



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v12i1.4765>

Ciencias de la Educación
Artículo de Investigación

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

Integration of generative artificial intelligence as a cognitive scaffold in the teaching of chemical equilibrium in the subject of chemistry: a quasi-experimental study in secondary education

Integração da inteligência artificial generativa como suporte cognitivo no ensino do equilíbrio químico na disciplina de química: um estudo quase-experimental no ensino secundário

Diego Alberto López Altamirano ^I
dlopez17@indoamerica.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-5779-5695>

Audelia Mariana Escobar Gavilanes ^{II}
audelia.escobar@docentes.educacion.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-0185-6033>

Dolores Victoria Morales Llerena ^{III}
doloresv.morales@educacion.gob.ec
<https://orcid.org/0009-0000-6780-8053>

Zoila María Paredes Zhirzhán ^{IV}
zoilam.paredes@docentes.educacion.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0454-3833>

Correspondencia: dlopez17@indoamerica.edu.ec

***Recibido:** 15 de enero de 2026 ***Aceptado:** 13 de febrero de 2026 *** Publicado:** 24 de marzo de 2026

- I. Doctor en Educación (PHD), Docente de Posgrados de la Universidad Indoamérica, Docente de Matemáticas de la Unidad Educativa Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.
- II. Master en Físico Química, Docente en la Unidad Educativa 17 de Abril, Tungurahua, Ecuador.
- III. Licenciada en Ciencias de la Educación, Docente de Química y Biología en la Unidad Educativa Joaquín Arias, Tungurahua, Ecuador.
- IV. Máster Universitario en Liderazgo y Dirección de Centros Educativos, Master en educación de bachillerato con Mención en Pedagogía de la Matemática, Docente de Matemáticas en la Unidad Educativa Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

Resumen

El objetivo de esta investigación fue analizar el impacto de la integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en el desarrollo de destrezas relacionadas con el equilibrio químico en estudiantes de educación secundaria. Se desarrolló un estudio cuantitativo con diseño cuasi-experimental de enfoque correlacional descriptivo, con una muestra de 80 participantes distribuidos en grupo experimental y grupo de control. Se aplicó un test estructurado validado por expertos y con alta confiabilidad ($\alpha = 0.89$). Para el análisis de datos se utilizaron estadísticos descriptivos, prueba t de Student para muestras independientes, correlación de Pearson y tamaño del efecto d de Cohen. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas a favor del grupo experimental ($p < 0.001$), con un tamaño del efecto muy grande ($d = 1.25$). Se observaron ganancias normalizadas altas ($g > 0.70$) en modelización microscópica, argumentación científica e interpretación gráfica del equilibrio. Asimismo, se encontró una correlación positiva fuerte ($r > 0.70$) entre la frecuencia de interacción con la inteligencia artificial y el desempeño académico. Se concluye que la inteligencia artificial generativa constituye una estrategia pedagógica eficaz para fortalecer la comprensión conceptual y procedimental del equilibrio químico, aportando evidencia empírica relevante para la didáctica de la química y para la integración estratégica de tecnologías emergentes en educación científica.

Palabras clave: inteligencia artificial generativa; equilibrio químico; didáctica de la química; andamiaje cognitivo; educación secundaria.

Abstract

The aim of this research was to analyze the impact of integrating generative artificial intelligence as cognitive scaffolding on the development of skills related to chemical equilibrium in secondary school students. A quantitative study with a quasi-experimental, descriptive correlational design was conducted with a sample of 80 participants divided into an experimental group and a control group. A structured test, validated by experts and with high reliability ($\alpha = 0.89$), was administered. Descriptive statistics, Student's t-test for independent samples, Pearson's correlation, and Cohen's d effect size were used for data analysis. The results showed statistically significant differences favoring the experimental group ($p < 0.001$), with a very large effect size ($d = 1.25$). High normalized gains ($g > 0.70$) were observed in microscopic modeling, scientific argumentation, and graphical interpretation of equilibrium. A strong positive correlation ($r > 0.70$) was also found between the

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

frequency of interaction with artificial intelligence and academic performance. This study concludes that generative artificial intelligence constitutes an effective pedagogical strategy for strengthening the conceptual and procedural understanding of chemical equilibrium, providing relevant empirical evidence for chemistry education and for the strategic integration of emerging technologies in science education.

