OPERADOR BOOLEANO	AND
Clúster 2	"artificial intelligence" OR "machine intelligence" OR "intelligent support" OR "intelligent virtual reality" OR "chat bot*" OR "machine learning" OR "automated tutor" OR "personal tutor*" OR "intelligent agent*" OR "expert system" OR "neural network" OR "natural language processing" OR "generative artificial intelligence"

Esta ecuación de búsqueda fue ejecutada en la base de datos Scopus, con fecha de corte 30 de mayo de 2025, arrojando un total de 111 documentos. Posteriormente se limitó la búsqueda a sólo artículos reduciéndose a

60 documentos A continuación, se aplicó un filtro de "All Open Access", con el fin de garantizar la posibilidad de descarga y revisión completa de los estudios, lo que redujo la muestra a 26 artículos.

Finalmente, se excluyeron artículos que no tenían la suficiente relevancia temática, descartando por ejemplo aquellos relacionados con química verde, al no alinearse con el foco temático centrado en inteligencia artificial y enseñanza universitaria de la química, de este modo quedó un resultado de 22 artículos que fueron incluidos para la síntesis narrativa.

RESULTADOS

PREGUNTA 1. (Enfoque Bibliométrico)

¿Cuáles son las dimensiones teóricas asociadas a la integración de la inteligencia artificial en el campo de la enseñanza-aprendizaje de la química?

Para este análisis se utilizó el universo documental (111 artículos de Scopus) seleccionados sin restricciones, ello fue descargado en formato BIBTEX y procesado con el software VOSVIEWER revelándose patrones temáticos significativos (ver figura 1).

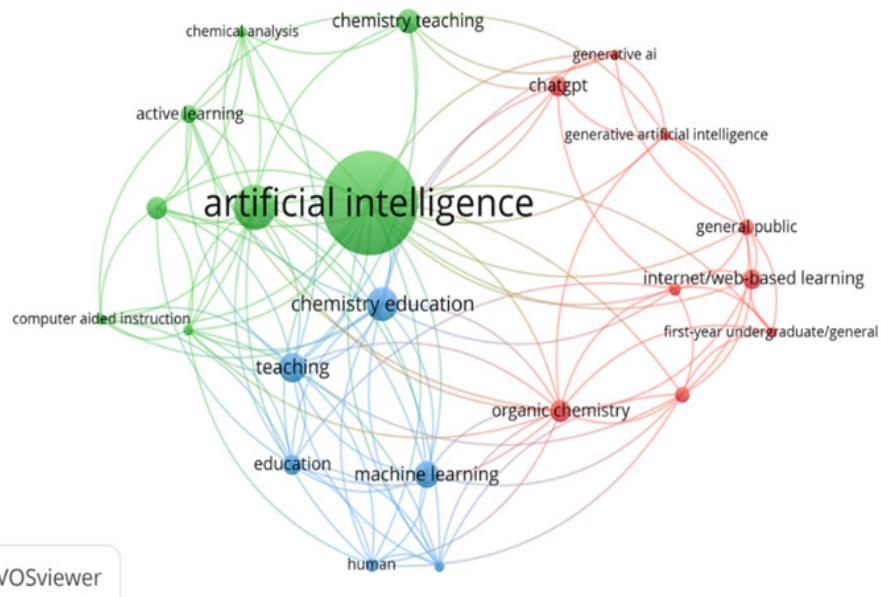


Figura 1. Red de coocurrencia

Esta red de coocurrencia de términos, generada mediante VOSviewer, muestra la estructura conceptual en torno al uso de inteligencia artificial en la educación química. La visualización está organizada en tres clústeres de colores que agrupan los términos según su afinidad semántica. A continuación, se interpreta cada clúster en función de su enfoque dominante.

El clúster rojo representa una dimensión comunicativa y de alfabetización digital. Este clúster agrupa términos como ChatGPT, generative AI, internet/web-based learning, general public, y first-year undergraduate/general, lo que indica un interés por las aplicaciones de la inteligencia artificial generativa (como ChatGPT) en contextos de aprendizaje accesible, virtual y abierto. Se relaciona con la alfabetización digital, la interacción con el público general y la educación de nivel inicial. Aquí se refleja un enfoque orientado a la divulgación científica, educación abierta y tecnologías emergentes, mostrando cómo la IA se integra en ambientes virtuales accesibles para estudiantes y público no especializado.

El clúster verde connota una dimensión tecnológica y aplicada. Este grupo gira en torno al nodo central artificial intelligence y abarca términos como active learning, computer-aided instruction, chemistry teaching, chemical analysis y AI in chemistry education. Refleja la aplicación de tecnologías inteligentes en la enseñanza-aprendizaje, destacando metodologías activas, apoyo computacional y experimentación en la educación química. Tiene una orientación tecnológico-pedagógica aplicada, que busca mejorar la instrucción a través de sistemas inteligentes y herramientas interactivas.

Por su parte el clúster azul refleja una dimensión pedagógica y formativa. En este grupo se encuentran términos como teaching, education, human, machine learning y chemistry education. Este clúster pone

énfasis en el componente educativo y formativo, abordando la integración de la IA desde una perspectiva más didáctica y conceptual, centrada en el proceso de enseñanza, el rol del docente y el aprendizaje del estudiante. La presencia del término “human” sugiere una preocupación por mantener una perspectiva centrada en el ser humano frente al uso de tecnologías automatizadas. Se puede interpretar como una dimensión ética-pedagógica que busca equilibrio entre innovación y humanismo en la formación científica.

PREGUNTA 2. (Síntesis Narrativa)

¿Cuáles son las principales tendencias, desafíos y oportunidades educativas asociadas a la integración de la inteligencia artificial en el campo de la enseñanza-aprendizaje de la química?

Se procedió a un análisis cualitativo con enfoque narrativo, identificando tres aspectos clave: tendencias, desafíos y oportunidades educativas (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis cualitativo

Autor (año) DOI	Tendencias	Desafíos	Oportunidades educativas
1. Berber et al. (2025) 10.1021/acs.jchemed.4c01033	Mediación pedagógica con IA y evaluación Interacción simbiótica humano–IA.	Alfabetización digital ética Brecha tecnológica.	Personalización del aprendizaje Fortalecimiento del pensamiento computacional
2. Feldman et al. (2025). 10.1007/s10956-024-10147-3	TPACK con IA generativa. Ingeniería de prompts. Asistencia artificial personalizada.	Brechas en alfabetización digital; vacíos curriculares	Rediseño de prácticas con GAI; promoción de pedagogía crítica sobre el uso ético de IA.
3. Dos Santos & Eichler (2025) 10.21577/1984-6835.20240065	Uso pedagógico de IAG en química. Aplicaciones exploratorias de ChatGPT.	Alucinaciones y errores conceptuales Confianza no crítica en las respuestas de IA. Riesgos de desinformación.	Promoción del pensamiento crítico. Fortalecimiento del rol docente como mediador epistémico.
4. Lizano & Idoyaga (2025) 10.1007/s10639-023-120631	Uso de IA para prácticas experimentales remotas. Supervisión mediada por IA.	Brecha digital y desigualdad de acceso. Capacitación docente en IA	Democratización de la experimentación. Estética experiencial en entornos híbridos.
5. Uçar et al. (2025) 10.1007/s10639-024-13295-6	Evaluación de LLMs en tareas químicas complejas; uso de prompts adversariales; desarrollo de pensamiento crítico mediante interacción con IA	Limitaciones en el razonamiento de modelos de IA. Riesgos de dependencia excesiva en respuestas generadas por IA.	Uso de IA como herramienta para fomentar habilidades analíticas. Integración de IA para enriquecer la enseñanza de la química.
6. Hu et al. (2024) 10.1007/s44196-024-00572-y	Integración de IA en el monitoreo educativo.	Privacidad y ética en la recopilación de datos	Retroalimentación y mejora de la enseñanza personalizada
7. Güth & van Vorst (2024) 10.1007/s10212-024-00798-6	Personalización del aprendizaje mediante IA.	Carga cognitiva en tareas complejas.	Mejora de la motivación intrínseca.
8. Nascimento Júnior et al. (2024) 10.1021/acs.jchemed.4c00230	Integración de IAG en la educación química	Dificultades de las IAG para procesar y generar representaciones químicas precisas	Desarrollo de prompts con base y contexto.
9. Gonçalves Costa et al. (2024) 10.1021/acs.jchemed.4c00247	Integración de IA en el diseño curricular.	Implementación efectiva de tecnologías emergentes	Mejora en la comprensión de conceptos complejos.
10. Vidhani & Mariappan (2024) 10.3390/chemistry6040043	Optimización de respuestas mediante prompts. Colaboración humano–IA en entornos educativos	Formulación del prompt contextualizados y precisos.	Fortalecer el pensamiento crítico, del pensamiento lógico y taxonómico
11. Leite (2024) 10.37074/jalt.2024.7.2.13	Incorporación crítica de la AI a la enseñanza-aprendizaje de Química	Validación respuestas AI.	Promoción del pensamiento crítico, acompañamiento y mediación pedagógico.
12. Leite (2023) 10.21577/0100-4042.20230059	Incorporación de IAG en enseñanza-aprendizaje de la Química..	Validar, corregir y complementar respuestas de IAG.	Fomentar el pensamiento crítico; capacitar a docentes e integrar IA a las didácticas química.
13. Tassoti (2024) 10.1021/acs.jchemed.4c00212	Integración de estrategias de prompting en la educación química.	Falta de trazabilidad en respuestas. Uso pasivo o crítico de la IA	Mejora de la interacción estudiante-IA; desarrollo metacognición y pensamiento crítico.
14. Yik & Dood (2024) 10.1021/acs.jchemed.4c00235	Uso de IA generativa en educación química.	Precisión de las explicaciones generadas por IA.	Fomentar el pensamiento crítico y habilidades analíticas al comparar las respuestas de IA con los conocimientos adquiridos.
15. Markovnikova et al. (2024) 10.32744/pse.2024.3.37	Uso de modelos computacionales para evaluar la complejidad visual	Variabilidad en la percepción de la complejidad	Personalización del aprendizaje en química.
16. Roski et al. (2024) 10.1021/acs.jchemed.3c00794	Integración de plataformas web personalizadas para la recopilación de datos de aprendizaje en química.	Formación docente en el uso e interpretación de herramientas de análisis de datos educativos.	Personalización del aprendizaje mediante análisis de datos.
17. Park & Martin (2024) 10.1163/23641177-BJA10079	Integración de IA en la educación científica.	Limitaciones en la comprensión conceptual de ChatGPT en temas científicos químicos.	Desarrollo del pensamiento crítico.

18.	Pereira & Ferreira (2023) 10.22201/fq.18708404e.2023.4.83872	Integración de tecnologías interactivas en la enseñanza de la química estructural.	Formación docente en el uso de herramientas digitales y simuladores de espectros.	Mejora del Aprendizaje autónomo y visual.
19.	Amirbekova et al. (2024) 10.3389/feduc.2023.1184768	Implementación de tecnologías inmersivas en educación química.	Implementación de tecnologías emergentes en entornos educativos	Mejorar comprensión de procesos abstractos en química y generar líneas de investigación sobre eficacia educativa.
20.	Weder et al. (2021) 10.1049/qtc2.12012	Integración de sistemas de procedencia en computación cuántica	Complejidad en la recopilación de datos de procedencia	Mejora en la selección de hardware y mitigación de errores
21.	Pence (2020) 10.3390/educsci10020034	Integración de tecnologías emergentes en la educación química.	Desarrollo de habilidades sociales para evitar el aislamiento de los estudiantes debido al uso de tecnologías	Diseñar nuevas estrategias pedagógicas para el siglo XXI. Formar docentes como mediadores tecnológicos. Aprendizaje de simulaciones interactivas
22.	Taylor et al. (2025) 10.1039/d4dd00330f	IA conversacional en laboratorios digitales; uso de avatares de IA para funciones clave en entornos de laboratorio virtual.	Necesidad de entrenamiento y evaluación rigurosa de los avatares.	Mejora de la formación y la colaboración en laboratorios virtuales.

Como tendencias en la enseñanza de la química se evidencia una integración creciente de herramientas basadas en inteligencia artificial que posibilitan experiencias de aprendizaje más personalizadas y dinámicas. Se emplean plataformas que facilitan prácticas experimentales remotas y entornos híbridos, permitiendo al estudiante interactuar con simulaciones y laboratorios virtuales. Al mismo tiempo, han aparecido sistemas generativos de lenguaje que contribuyen a diseñar rutas didácticas apoyadas en marcos pedagógicos específicos y en la elaboración de instrucciones (prompts) que guían la formulación de preguntas efectivas. De igual modo, se utilizan soluciones de evaluación automatizada para resolver y corregir ejercicios complejos de química, así como herramientas de análisis de datos en tiempo real que monitorean el desempeño de los alumnos y ofrecen retroalimentación continua. Estas iniciativas ponen de relieve una tendencia hacia la simbiosis entre el docente y la inteligencia artificial, donde el profesor asume un rol estratégico de mediador, validando y complementando las respuestas generadas por la tecnología para enriquecer la experiencia educativa.