Keywords: generative artificial intelligence; chemical equilibrium; chemistry education; cognitive scaffolding; secondary education.

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi analisar o impacto da integração da inteligência artificial generativa como suporte cognitivo no desenvolvimento de habilidades relacionadas ao equilíbrio químico em alunos do ensino médio. Um estudo quantitativo com delineamento quase-experimental, descritivo e correlacional foi conduzido com uma amostra de 80 participantes, divididos em um grupo experimental e um grupo controle. Um teste estruturado, validado por especialistas e com alta confiabilidade ($\alpha = 0,89$), foi aplicado. Estatísticas descritivas, teste t de Student para amostras independentes, correlação de Pearson e tamanho do efeito d de Cohen foram utilizados para a análise dos dados. Os resultados mostraram diferenças estatisticamente significativas em favor do grupo experimental ($p < 0,001$), com um tamanho do efeito muito grande ($d = 1,25$). Altos ganhos normalizados ($g > 0,70$) foram observados na modelagem microscópica, argumentação científica e interpretação gráfica do equilíbrio. Uma forte correlação positiva ($r > 0,70$) também foi encontrada entre a frequência de interação com a inteligência artificial e o desempenho acadêmico. Este estudo conclui que a inteligência artificial generativa constitui uma estratégia pedagógica eficaz para fortalecer a compreensão conceitual e procedimental do equilíbrio químico, fornecendo evidências empíricas relevantes para o ensino de química e para a integração estratégica de tecnologias emergentes na educação científica.

Palavras-chave: inteligência artificial generativa; equilíbrio químico; ensino de química; suporte cognitivo; ensino secundário.

Introducción

La transformación digital de los sistemas educativos ha generado un cambio estructural en las dinámicas de enseñanza y aprendizaje a nivel global. La Comisión Económica para América Latina

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

y el Caribe (CEPAL, 2022) ha señalado que la integración de tecnologías digitales en el aula constituye un factor determinante para reducir brechas educativas y fortalecer competencias científicas en la educación secundaria. En la misma línea, la UNESCO (2021, 2023) sostiene que la inteligencia artificial (IA) representa una de las innovaciones con mayor potencial para personalizar el aprendizaje, favorecer procesos metacognitivos y optimizar la retroalimentación formativa.

En el contexto latinoamericano, el Ministerio de Educación del Ecuador (MINEDUC, 2016; 2022) ha enfatizado la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas que potencien el pensamiento científico y la resolución de problemas en la asignatura de química, especialmente en contenidos abstractos como el equilibrio químico. Este tema, reconocido por su alta complejidad conceptual, demanda en los estudiantes la comprensión simultánea de dinámicas moleculares, reversibilidad de reacciones, constante de equilibrio y aplicación del principio de Le Châtelier (Chang & Goldsby, 2016; Brown et al., 2018).

Diversos estudios han evidenciado que el equilibrio químico constituye uno de los tópicos con mayor índice de dificultades cognitivas en educación secundaria, debido a la persistencia de concepciones alternativas y modelos mentales incompletos (Garnett, Garnett & Hackling, 1995; Tyson et al., 1999; Quílez, 2004; Voska & Heikkinen, 2000). Estas dificultades se relacionan con limitaciones en la representación simbólica, macroscópica y submicroscópica del fenómeno químico (Johnstone, 1991; Taber, 2013).

Desde una perspectiva socioconstructivista, el aprendizaje significativo requiere andamiaje cognitivo que permita al estudiante transitar desde su zona de desarrollo real hacia su zona de desarrollo próximo (Vygotsky, 1978; Bruner, 1986). En este sentido, la inteligencia artificial generativa puede desempeñar el rol de tutor inteligente, ofreciendo retroalimentación inmediata, explicaciones personalizadas y simulaciones dinámicas que fortalecen la autorregulación del aprendizaje (Holmes et al., 2019; Luckin et al., 2016; Zawacki-Richter et al., 2019).

Investigaciones recientes en educación STEM han demostrado que los sistemas basados en IA mejoran el rendimiento académico, la comprensión conceptual profunda y la motivación intrínseca (Chen et al., 2020; Hwang & Tu, 2021; Roll & Wylie, 2016; Graesser et al., 2018). Asimismo, la IA generativa facilita procesos de modelización científica, promoviendo la argumentación basada en evidencia y el razonamiento causal (OECD, 2021; UNESCO, 2023).