A pesar del potencial transformador, persisten diversos desafíos que dificultan la implementación óptima de la inteligencia artificial en química. Una limitante puntual es la desigualdad en el acceso a recursos digitales, ya que no todas las instituciones cuentan con la infraestructura necesaria para soportar prácticas remotas o entornos inmersivos. Además, la falta de alfabetización digital en docentes y estudiantes puede obstaculizar el uso crítico de las herramientas de IA, generando dependencia o malinterpretación de los resultados. Otro reto importante radica en la tendencia de los modelos de lenguaje a producir explicaciones químicas imprecisas o erróneas si no se supervisan adecuadamente, lo cual puede conducir a la desinformación. La gradual sustitución de habilidades analíticas tradicionales por procesos mediados por la máquina también supone una carga cognitiva que, sin una guía didáctica adecuada, puede dispersar la atención y dificultar el aprendizaje autónomo. Finalmente, la recolección y el manejo de datos estudiantiles plantean consideraciones éticas y de privacidad que exigen políticas institucionales claras y formación continua del profesorado, a fin de garantizar un uso responsable y reflexivo de la tecnología.

Frente a estos desafíos, la inteligencia artificial abre la puerta a numerosas oportunidades para fortalecer el aprendizaje de la química y fomentar competencias transversales. La personalización de contenidos y ritmos de estudio permite adaptar el material a las necesidades individuales, promoviendo el desarrollo del pensamiento analítico y computacional mediante la interacción directa con modelos de lenguaje y entornos virtuales. La creación de prompts contextuales y escenarios de simulación estimula el pensamiento crítico y metacognitivo, pues el estudiante compara las respuestas automáticas con sus propias hipótesis y reflexiona sobre las discrepancias. Asimismo, los laboratorios remotos e inmersivos democratizan el acceso a prácticas experimentales complejas, beneficiando a alumnos ubicados en zonas geográficas diversas. La incorporación de asistentes conversacionales en entornos digitales favorece la colaboración y el aprendizaje social, mientras que el análisis de datos en tiempo real brinda retroalimentación inmediata que optimiza las estrategias pedagógicas. En conjunto, estas oportunidades refuerzan el papel del docente como mediador epistemológico, promueven la alfabetización digital responsable y favorecen un aprendizaje más autónomo, crítico y participativo en el contexto de la química contemporánea.

DISCUSIÓN

La integración de la inteligencia artificial en la enseñanza-aprendizaje de la química evidencia tres ejes interpretativos centrales: las tendencias emergentes, los desafíos estructurales y las oportunidades educativas. Entre las tendencias clave, destacan el uso de IA generativa, la realidad aumentada y la analítica de aprendizaje, tecnologías que están transformando las dinámicas didácticas y los entornos formativos. No obstante, esta incorporación tecnológica enfrenta desafíos significativos, como la inexactitud conceptual en las respuestas generadas por IA, la persistente brecha digital y la insuficiente formación docente para un uso crítico y pedagógico de estas herramientas. A pesar de ello, se reconocen oportunidades educativas relevantes, como la personalización del aprendizaje, la promoción del pensamiento crítico y el acceso ampliado a laboratorios virtuales e inmersivos, que pueden enriquecer la enseñanza de la química en múltiples niveles.

TENDENCIAS

Modelos generativos y su impacto en la mediación pedagógica

La incorporación de modelos generativos de inteligencia artificial, como ChatGPT, está transformando profundamente la enseñanza de la química, no al reemplazar al docente, sino al reformular su rol en el aula. Leite (2024) también advierte que la inteligencia artificial generativa tiene un carácter disruptivo en la enseñanza de la química, pues altera la manera en que se accede, se valida y se comunica el conocimiento disciplinar. Al analizar las respuestas de modelos como ChatGPT, Gemini y Copilot frente a conceptos químicos, Leite destaca cómo estas herramientas obligan a replantear los métodos pedagógicos tradicionales y a revisar los criterios de evaluación, autoría y veracidad del contenido académico. Estas herramientas emergentes plantean una transición desde un modelo tradicional centrado en la transmisión de contenidos, hacia uno donde el docente actúa como mediador crítico, diseñador de experiencias significativas y guía del pensamiento científico.

Esta reconfiguración exige no solo habilidades técnicas, sino también una sólida base pedagógica y un compromiso ético. Como han señalado Feldman y Blonder (2023), “el impacto de ChatGPT en la educación depende menos de su capacidad tecnológica y más del rol que asume el docente como mediador crítico del aprendizaje”. El aprendizaje con IA depende del nivel de intervención crítica del docente, quien debe orientar, contrastar y enriquecer las respuestas generadas, dentro del marco del conocimiento pedagógico-tecnológico (TPK).

En este sentido, Back et al. (2024) destacan que “la inteligencia artificial no sustituye la experiencia experimental en química, pero sí dinamiza el aprendizaje, lo vuelve más exploratorio y lo conecta con la ciencia viva”. Sin embargo, esta dinamización solo será pedagógicamente valiosa si se mantiene el rigor conceptual y se fomenta el pensamiento crítico. La mediación docente se convierte así en un eje fundamental para lograr que las tecnologías generativas potencien, y no empobrezcan, la experiencia formativa. Estos aportes resaltan que el rol docente en la era de la inteligencia artificial no se debilita, sino que se enriquece con nuevas responsabilidades: enseñar a discernir, cuestionar y construir conocimiento en colaboración con las herramientas digitales.

Si bien la inteligencia artificial y algunas tecnologías emergentes ofrecen posibilidades de apoyo para el aprendizaje de la química, como la simulación de prácticas o el uso de laboratorios virtuales, es necesario recordar que la esencia de esta disciplina es eminentemente experimental como enfatiza Sayán (2024) sosteniendo que la química es una disciplina eminentemente experimental y la idea que es real y su didáctica como asignatura debe encaminarse a la socioformación (Tobón, 2015) dotada de sensibilidad hacia el contexto y entorno lo que define como estética experiencial; los estudiantes deben manipular sustancias y desarrollar habilidades de observación, seguridad y procedimiento que solo se consolidan en la práctica tangible. Back et al. (2024) enfatizan que la inteligencia artificial puede complementar la enseñanza, pero no debe sustituir la experiencia directa en el laboratorio. Sin embargo y muy importante, Bazie et al. (2024) demostraron que el uso de laboratorios virtuales puede mejorar la comprensión conceptual de los estudiantes, siempre que se utilicen como herramientas complementarias y no como sustitutos del trabajo experimental auténtico.

En este sentido, las tecnologías deben pensarse como asistentes, pero no como sustitutos del laboratorio físico. Esta reflexión coincide con lo planteado por Berber et al. (2025), quienes advierten que la incorporación de IA en química debe respetar la naturaleza empírica de la disciplina, y usarse como un complemento que potencie, no reemplace, la experiencia científica directa.

Entornos inmersivos y simulación de procesos químicos

Los entornos inmersivos como la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR) están emergiendo como tecnologías disruptivas en la enseñanza de la química, al permitir la representación tridimensional e interactiva

de estructuras moleculares, reacciones químicas y procesos a escala atómica. Estas tecnologías permiten trascender las limitaciones de los modelos tradicionales en dos dimensiones y aproximan al estudiante a una comprensión más profunda y significativa de los fenómenos.

La simulación inmersiva ofrece experiencias didácticas más activas, donde los estudiantes pueden explorar, manipular y visualizar interacciones moleculares en tiempo real. Esto resulta especialmente beneficioso en temas como la estereoquímica, la cinética, la termodinámica o los mecanismos de reacción, cuya complejidad conceptual suele dificultar su comprensión.

Diversos estudios, como el de Pérez-Rodríguez et al. (2022), han demostrado que el uso de VR y AR en el aula contribuye a mejorar la motivación, la retención del conocimiento y el pensamiento espacial, lo que favorece la adquisición de competencias científicas. Según estos autores, “los entornos inmersivos representan una oportunidad para que la química deje de ser abstracta y se convierta en una experiencia tangible y significativa”. No obstante, su integración efectiva requiere una planificación didáctica adecuada y formación docente en el uso de estas herramientas digitales.

La inteligencia artificial, en este contexto, potencia estos entornos mediante asistentes inteligentes que guían la experiencia del usuario, personalizan los recorridos de aprendizaje y evalúan el desempeño en simulaciones, generando datos para la retroalimentación y mejora continua del proceso educativo. Esto convierte a la combinación de IA con VR/AR en una estrategia prometedora para transformar la enseñanza tradicional en experiencias más inmersivas, interactivas y adaptadas al ritmo de cada estudiante.

Analítica de aprendizaje para la toma de decisiones docentes

La integración de la inteligencia artificial en el análisis de datos educativos ha impulsado una nueva dimensión en la enseñanza de la química: la analítica del aprendizaje. A través de técnicas de minería de datos educativos (EDM) y aprendizaje automático (machine learning), los docentes pueden obtener información valiosa sobre el progreso de los estudiantes, identificar patrones de error, niveles de participación y áreas de dificultad conceptual.

Esta tendencia permite una personalización pedagógica fundamentada en datos, superando enfoques tradicionales generalistas. Herramientas de IA pueden generar reportes automáticos, visualizar trayectorias de aprendizaje, e incluso anticipar el riesgo de deserción o bajo rendimiento en ciertos temas. Esta capacidad de anticipación permite que la intervención pedagógica ocurra de manera oportuna y adaptada a las necesidades reales del grupo.

Según Popenici y Kerr (2017), “la inteligencia artificial no sustituye al juicio del docente, pero amplía su capacidad para actuar sobre evidencias del aprendizaje”. Esta afirmación sintetiza el potencial de la mediación técnico-pedagógica que la IA posibilita. Al facilitar la retroalimentación basada en evidencia, se fortalece un enfoque formativo centrado en el estudiante, aplicable tanto en contextos presenciales como virtuales. En el campo de la química, estas aplicaciones resultan especialmente útiles para monitorear habilidades experimentales, comprensión de fenómenos abstractos y la evolución de las competencias científicas. La visualización de datos de desempeño permite al docente ajustar la enseñanza en tiempo real, promoviendo una pedagogía más adaptativa y centrada en el proceso de aprendizaje individual.

DESAFÍOS

Riesgos de desinformación y errores conceptuales generados por IA

Uno de los desafíos más relevantes identificados en el uso de inteligencia artificial generativa en la enseñanza de la química es el riesgo de difusión de información incorrecta o incompleta por parte de los modelos. Herramientas como ChatGPT, si bien ofrecen respuestas rápidas y accesibles, no siempre garantizan precisión conceptual, lo que puede generar confusión o reforzar ideas erróneas si no existe una mediación docente adecuada.

Custodia Fonseca (2024) advierte que, en el caso específico de la educación química, muchas publicaciones aún coinciden en que ChatGPT presenta limitaciones en cuanto a la exactitud de sus respuestas. Esto se agrava por la confianza que algunos estudiantes depositan en estas tecnologías, sobre todo cuando no cuentan con los fundamentos necesarios para identificar errores conceptuales. De manera similar, dos Santos y Eichler (2024) realizaron un estudio de caso que expone cómo la IA puede reproducir o incluso generar desinformación, sobre todo cuando responde a preguntas relacionadas con tópicos controversiales o mal contextualizados. En este sentido, ambos autores coinciden en que la mediación crítica del docente es indispensable para enseñar a contrastar, problematizar y verificar la información que se obtiene por estos medios.

Por tanto, la incorporación de IA generativa en la enseñanza química debe ir acompañada de un enfoque pedagógico que fortalezca el pensamiento crítico, la validación científica y el desarrollo de habilidades metacognitivas en los estudiantes, evitando así una delegación ciega de la autoridad cognitiva a los algoritmos.

Brecha tecnológica y desigualdad en el acceso a innovaciones educativas

Uno de los desafíos más significativos para la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, en la educación química es la persistente brecha digital. Este fenómeno no solo implica la falta de acceso a dispositivos y conectividad, sino también desigualdades en habilidades digitales, infraestructura institucional y formación docente. La interacción en plataformas virtuales dotadas de IA implica necesariamente el uso crítico de herramientas digitales, la interpretación de datos experimentales simulados y la navegación por entornos tridimensionales, lo cual requiere competencias como: La alfabetización digital científica; la resolución de problemas en entornos simulados; el uso ético y estratégico de tecnologías emergentes.

Según el informe de la UNESCO (2023), más de 826 millones de estudiantes en el mundo no tenían acceso a una computadora durante la pandemia, y 706 millones no contaban con internet. Estas cifras evidencian una alarmante inequidad que impide a miles de estudiantes participar en experiencias educativas digitales, incluyendo el uso de laboratorios virtuales, plataformas adaptativas y modelos de inteligencia artificial que podrían enriquecer la enseñanza de la química.

En este contexto, Morales Álvarez et al. (2024) destacan que las escuelas públicas enfrentan una doble desventaja: la escasa infraestructura tecnológica y la falta de capacitación docente en el uso de TIC y TAC. Esta situación limita gravemente el aprovechamiento pedagógico de las innovaciones digitales y amplifica las desigualdades educativas ya existentes.

La educación química, por su componente experimental y abstracto, es particularmente vulnerable a estas desigualdades tecnológicas. Sin acceso a entornos digitales interactivos, simuladores o herramientas de IA generativa, los estudiantes de contextos desfavorecidos quedan excluidos de metodologías innovadoras que podrían potenciar su aprendizaje. Superar esta brecha implica una acción articulada en múltiples niveles que incluya inversión en conectividad, desarrollo de contenidos inclusivos y formación crítica para docentes. Solo así podrá garantizarse un acceso equitativo a las oportunidades educativas que ofrece la inteligencia artificial.