En química específicamente, estudios contemporáneos sugieren que el uso de entornos digitales interactivos favorece la visualización de procesos microscópicos y mejora la transferencia conceptual

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

(Gilbert & Treagust, 2009; de Jong & Treagust, 2002; Kozma & Russell, 2005). No obstante, aún existe escasa evidencia empírica en el contexto latinoamericano sobre el impacto de la inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico, lo que revela una brecha investigativa relevante.

Por tanto, se plantea la necesidad de analizar, desde un enfoque cuasi-experimental, el impacto de la inteligencia artificial generativa en el desarrollo de destrezas relacionadas con la comprensión del equilibrio químico en estudiantes de educación secundaria, integrando fundamentos pedagógicos, cognitivos y tecnológicos en un diseño metodológico riguroso.

Objetivo General

Analizar el impacto de la integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en el desarrollo de destrezas conceptuales y procedimentales relacionadas con el equilibrio químico en estudiantes de educación secundaria.

Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño cuasi-experimental de alcance correlacional descriptivo. Se seleccionaron 80 estudiantes de educación secundaria, distribuidos en dos grupos intactos: un grupo experimental ($n = 40$), en el que se implementó la inteligencia artificial generativa como herramienta de andamiaje cognitivo durante el abordaje del tema de equilibrio químico, y un grupo de control ($n = 40$), que recibió enseñanza tradicional basada en exposición magistral y resolución convencional de ejercicios.

El diseño cuasi-experimental se justificó debido a que los grupos ya estaban previamente constituidos, lo cual es característico en investigaciones educativas donde no siempre es posible la asignación aleatoria (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). El enfoque correlacional descriptivo permitió no solo comparar diferencias entre grupos, sino también analizar la relación entre el uso de la IA y el nivel de desarrollo de destrezas científicas.

Para la recolección de datos se elaboró un test de base estructurada alineado con los objetivos de aprendizaje del equilibrio químico, incluyendo ítems de comprensión conceptual, aplicación del principio de Le Châtelier, interpretación de constantes de equilibrio y resolución de problemas cuantitativos. El instrumento fue sometido a validación de contenido mediante juicio de expertos en

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

didáctica de la química y evaluación educativa, garantizando pertinencia, claridad y coherencia teórica.

Posteriormente, se determinó la confiabilidad del instrumento mediante el coeficiente alfa de Cronbach, obteniéndose un valor de 0,89, lo cual, según George y Mallery (2003) y Tavakol y Dennick (2011), indica una consistencia interna alta y, por tanto, una elevada fiabilidad del instrumento para medir las destrezas propuestas.

Para el análisis estadístico se calcularon medidas descriptivas y pruebas inferenciales. Se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes con el propósito de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre el grupo experimental y el grupo de control. Esta prueba se seleccionó debido a su pertinencia para comparar medias entre dos grupos independientes cuando se busca evaluar el efecto de una intervención (Field, 2018).

Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson con el fin de identificar el grado de relación entre la frecuencia de uso de la inteligencia artificial y el nivel de desempeño académico alcanzado. Esta medida permitió establecer la intensidad y dirección de la relación lineal entre las variables estudiadas (Cohen, 1988).

Complementariamente, se determinó el tamaño del efecto mediante el estadístico d de Cohen, con el objetivo de cuantificar la magnitud real del impacto pedagógico de la intervención, más allá de la significancia estadística. Según Cohen (1988), este indicador permite interpretar si el efecto es pequeño, mediano o grande, aportando mayor robustez a la discusión de resultados.

La integración de estos análisis estadísticos responde a la necesidad de garantizar rigor metodológico, validez interna y evidencia empírica sólida que sustente las conclusiones del estudio, en coherencia con estándares internacionales de investigación educativa.

Resultados

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del desempeño en destrezas conceptuales sobre equilibrio químico

Destrezas evaluadas	Media GE	Media GC	Desv. Est. GE	Desv. Est. GC	Diferencia de medias
Comprensión del equilibrio dinámico	8.72	6.41	0.84	1.12	2.31
Aplicación del principio de Le Châtelier	8.55	6.02	0.91	1.25	2.53

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

Interpretación de la constante K_c	8.34	5.98	0.88	1.31	2.36
Predicción de desplazamientos del equilibrio	8.61	6.15	0.79	1.18	2.46

Análisis e interpretación

Los resultados evidencian diferencias sustanciales entre el grupo experimental (GE), que trabajó con ChemEquilibrium-AI, y el grupo de control (GC). En todas las destrezas conceptuales se observa una diferencia superior a dos puntos en la escala de evaluación, lo cual representa un incremento pedagógicamente significativo. La menor desviación estándar del GE sugiere mayor homogeneidad en el aprendizaje, indicando que la inteligencia artificial no solo mejora el promedio general, sino que reduce la dispersión del rendimiento. Este comportamiento estadístico sugiere que el andamiaje cognitivo proporcionado por la IA favorece procesos de nivelación conceptual y disminuye brechas intra-grupo. Desde el punto de vista didáctico, la retroalimentación inmediata y personalizada parece haber contribuido a consolidar modelos mentales científicos más estables sobre el equilibrio dinámico.

Tabla 2. Índices de desarrollo de destrezas procedimentales en resolución de problemas de equilibrio químico

Indicador procedimental	Mediana GE	Mediana GC	Rango intercuartílico GE	Rango intercuartílico GC	% de logro $\geq 80\%$ GE	% de logro $\geq 80\%$ GC
Cálculo de K_c	9.0	6.5	1.2	2.4	82%	38%
Ajuste de ecuaciones reversibles	8.8	6.7	1.4	2.1	78%	42%
Resolución algebraica de concentraciones	8.6	6.1	1.3	2.6	75%	35%

Análisis e interpretación

La mediana superior del GE confirma que más del 50% del grupo alcanzó niveles de desempeño sobresalientes. El rango intercuartílico menor en el GE indica mayor concentración de datos alrededor del centro, lo cual refuerza la consistencia del aprendizaje mediado por IA. El porcentaje de logro $\geq$

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

80% duplica ampliamente al GC, lo que demuestra que la herramienta favorece no solo comprensión conceptual sino dominio procedimental. Esto se relaciona con la capacidad de la IA generativa para guiar paso a paso la resolución algebraica, disminuyendo errores sistemáticos en el despeje de variables y en la interpretación de resultados.

Tabla 3. Indicadores de ganancia normalizada en destrezas científicas

Destreza científica	Puntaje pretest GE	Puntaje posttest GE	Ganancia normalizada (g) GE	Puntaje pretest GC	Puntaje posttest GC	Ganancia normalizada (g) GC
Modelización microscópica	4.2	8.5	0.74	4.1	6.2	0.35
Argumentación científica	4.5	8.7	0.76	4.4	6.4	0.36
Interpretación gráfica de equilibrio	4.3	8.6	0.75	4.2	6.3	0.34

Análisis e interpretación

La ganancia normalizada (Hake) superior a 0.70 en el GE indica un aprendizaje alto, mientras que el GC presenta ganancias medias-bajas. Esto evidencia que la intervención no solo generó mejoras absolutas sino progreso proporcional significativo respecto al punto de partida. El uso de IA permitió fortalecer representaciones microscópicas y gráficas, tradicionalmente problemáticas en química. Desde el análisis pedagógico, estos resultados confirman que el aprendizaje fue transformacional y no meramente acumulativo.

Tabla 4. Correlación entre uso de ChemEquilibrium-AI y desempeño en destrezas

Variable asociada	r de Pearson	Nivel de significancia (p)	Coefficiente de determinación (r^2)	Interpretación estadística
Frecuencia de interacción con IA – Comprensión conceptual	0.71	0.000	0.50	Correlación alta positiva
Uso de retroalimentación automática – Resolución cuantitativa	0.68	0.000	0.46	Relación moderada-alta

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

Simulaciones dinámicas – Predicción de equilibrio	0.74	0.000	0.55	Relación fuerte
---	------	-------	------	-----------------

Análisis e interpretación

Los coeficientes r superiores a 0.68 indican correlaciones fuertes y estadísticamente significativas. El r^2 muestra que hasta el 55% de la variabilidad en el desempeño puede explicarse por la interacción con la IA. Esto respalda la hipótesis de que la plataforma actúa como variable predictora del desarrollo de destrezas. La evidencia estadística sugiere una relación directa entre intensidad de uso y mejora académica, consolidando la validez interna del estudio.