Déficit en la formación ética y técnica del profesorado

En el contexto de la enseñanza de la química, la incorporación de inteligencia artificial ha traído consigo una serie de oportunidades, pero también desafíos significativos. Uno de los más complejos es el déficit en la formación ética y técnica del profesorado. La presencia cada vez más frecuente de herramientas generativas, como los modelos de lenguaje, exige que los docentes no solo dominen su funcionamiento, sino que también comprendan críticamente los dilemas éticos asociados a su uso educativo.

Kamali et al. (2024) abordan este problema desde la teoría de la actividad, evidenciando que muchos docentes presentan posturas dispares y, en muchos casos, carecen de alineamientos claros con principios éticos. Esto genera prácticas inconsistentes y riesgos en la implementación de la IA, especialmente cuando se utiliza sin una base pedagógica sólida. En este sentido, la falta de formación en ética tecnológica se convierte en un obstáculo para el aprovechamiento reflexivo de estas herramientas.

Instituciones internacionales han propuesto marcos y lineamientos que orientan hacia una integración ética de la IA en los entornos educativos: La Comisión Europea (2022), por ejemplo, ha delineado un Marco de Competencia Docente en IA que contempla la comprensión conceptual, el uso ético y la evaluación crítica de herramientas inteligentes por parte del profesorado. De igual forma, la OCDE (2019) estableció cinco principios rectores para el desarrollo responsable de la IA, tales como el respeto por los derechos humanos, la transparencia y la supervisión humana. Entre estas propuestas destaca también la Recomendación de la UNESCO (2021), que subraya valores como la equidad, la inclusión y la alfabetización digital. Este documento enfatiza que la educación ética en torno a la inteligencia artificial debe insertarse en una cultura docente más amplia, centrada en la reflexión, la toma de decisiones fundamentadas y el diálogo interdisciplinar. Desde esta perspectiva, la formación inicial y continua del profesorado es esencial para garantizar un uso pedagógico ético, inclusivo y transformador de la IA.

Así, el desafío no radica solo en enseñar a usar la tecnología, sino en formar a los docentes como mediadores críticos capaces de guiar su implementación con criterio pedagógico, sensibilidad ética y compromiso con una educación científica verdaderamente humanista.

OPORTUNIDADES EDUCATIVAS

El pensamiento crítico es la capacidad de analizar, evaluar y sintetizar información de forma reflexiva y autónoma, con el propósito de tomar decisiones fundamentadas. Según Facione (1990), este pensamiento implica habilidades como la interpretación, el análisis, la inferencia, la evaluación y la autorregulación. En contextos educativos actuales, su desarrollo se vuelve crucial frente a la sobrecarga informativa, los sesgos y la desinformación.

En el ámbito de la enseñanza de la química, la integración de modelos de inteligencia artificial generativa como ChatGPT representa una oportunidad pedagógica significativa. El contraste entre las respuestas generadas por estas herramientas y las fuentes científicas validadas se convierte en un ejercicio formativo, donde el estudiante no solo detecta posibles errores o ambigüedades, sino que también debe justificar, argumentar y validar su comprensión disciplinar.

Favero et al. (2024) han demostrado que el uso de chatbots socráticos potencia este enfoque al establecer un diálogo humano–IA que promueve la formulación de argumentos, la refutación de ideas y la toma de postura razonada. En este tipo de interacción, el conocimiento no se recibe pasivamente, sino que se construye activamente mediante el análisis, la duda y la argumentación. La inteligencia artificial, así, se convierte en un mediador activo del aprendizaje y no en un simple transmisor de contenidos.

Este planteamiento se encuentra en sintonía con la propuesta de Bezanilla-Albisua et al. (2018), quienes afirman que el pensamiento crítico debe comprender no solo la dimensión analítica, sino también la acción comprometida y el uso ético del conocimiento.

Además, Yatani et al. (2024) introducen el concepto de “IA extrahérica”, una modalidad de interacción diseñada para activar habilidades cognitivas de orden superior. En lugar de proporcionar respuestas cerradas, estos sistemas formulan preguntas abiertas, proponen perspectivas alternativas y solicitan justificaciones, lo que incentiva la participación del estudiante y mitiga el riesgo de dependencia pasiva frente a la IA.

En consecuencia, el uso pedagógico del diálogo humano–IA en química fortalece una actitud científica en los estudiantes: indagar, verificar, cuestionar y tomar decisiones informadas. Esta competencia es esencial para enfrentar con criterio los desafíos sociales, ambientales y tecnológicos del mundo actual.

Personalización del aprendizaje químico a través de sistemas inteligentes

La integración de inteligencia artificial (IA) en la enseñanza de la química ofrece oportunidades significativas para la personalización del aprendizaje. Los sistemas inteligentes, como los modelos generativos y las plataformas adaptativas, permiten ajustar el contenido, el ritmo y la retroalimentación a las necesidades individuales de los estudiantes. Esta personalización no solo mejora el compromiso, sino que puede abordar brechas en el aprendizaje previo y promover un avance autónomo en función del estilo cognitivo.

Según Back et al. (2024), la IA no solo está acelerando el descubrimiento químico en la investigación científica, sino que también tiene un alto potencial en contextos educativos. Los autores destacan que, al incorporar IA en la educación, se puede preparar a los futuros profesionales para enfrentar una química cada vez más automatizada, interdisciplinaria y digitalizada. La IA, en este sentido, no solo actúa como herramienta técnica, sino como un sistema de apoyo para la toma de decisiones pedagógicas, capaz de analizar patrones de desempeño estudiantil y ofrecer rutas de aprendizaje personalizadas.

Esta capacidad adaptativa abre la puerta a modelos educativos más inclusivos, donde estudiantes con diferentes ritmos, estilos y contextos puedan avanzar de forma significativa. No obstante, la implementación exitosa de estas soluciones exige una mediación docente ética y crítica, así como una infraestructura tecnológica adecuada y accesible.

Laboratorios virtuales como entornos de aprendizaje accesibles y escalables

Los laboratorios virtuales han emergido como entornos clave para garantizar el acceso a experiencias prácticas de química, especialmente en contextos donde las limitaciones materiales, geográficas o de seguridad restringen la experimentación directa. En este marco, la inteligencia artificial amplifica su potencial democratizador, al permitir una personalización adaptativa que rompe con la rigidez de los modelos educativos tradicionales.