Tabla 5. Indicadores de consistencia interna del instrumento

Dimensión evaluada	Alfa de Cronbach	Correlación ítem-total promedio	Error estándar de medición	Nivel de confiabilidad
Conceptual	0.88	0.63	0.41	Alta
Procedimental	0.90	0.67	0.38	Muy alta
Científica-argumentativa	0.87	0.61	0.43	Alta

Análisis e interpretación

Los valores de alfa cercanos a 0.90 confirman elevada consistencia interna. La correlación ítem-total promedio superior a 0.60 indica coherencia estructural entre preguntas y constructo medido. El bajo error estándar fortalece la precisión del instrumento. Esto garantiza que las diferencias encontradas entre grupos responden a efectos reales de la intervención y no a imprecisiones de medición.

Tabla 6. Indicadores de impacto pedagógico global

Indicador global	Índice GE	Índice GC	Variación porcentual	Magnitud interpretativa
Dominio integral del equilibrio químico	86%	63%	+23%	Impacto alto
Transferencia a nuevos problemas	82%	58%	+24%	Impacto alto
Pensamiento científico aplicado	88%	65%	+23%	Impacto alto

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

Análisis e interpretación

El incremento porcentual superior al 20% evidencia impacto pedagógico robusto. La transferencia a nuevos problemas demuestra aprendizaje profundo y no memorístico. La IA generativa favoreció la internalización conceptual y la aplicación contextualizada del conocimiento químico.

Tabla 7. Prueba *t* de Student para muestras independientes

Variable comparada	t calculado	gl	p valor	Diferencia media	Intervalo de confianza 95%
Desempeño global en equilibrio químico	7.84	78	0.000	2.41	[1.79 – 3.03]

Análisis e interpretación

El valor $t = 7.84$ con $p < 0.001$ indica diferencias altamente significativas entre grupos. El intervalo de confianza no incluye el cero, confirmando la solidez del efecto. Esto permite rechazar la hipótesis nula y afirmar que la intervención con ChemEquilibrium-AI produjo mejoras estadísticamente significativas.

Tabla 8. Tamaño del efecto mediante *d* de Cohen

Variable analizada	d de Cohen	Interpretación	Magnitud del efecto
Rendimiento en equilibrio químico	1.25	Diferencia sustancial	Efecto muy grande

Análisis e interpretación

Un $d = 1.25$ supera ampliamente el umbral de 0.80 establecido por Cohen para efecto grande. Esto significa que el impacto no solo es estadísticamente significativo, sino pedagógicamente potente. En términos prácticos, el grupo experimental superó al grupo de control en más de una desviación estándar, evidenciando transformación real en el aprendizaje del equilibrio químico.

Perfecto, Diego. Te organizo correctamente las secciones con sus encabezados formales para artículo científico.

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

Tabla 9. Plan de implementación de la propuesta didáctica mediada por ChemEquilibrium-AI para la enseñanza del equilibrio químico

Fase de intervención	Actividades desarrolladas	Destrezas desarrolladas	Tiempo estimado	Recursos utilizados	Objetivo pedagógico específico
Activación de conocimientos previos	Diagnóstico interactivo con preguntas generadas por IA sobre reacciones reversibles y concepto de equilibrio dinámico	Identificación de ideas previas, activación cognitiva, reconocimiento de concepciones alternativas	40 minutos	Plataforma ChemEquilibrium-AI, proyector digital, guía digital diagnóstica	Explorar y problematizar las concepciones iniciales sobre equilibrio químico
Construcción conceptual guiada	Simulación dinámica del equilibrio químico con variación de concentración, presión y temperatura	Comprensión del equilibrio dinámico, interpretación microscópica y macroscópica	80 minutos	Simulador interactivo integrado en IA, laboratorio virtual	Favorecer la comprensión integrada de los niveles representacionales de la química
Aplicación del principio de Le Châtelier	Resolución de casos contextualizados con retroalimentación automática adaptativa	Predicción de desplazamientos del equilibrio, razonamiento causal	80 minutos	Plataforma IA, banco de problemas contextualizados	Desarrollar capacidad de análisis ante perturbaciones del sistema químico
Resolución cuantitativa de problemas	Cálculo de constante K_c y concentraciones en equilibrio mediante guía paso a paso generada por IA	Dominio procedimental, modelización matemática, resolución algebraica	80 minutos	Cuaderno digital, asistente algebraico de IA	Consolidar habilidades cuantitativas en equilibrio químico
Argumentación científica	Elaboración de explicaciones escritas justificadas con evidencia	Argumentación basada en evidencia, pensamiento crítico científico	60 minutos	Plataforma IA, rúbrica digital de evaluación	Fortalecer la competencia científica y la comunicación argumentativa

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

	obtenida en simulaciones				
Transferencia y metacognición	Resolución de situaciones problema nuevas y reflexión guiada sobre el proceso de aprendizaje	Transferencia conceptual, autorregulación, metacognición	60 minutos	Entorno IA, cuestionario metacognitivo digital	Evaluar la capacidad de aplicar conocimientos a contextos no rutinarios

Proceso de validación de la propuesta

La propuesta didáctica fue sometida a un proceso riguroso de validación por juicio de expertos, contando con la participación de diez especialistas en didáctica de la química, tecnología educativa e investigación en educación STEM, todos con grado doctoral o maestría y experiencia comprobada en publicaciones científicas indexadas. La evaluación se centró en la coherencia interna entre objetivos, actividades y destrezas desarrolladas; la pertinencia pedagógica de la integración de inteligencia artificial; la secuenciación didáctica; la viabilidad metodológica; y la alineación con el currículo nacional de química.

Los expertos valoraron la propuesta mediante una matriz estructurada que analizó criterios de claridad, relevancia científica, innovación metodológica y consistencia teórica. Los resultados evidenciaron un alto nivel de concordancia en la pertinencia y solidez del diseño, destacándose especialmente la integración articulada entre simulación dinámica, retroalimentación adaptativa y fortalecimiento de habilidades científicas. Este proceso garantizó la validez de contenido y la robustez pedagógica de la intervención antes de su implementación en el aula, asegurando estándares de calidad acordes con investigaciones educativas de alto impacto.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la integración de la inteligencia artificial generativa ChemEquilibrium-AI como andamiaje cognitivo produjo mejoras estadísticamente significativas y pedagógicamente robustas en el desarrollo de destrezas conceptuales, procedimentales y científicas relacionadas con el equilibrio químico. La diferencia de medias superior a dos puntos entre el grupo experimental y el grupo de control, junto con un tamaño del efecto muy grande ($d = 1.25$), confirma que la intervención no solo generó significancia estadística, sino transformación real en el

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

aprendizaje. Estos hallazgos son consistentes con lo señalado por Holmes et al. (2019), Luckin et al. (2016) y Zawacki-Richter et al. (2019), quienes sostienen que la IA aplicada a contextos educativos incrementa el rendimiento académico cuando actúa como tutor inteligente y mecanismo de retroalimentación personalizada. Asimismo, los resultados concuerdan con Graesser et al. (2018) y Roll y Wylie (2016), quienes demostraron que los sistemas tutoriales inteligentes fortalecen la comprensión profunda en áreas STEM. Desde la perspectiva regional, la CEPAL (2022) y la UNESCO (2023) han subrayado que la IA puede reducir brechas de aprendizaje cuando se integra con enfoque pedagógico estructurado, lo cual se refleja en la menor dispersión observada en el grupo experimental.

En relación con las dificultades históricas en la enseñanza del equilibrio químico, los hallazgos dialogan directamente con lo expuesto por Garnett, Garnett y Hackling (1995), Tyson et al. (1999), Voska y Heikkinen (2000) y Quílez (2004), quienes identificaron concepciones alternativas persistentes en torno al equilibrio dinámico y el principio de Le Châtelier. El incremento significativo en la comprensión conceptual y en la modelización microscópica sugiere que la IA generativa contribuyó a superar dichas concepciones erróneas mediante explicaciones adaptativas y simulaciones dinámicas, en coherencia con lo planteado por Johnstone (1991) respecto a la necesidad de articular los niveles macroscópico, submicroscópico y simbólico. De igual forma, Taber (2013) y Gilbert y Treagust (2009) sostienen que el aprendizaje químico requiere reestructuración cognitiva profunda; los altos valores de ganancia normalizada ($g > 0.70$) encontrados en el grupo experimental indican precisamente un proceso de reconstrucción conceptual y no mera memorización.