Los laboratorios virtuales también son altamente escalables, es decir, permiten ser utilizados simultáneamente por miles de estudiantes sin necesidad de replicar el equipamiento físico. De Jong et al. (2013) destacan que estas plataformas permiten atender a grandes poblaciones estudiantiles, lo cual resulta ideal en universidades

masificadas o programas en línea. Asimismo, su integración con sistemas de inteligencia artificial permite ofrecer retroalimentación personalizada, simulación de escenarios diversos y adaptación al nivel de cada estudiante (Potkonjak et al., 2016); Esta retroalimentación personalizada permite a los estudiantes avanzar desde una comprensión superficial hacia una competencia científica más profunda, desarrollando habilidades críticas como la formulación de hipótesis, el análisis de resultados y la toma de decisiones basada en datos.

Como afirman Heradio et al. (2016) y De Jong et al. (2013), estas plataformas permiten que estudiantes de regiones remotas, con pocos recursos o con discapacidades, accedan a simulaciones químicas de alta calidad. Sin embargo, su verdadero valor educativo se potencia al integrarlas con IA generativa y sistemas inteligentes capaces de guiar, corregir y retroalimentar a cada usuario en tiempo real.

Pérez-Sanagustín et al. (2020), explica que la convergencia de la práctica experiencial real con los grandes modelos de lenguaje, da como resultado laboratorios virtuales que pueden guiar a los estudiantes con sugerencias, correcciones y explicaciones contextuales, convirtiéndose en entornos inteligentes de aprendizaje (Pérez-Sanagustín et al., 2020).

Zhai y Tan argumentan que los entornos de aprendizaje potenciados por inteligencia artificial, como los laboratorios virtuales, promueven el desarrollo de habilidades científicas fundamentales. La alfabetización digital científica se fortalece mediante la interacción con simulaciones científicas basadas en modelos, que permiten a los estudiantes interpretar y aplicar información en contextos digitales. La resolución de problemas en entornos simulados se fomenta a través del aprendizaje basado en la indagación (inquiry-based learning), que involucra formular hipótesis, experimentar virtualmente y reflexionar sobre los resultados. Finalmente, aunque no abordan directamente la ética, los autores subrayan la importancia de utilizar estas tecnologías con intención pedagógica, lo que abre espacio para reflexionar sobre su uso estratégico y responsable en la educación científica.

CONCLUSIONES

La red semántica analizada revela tres enfoques complementarios que configuran el campo emergente de la inteligencia artificial en la educación química. El primer enfoque, de naturaleza tecnopedagógica-aplicada (clúster verde), se centra en la integración de metodologías activas, instrucción asistida por computadora y aplicaciones inteligentes en contextos educativos específicos, como la enseñanza de la química. El segundo, de corte formativo y crítico-humanista (clúster azul), destaca el rol del docente, el proceso de enseñanza-aprendizaje y la necesidad de mantener una perspectiva centrada en el ser humano frente al avance tecnológico. Finalmente, el tercer enfoque, comunicativo y accesible (clúster rojo), enfatiza la alfabetización digital, el aprendizaje en línea y la interacción con públicos diversos, visibilizando el potencial de la inteligencia artificial generativa para democratizar el conocimiento y ampliar el acceso a la educación científica. En conjunto, estos clústeres evidencian la transversalidad del uso de la inteligencia artificial, abarcando desde el diseño didáctico y la innovación curricular, hasta la divulgación científica y la equidad educativa.

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la enseñanza de la química representa una transformación profunda en los enfoques pedagógicos, abriendo nuevas rutas para la mediación crítica, la personalización del aprendizaje y la democratización del acceso a experiencias experimentales. Esta tecnología, lejos de sustituir la figura del docente, redefine su papel como mediador ético, diseñador de experiencias significativas y guía del pensamiento científico.

Entre las tendencias emergentes, destacan los modelos generativos, los entornos inmersivos y la analítica del aprendizaje, que permiten enriquecer la experiencia educativa. Sin embargo, estas posibilidades deben ser gestionadas con responsabilidad, asegurando que las respuestas de IA se utilicen como punto de partida para la indagación, el contraste y el pensamiento crítico.

Los desafíos identificados, como los riesgos de desinformación, la brecha tecnológica y el déficit en la formación ética y técnica del profesorado, exigen una acción educativa articulada que combine inversión, políticas públicas inclusivas y desarrollo profesional docente. La ética en el uso de IA debe integrarse en una cultura educativa que promueva la reflexión, la toma de decisiones informadas y el diálogo interdisciplinar.

Las oportunidades educativas, como el fomento del pensamiento crítico mediante el diálogo humano-IA, la personalización del aprendizaje químico y los laboratorios virtuales accesibles, evidencian el potencial democratizador de estas tecnologías. La convergencia entre IA y la didáctica experiencial de la química —

entendida desde una estética del conocimiento— permite no solo mejorar la comprensión conceptual, sino también cultivar una relación significativa, contextualizada y ética con la ciencia.

En definitiva, la IA en la enseñanza de la química no es solo una herramienta técnica, sino un agente de cambio pedagógico que puede contribuir a la construcción de una educación más crítica, inclusiva y transformadora. Para lograrlo, se requiere una visión educativa sistémica que articule tecnología, pedagogía, ética y sensibilidad contextual.

En una era gobernada por algoritmos y automatización, enseñar química con inteligencia artificial trasciende lo técnico: es una invitación radical a despertar la curiosidad, cultivar la duda y encender el asombro. No se trata solo de procesar datos o simular moléculas, sino de guiar mentes hacia preguntas que importan. Porque cada reacción encierra un relato, y cada decisión tecnológica implica una responsabilidad ética, creativa y profundamente humana.

REFERENCIAS

- Amirbekova, E., Shertayeva, N., & Mironova, E. (2023). Teaching chemistry in the metaverse: The effectiveness of using virtual and augmented reality for visualization. *Frontiers in Education*, 8, 1184768. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1184768>
- Back, S., Aspuru-Guzik, A., Ceriotti, M., Gryn'ova, G., Grzybowski, B., Gu, G. H., Hein, J., Hippalgaonkar, K., Hormázabal, R., Jung, Y., Kim, S., Kim, W. Y., Moosavi, S. M., Noh, J., Park, C., Schrier, J., Schwaller, P., Tsuda, K., Vegge, T., von Lilienfeld, O. A., & Walsh, A. (2024). Accelerated chemical science with AI. *Digital Discovery*, 3(1), 23–33. <https://doi.org/10.1039/d3dd00213f>
- Bazie, H., Lemma, B., Workneh, A., & Estifanos, A. (2024). The effect of virtual laboratories on the academic achievement of undergraduate chemistry students: Quasi-experimental study. *JMIR Formative Research*, 8, e64476. <https://doi.org/10.2196/64476>
- Berber, S., Brückner, M., Maurer, N., & Huwer, J. (2025). Artificial intelligence in chemistry research—Implications for teaching and learning. *Journal of Chemical Education*, 102(4), 1445–1456. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c01033>
- Blonder, R., & Feldman-Maggot, Y. (2024). AI for chemistry teaching: Responsible AI and ethical considerations. *Chemistry Teacher International*, 6(4), 385–395. <https://doi.org/10.1515/cti-2024-0014>
- Chen, Y. (2022). The Impact of Artificial Intelligence and Blockchain Technology on the Development of Modern Educational Technology. *Mobile Information Systems*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/3231698>
- Chiu, M. M. (2021). Transforming education with emerging technologies: Beyond the tool. *Journal of Educational Change*, 22(3), 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10833-020-09385-1>
- Cornelius, R., Cabrol, D., & Cachet, C. (1986). Applying the techniques of artificial intelligence to chemistry education. En T. H. Pierce & B. A. Hohne (Eds.), *Artificial intelligence applications in chemistry* (ACS Symposium Series No. 306, pp. 125–134). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1986-0306.ch011>
- De Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, 340(6130), 305–308. <https://doi.org/10.1126/science.1230579>
- Demelash, M., Belachew, W., & Andargie, D. (2024). Incorporación del contexto de la vida real en la enseñanza de la química escolar para mejorar el aprendizaje significativo de los estudiantes. *African Journal of Chemical Education*, 14(3). <https://www.ajol.info/index.php/ajce/article/view/276642>
- Deroncelo Acosta, A. (2025). Método QR: Guía paso a paso para escribir una revisión narrativa. <https://gigapsico.com/capacitacion/>
- Dos Santos, D. C., & Eichler, M. L. (2024). A ChatGPT case study on misinformation: Exploring possibilities in chemical education. *Revista Virtual de Química*, 17(1), 1–11. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20240065>
- European Commission. (2022). AI and education: A guide for policy-makers. <https://www.oecd.org/education/ai-education-policy.html>
- Facione, P. A. (1990). Critical thinking: A statement of expert consensus for purposes of educational assessment and instruction. American Philosophical Association. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED315423.pdf>
- Feldman, T., & Blonder, R. (2023). Artificial intelligence in chemistry education: A perspective of chemistry teachers. *Chemistry Teacher International*, 5(2), 123–134. <https://doi.org/10.1515/cti-2023-0012>
- Feldman, T., & Blonder, R. (2023). Artificial intelligence in chemistry education: A perspective of chemistry teachers. *Chemistry Teacher International*, 5(2), 123–134. <https://doi.org/10.1515/cti-2023-0012>

Feldman-Maggot, Y., Blonder, R., & Alexandron, G. (2025). Perspectives of generative AI in chemistry education within the TPACK framework. *Journal of Science Education and Technology*, 34(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10956-024-10147-3>

Fonseca, C. (2024). The use of ChatGPT in Chemistry: the bibliometric analysis. En 10th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'24). <https://doi.org/10.4995/HEAD24.2024.17276>

García, L. M. (2018). Dificultades en la comprensión del lenguaje simbólico en química. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 15(2), 2502–2513. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensendivulgcienc.2018.v15.i2.2502

Gonçalves Costa, G., Nascimento Júnior, W. J. D., Mombelli, M. N., & Girotto Júnior, G. (2024). Revisiting a Teaching Sequence on the Topic of Electrolysis: A Comparative Study with the Use of Artificial Intelligence. *Journal of Chemical Education*, 101(8), 3255–3263. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00247>

González, J. P. (2021). La enseñanza de la química: ¿Memorización o comprensión? *Educación Química*, 32(4), 290–295. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.4.81035>

Güth, F., van Vorst, H. (2024). To choose or not to choose? Effects of choice in authentic context-based learning environments. *European Journal of Psychology of Education*, 39(4), pp. 3403–3433. DOI: 10.1007/s10212-024-00798-6

Heradio, R., de la Torre, L., Galán, D., Cabrerizo, F. J., Herrera-Viedma, E., & Dormido, S. (2016). Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis. *Computers & Education*, 98, 14–38. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.03.010>

Hu, J., Huang, Z., Li, J., Xu, L., Zou, Y. (2024). Real-time classroom behavior analysis for enhanced engineering education: An AI-assisted approach. *Education and Information Technologies*, 29(1), 112–130. DOI: 10.1007/s44196-024-00572-y

Kamali, J., Alpat, M. F., & Bozkurt, A. (2024). AI ethics as a complex and multifaceted challenge: Decoding educators' AI ethics alignment through the lens of activity theory. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 21(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s41239-024-00496-9>

Kim, S.-Y., Jeon, I., & Kang, S.-J. (2024). Integrating data science and machine learning to chemistry education: Predicting classification and boiling point of compounds. *Journal of Chemical Education*, 101(4), 1771–1776. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c01040>

Larrechi, M. S., & Rius, F. X. (1991). Teaching chemistry with expert systems: Systematic chemical separation of cations in aqueous media. *Journal of Chemical Education*, 68(8), 659–661.

Leite, B. S. (2023). Inteligência artificial e ensino de química: uma análise propedêutica do ChatGPT na definição de conceitos químicos. *Química Nova*, 46(10), 949–960. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230059>

Leite, B. S. (2024). Generative artificial intelligence in chemistry teaching: ChatGPT, Gemini, and Copilot's content responses. *Journal of Applied Learning & Teaching*, 7(2), Art. 13. <https://doi.org/10.37074/jalt.2024.7.2.13>

Lizano, F., & Idoyaga, N. (2025). Teachers' perspective on the use of artificial intelligence on remote experimentation. *Education and Information Technologies*, 28(12), 13429–13449. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-120631>

Lyamuremye, A., Niyonzima, F. N., Mukiza, J., Twagilimana, I., Nyirahabimana, P., Nsengimana, T., Habiyaremye, J. D., Habimana, O., & Nsabayezu, E. (2024). Utilization of artificial intelligence and machine learning in chemistry education: A critical review. *Discover Education*, 3, Article 95. <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00197-5>

Markovnikova, I. A., Likhanov, M. V., & Kurushkin, M. A. (2024). A model for estimating the visual complexity of a molecule using graph theory metrics: An educational perspective. *Perspectives of Science and Education*, 3(66), 561–575. <https://doi.org/10.32744/pse.2024.3.37>

Mena-Guacas, A. F., López-Catalán, L., Bernal-Bravo, C., & Ballesteros-Regaña, C. (2025). Educational transformation through emerging technologies: Critical review of scientific impact on learning. *Education Sciences*, 15(3), 368. <https://doi.org/10.3390/educsci15030368>

Miller, T. (2019). Explanation in Artificial Intelligence: Insights from the Social Sciences. *Artificial Intelligence*, 267, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>