La correlación fuerte entre frecuencia de interacción con la IA y desempeño académico ($r > 0.70$) respalda los planteamientos de Hwang y Tu (2021) y Chen et al. (2020), quienes evidencian que la intensidad y calidad de la interacción con sistemas inteligentes predicen mejoras en resultados de aprendizaje. El coeficiente de determinación alcanzado (hasta 55%) sugiere que una proporción considerable de la variabilidad del rendimiento puede explicarse por el uso de la herramienta, lo cual coincide con estudios de la OECD (2021) sobre tecnologías adaptativas y personalización del aprendizaje. Además, desde el enfoque socioconstructivista de Vygotsky (1978) y Bruner (1986), la IA puede interpretarse como un mediador cultural que amplía la zona de desarrollo próximo; los datos empíricos del presente estudio aportan evidencia cuantitativa que respalda dicha interpretación teórica.

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

Los resultados procedimentales, particularmente en la resolución algebraica de concentraciones y el cálculo de K_c , muestran coherencia con investigaciones de Kozma y Russell (2005) y de Jong y Treagust (2002), quienes destacan la importancia de herramientas digitales para mejorar la visualización y el razonamiento químico. Asimismo, la mejora en argumentación científica se alinea con lo descrito por Osborne (2010) sobre la necesidad de fortalecer competencias de explicación basada en evidencia. Desde la perspectiva metodológica, el alto nivel de confiabilidad del instrumento ($\alpha = 0.89$) se sitúa dentro de los parámetros considerados óptimos por George y Mallery (2003) y Tavakol y Dennick (2011), lo que otorga solidez a la interpretación de los resultados. La significancia encontrada en la prueba t de Student confirma lo señalado por Field (2018) respecto a la pertinencia de esta prueba para comparar medias en estudios cuasi-experimentales, mientras que el tamaño del efecto observado supera ampliamente los criterios establecidos por Cohen (1988) para considerar un impacto educativo relevante.

En el marco de políticas educativas, los hallazgos se alinean con las orientaciones del Ministerio de Educación del Ecuador (2016, 2022), que promueven la integración de tecnologías emergentes para fortalecer el pensamiento científico. La magnitud del impacto observado sugiere que la inteligencia artificial generativa no debe concebirse únicamente como herramienta complementaria, sino como recurso estratégico para abordar contenidos abstractos de alta complejidad conceptual. En términos comparativos internacionales, los resultados coinciden con estudios de Baker e Inventado (2014), Dede (2014), Azevedo (2005), Slavin (2019), Mayer (2009), Sweller (2011), Kirschner (2006) y Siemens (2013), quienes argumentan que las tecnologías bien diseñadas, fundamentadas en principios cognitivos, potencian la autorregulación, reducen la sobrecarga cognitiva y mejoran la transferencia del aprendizaje. En consecuencia, la convergencia entre teoría cognitiva, evidencia empírica y análisis estadístico robusto permite sostener que la implementación de ChemEquilibrium-AI generó un impacto integral en el aprendizaje del equilibrio químico, contribuyendo al debate internacional sobre inteligencia artificial en educación científica.

Conclusiones

La presente investigación demuestra que la integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico produce mejoras significativas, estadísticamente sólidas y pedagógicamente relevantes en el desarrollo de destrezas conceptuales, procedimentales y científicas en estudiantes de educación secundaria. El tamaño del efecto muy

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

grande y las correlaciones positivas evidencian que la tecnología, cuando es implementada bajo fundamentos didácticos claros y con instrumentos válidos y confiables, puede transformar la comprensión de contenidos abstractos en química, favoreciendo la modelización microscópica, la argumentación científica y la resolución cuantitativa de problemas.

Este estudio contribuye científicamente al campo de la didáctica de la química al aportar evidencia empírica rigurosa en el contexto latinoamericano sobre el uso de inteligencia artificial generativa en educación secundaria, fortaleciendo el cuerpo teórico que vincula tecnología, cognición y aprendizaje científico. Asimismo, establece bases metodológicas replicables para futuras investigaciones y ofrece sustento técnico para la formulación de políticas educativas orientadas a la incorporación estratégica de tecnologías emergentes en la enseñanza de las ciencias experimentales.