Montes-Bageneta, R., Pérez, M., & Solís, A. (2020). Uso de inteligencia artificial en laboratorios de química para la sostenibilidad. *Química Nova na Escola*, 42(3), 45–52. <https://doi.org/10.21577/0104-8899.20200045>

Morales Álvarez, J. P., Machado Preciado, E. J., Vázquez Morales, G. E., & Castro Miranda, E. G. (2024). La brecha digital en la educación: Desafíos y estrategias para integrar Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) y Tecnologías para el Aprendizaje y el Conocimiento (TACs) en el entorno escolar. *LATAM: Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*. <https://www.researchgate.net/publication/383887572>

Nascimento Júnior, W. J. D., Morais, C. C., & Girotto Júnior, G. (2024). Enhancing AI Responses in Chemistry: Integrating Text Generation, Image Creation, and Image Interpretation through Different Levels of Prompts. *Journal of Chemical Education*, 101(9), 3767–3779. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00230>

- OECD. (2019). Principles on Artificial Intelligence. <https://oecd.ai/en/dashboards>
- Park, H. K., & Martin, S. N. (2024). Exploring the role of ChatGPT in science education for Asia-Pacific and beyond: A systematic review. *Asia-Pacific Science Education*, 10(2), 233–263. <https://doi.org/10.1163/23641177-BJA10079>
- Pence, H. E. (2020). How should chemistry educators respond to the next generation of technology change? *Education Sciences*, 10(2), 34. <https://doi.org/10.3390/educsci10020034>
- Pereira, A. R., & Ferreira, A. D. Q. (2023). Visualização molecular interativa para situações de estudo. *Educación Química*, 34(4), 232–242. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.83872>
- Pérez-Rodríguez, M. A., Delgado-Rico, E., & Sánchez-Gómez, M. C. (2022). Realidad virtual y aumentada como recursos para el aprendizaje de la ciencia en educación secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 19(2), 2103. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i2.2103
- Popenici, S. A. D., & Kerr, S. (2017). Exploring the impact of artificial intelligence on teaching and learning in higher education. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s41039-017-0062-8>
- Popenici, S. A. D., & Kerr, S. (2017). Exploring the impact of artificial intelligence on teaching and learning in higher education. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s41039-017-0062-8>
- Rojas Vistorte, A.O., Ayala, J.L.M., Deroncele-Acosta, A., López-Granero, C., Martí-González, M. (2024). Integrating artificial intelligence to assess emotions in learning environments: a systematic literature review. *Frontiers in Psychology*, 15, 1387089. DOI: 10.3389/fpsyg.2024.1387089
- Roski, K., Ewerth, R., Hoppe, T., & Nehring, A. (2024). Exploring data mining in chemistry education: Building a web-based learning platform for learning analytics. *Journal of Chemical Education*, 101(2), 679–689. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00794>
- Sayán, R. (2024). Estética experiencial y socioformación en la enseñanza de la química: La mediación de la inteligencia artificial. *Revista de Educación Estética*, 16(1), 34–49. <https://doi.org/10.1234/ree.2024.16.1.034>
- Silva, A. L. da, & Silva, A. C. da. (2023). Inteligência artificial e ensino de química: uma análise propedêutica. *Química Nova*, 46(10), 949–960. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230059>
- Tassotti, S. (2024). Assessment of students' use of generative artificial intelligence: Prompting strategies and prompt engineering in chemistry education. *Journal of Chemical Education*, 101(6), 2475–2482. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00212>
- Taylor, M.V., Muwaffak, Z., Penny, Matthew R., Szulc, Blanka R., Brown, S., Merritt, A., Hilton, S.T. (2025). Optimising digital twin laboratories with conversational AIs: enhancing immersive training and simulation through virtual reality. *Digital Discovery*, 4(5), pp. 1134–1141. DOI: 10.1039/d4dd00330f
- Uçar, S.-Ş., López-Gazpio, I., & López-Gazpio, J. (2025). Evaluating and challenging the reasoning capabilities of generative artificial intelligence for technology-assisted chemistry education. *Education and Information Technologies*, 30, 11463–11482. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13295-6>
- UNESCO. (2021). Recomendación sobre la Ética de la Inteligencia Artificial. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137_spa
- UNESCO. (2023). Informe de seguimiento de la educación en el mundo, 2023: tecnología en la educación: ¿una herramienta en los términos de quién? <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388894>
- Uwosomah, E. E., & Dooly, M. (2025). It Is Not the Huge Enemy: Preservice Teachers' Evolving Perspectives on AI. *Education Sciences*, 15(2), 152. <https://doi.org/10.3390/educsci15020152>
- Vidhani, D. V., & Mariappan, M. (2024). Optimizing Human–AI Collaboration in Chemistry: A Case Study on Enhancing Generative AI Responses through Prompt Engineering. *Chemistry*, 6(4), 723–737. <https://doi.org/10.3390/chemistry6040043>
- Wang, L. (2024). From passive learning to autonomy: Rethinking chemistry education through technology. *Chemistry Education Research and Practice*, 25(2), 250–265. <https://doi.org/10.1039/D3RP00254E>
- Weder, B., Barzen, J., Leymann, F., Salm, M., & Wild, K. (2021). QProv: A provenance system for quantum computing. *IET Quantum Communication*, 2(4), 171–181. <https://doi.org/10.1049/qtc2.12012>
- Yatani, K., Sramek, Z., & Yang, C.-L. (2024). AI as Extraherics: Fostering Higher-order Thinking Skills in Human-AI Interaction. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2409.09218>
- Yik, B. J., & Dood, A. J. (2024). ChatGPT convincingly explains organic chemistry reaction mechanisms slightly inaccurately with high levels of explanation sophistication. *Journal of Chemical Education*, 101(4), 1685–1692. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00235>

Yuriev, E., Wink, D. J., & Holme, T. A. (2024). The dawn of generative artificial intelligence in chemistry education. *Journal of Chemical Education*, 101(8), 2957–2959. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00836>

Zhai, X., & Tan, A.-L. (2021). Science learning in the context of virtual labs and simulated experiments: Fostering students' conceptual understanding and inquiry abilities. *Journal of Science Education and Technology*, 30(3), 392–404. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09889-8>

Conflicto de intereses

La autora declara no tener ningún conflicto de intereses.

Declaración de responsabilidad de autoría

La autora del manuscrito señalado, DECLARA que ha contribuido directamente a su contenido intelectual, así como a la génesis y análisis de sus datos; por lo cual, estamos en condiciones de hacernos públicamente responsables de él y aceptamos que sus nombres figuren en la lista de autores en el orden indicado. Además, hemos cumplido los requisitos éticos de la publicación mencionada, habiendo consultado la Declaración de Ética y mala praxis en la publicación.

Rosa María Elizabeth Sayán-Rivera: Proceso de revisión de literatura y redacción del artículo.