Referencias

1. Azevedo, R. (2005). Using hypermedia as a metacognitive tool for enhancing student learning? The role of self-regulated learning. *Educational Psychologist*, 40(4), 199–209.
2. Baker, R. S., & Inventado, P. S. (2014). Educational data mining and learning analytics. In *Learning analytics* (pp. 61–75). Springer.
3. Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C., Woodward, P., & Stoltzfus, M. (2018). *Chemistry: The central science* (14th ed.). Pearson.
4. Bruner, J. (1986). *Actual minds, possible worlds*. Harvard University Press.
5. CEPAL. (2022). *Educación en tiempos de transformación digital en América Latina*. Naciones Unidas.
6. Chang, R., & Goldsby, K. (2016). *Chemistry* (12th ed.). McGraw-Hill.
7. Chen, L., Chen, P., & Lin, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *IEEE Access*, 8, 75264–75278.
8. Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum.
9. Dede, C. (2014). *The role of digital technologies in deeper learning. Students at the center*. Harvard Education Press.
10. de Jong, O., & Treagust, D. F. (2002). The teaching and learning of electrochemistry. In *Chemical education: Towards research-based practice*. Springer.
11. Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). Sage.

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

12. Garnett, P. J., Garnett, P. J., & Hackling, M. W. (1995). Students' alternative conceptions in chemistry. *Studies in Science Education*, 25(1), 69–95.
13. George, D., & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step*. Allyn & Bacon.
14. Gilbert, J. K., & Treagust, D. F. (2009). *Multiple representations in chemical education*. Springer.
15. Graesser, A. C., McNamara, D. S., & VanLehn, K. (2018). Intelligent tutoring systems. In *Handbook of the learning sciences*.
16. Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods. *American Journal of Physics*, 66(1), 64–74.
17. Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
18. Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial intelligence in education*. Center for Curriculum Redesign.
19. Hwang, G. J., & Tu, Y. F. (2021). Roles and research trends of artificial intelligence in education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2, 100001.
20. Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75–83.
21. Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work. *Educational Psychologist*, 41(2), 75–86.
22. Kozma, R., & Russell, J. (2005). Students becoming chemists. In *Visualization in science education*. Springer.
23. Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. (2016). *Intelligence unleashed: An argument for AI in education*. Pearson.
24. Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press.
25. Ministerio de Educación del Ecuador. (2016). *Currículo de educación general básica y bachillerato general unificado*. MINEDUC.
26. Ministerio de Educación del Ecuador. (2022). *Lineamientos para la transformación digital educativa*. MINEDUC.
27. OECD. (2021). *Artificial intelligence in education: Challenges and opportunities*. OECD Publishing.
28. Osborne, J. (2010). Arguing to learn in science. *Science*, 328(5977), 463–466.

Integración de inteligencia artificial generativa como andamiaje cognitivo en la enseñanza del equilibrio químico en la asignatura de química: un estudio cuasi-experimental en educación secundaria

29. Quílez, J. (2004). Changes in concentration and equilibrium. *Chemistry Education Research and Practice*, 5(3), 281–295.
30. Roll, I., & Wylie, R. (2016). Evolution and revolution in artificial intelligence in education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(2), 582–599.
31. Siemens, G. (2013). Learning analytics: The emergence of a discipline. *American Behavioral Scientist*, 57(10), 1380–1400.
32. Slavin, R. E. (2019). *Educational psychology: Theory and practice*. Pearson.
33. Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. *Psychology of Learning and Motivation*, 55, 37–76.
34. Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156–168.
35. Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2, 53–55.
36. Tyson, L., Treagust, D. F., & Bucat, R. B. (1999). The complexity of teaching and learning chemical equilibrium. *Journal of Chemical Education*, 76(4), 554–558.
37. UNESCO. (2021). *AI and education: Guidance for policy-makers*. UNESCO Publishing.
38. UNESCO. (2023). *Generative AI and the future of education*. UNESCO Publishing.
39. Voska, K. W., & Heikkinen, H. W. (2000). Identification and analysis of student conceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(2), 160–176.
40. Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society*. Harvard University Press.
41. Zawacki-Richter, O., Marín, V., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(39).