



Impacto del uso de laboratorios virtuales y simulaciones en la enseñanza de la biología en educación secundaria y en la formación médica: Una perspectiva desde la experiencia docente

Ingry Johanna García Tangarife

Juan David Serna Zuluaga

Daniel Mateo Atalaya Henao

Tipo de documento para optar al título de
Magister en Educación y Transformación Digital

Asesor

Luis Carlos Correa Ortiz

Magíster en Ingeniería, Magister en Educación y Desarrollo Humano

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Educación y Transformación Digital
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Citar/How to cite	(García Tangarife et al., 2025)
Referencia/Reference	García Tangarife, I. J., Serna Zuluaga, J. D., Atalaya Henao, D. M., Correa Ortiz, L. C. <i>Impacto del uso de laboratorios virtuales y simulaciones en la enseñanza de la biología en educación secundaria y en la formación médica: Una perspectiva desde la experiencia docente</i> [Virtual]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo/Style:	
APA 7ma ed. (2020)	



Maestría en Educación y Transformación Digital UManizales Grupo 1 Cohorte 3

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Grammarly, Turnitin y Copilot, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo analizar la percepción docente sobre el uso de laboratorios virtuales y simulaciones digitales en la enseñanza de la biología en instituciones

educativas de los sectores público, privado y de educación superior. La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto de tipo descriptivo y exploratorio, combinando un componente cuantitativo, basado en una encuesta tipo Likert aplicada a 73 docentes, y un componente cualitativo, fundamentado en entrevistas semiestructuradas a tres profesores: uno perteneciente a una institución pública, otro a una privada y un tercero al ámbito universitario. Los resultados cuantitativos evidenciaron valoraciones positivas hacia el uso de estas herramientas, especialmente en los ítems de percepción de utilidad y apoyo docente, aunque se identificaron diferencias significativas entre instituciones, relacionadas con la infraestructura tecnológica y la formación pedagógica. La prueba de normalidad indicó ausencia de distribución normal, lo que justificó el uso de pruebas no paramétricas (Kruskal–Wallis). Asimismo, no se hallaron correlaciones significativas entre la percepción de utilidad y la motivación estudiantil. El análisis cualitativo confirmó que los docentes reconocen el valor pedagógico de las simulaciones, pero demandan mayor acompañamiento institucional. Se concluye que la integración efectiva de laboratorios virtuales en la enseñanza requiere capacitación docente, equidad tecnológica y reflexión pedagógica que promuevan un aprendizaje activo y significativo.

Palabras clave: educación científica, laboratorios virtuales, percepción docente, simulación digital, tecnología educativa.

Abstract

This study aims to analyze teachers' perceptions of the use of virtual laboratories and digital simulations in biology teaching across public, private, and higher education institutions. The research followed a mixed-methods approach with a descriptive and exploratory design, combining a quantitative component, based on a Likert-scale survey applied to 73 teachers, and a qualitative component, consisting of semi-structured interviews with three educators representing each sector. Quantitative results revealed positive perceptions toward the use of these tools, particularly in the items related to perceived usefulness and teacher support, although significant differences were identified among institutions, mainly associated with technological infrastructure and pedagogical training. The normality test indicated a non-normal distribution, which justified the use of non-parametric tests (Kruskal–Wallis). Likewise, no significant correlations were found between perceived usefulness and student motivation. The qualitative

analysis confirmed that teachers acknowledge the pedagogical value of simulations but emphasized the need for greater institutional support. It is concluded that the effective integration of virtual laboratories requires teacher training, technological equity, and pedagogical reflection to foster active and meaningful learning.

Keywords: digital simulation, educational technology, scientific education, teachers' perception, virtual laboratories.

1. Introducción

La educación, entendida como un proceso histórico, cultural y humanizador, articula la transmisión de saberes con la producción de conocimiento y la transformación social. Este proceso dinámico se manifiesta tanto en los dispositivos formales como el currículo, los planes de estudio y la evaluación, como en las prácticas implícitas de socialización y cultura escolar. A su vez, se re configura de manera constante frente a los avances científicos y tecnológicos que transforman los modos de enseñar y aprender (Kerres & Buchner, 2022). En este contexto, la pedagogía orienta los fines y principios de la formación integral, la didáctica diseña estrategias, métodos y recursos para mediar el aprendizaje, y el currículo organiza los propósitos, contenidos, metodologías y procesos de evaluación, caracterizándose por su flexibilidad, apertura a la innovación y sensibilidad al contexto sociocultural (Camacho-Marín et al., 2020; Díaz-Barriga, 2020).

En las dos últimas décadas, las tecnologías educativas han generado transformaciones significativas en la enseñanza de las ciencias, particularmente mediante el uso de laboratorios virtuales y simulaciones digitales que permiten representar fenómenos complejos, manipular variables en entornos controlados y reducir limitaciones logísticas, económicas o de riesgo propias del laboratorio físico (Sypsas & Kalles, 2018; Huber, Highfield, & Kaufman, 2018). La evidencia empírica indica que estas herramientas fortalecen la comprensión de conceptos abstractos, el razonamiento científico y la autorregulación del aprendizaje cuando se acompañan de andamiajes metacognitivos y niveles de guía ajustados al perfil del estudiantado (Hung & Tsai, 2020; Kapici, Akcay, & Cakir, 2022; Sapriati et al., 2023). Plataformas de indagación como Go-Lab integran actividades experimentales con procesos de modelación y reflexión,

favoreciendo la integración de conocimientos y la consolidación de resultados de aprendizaje (Sui et al., 2023). De manera complementaria, los avances en analítica del aprendizaje permiten monitorear trayectorias, identificar dificultades y ofrecer retroalimentación en tiempo real, fortaleciendo la toma de decisiones pedagógicas (Elmoazen, Saqr, Khalil, & Wasson, 2023). Finalmente, las investigaciones recientes destacan la importancia de la accesibilidad y el diseño inclusivo como condiciones esenciales para garantizar la equidad y la participación en entornos virtuales (Deriba, Saqr, & Tukiainen, 2024).

Desde el enfoque del aprendizaje activo, marcos teóricos como ICAP (Interactivo, Constructivo, Activo y Pasivo) y los ciclos de indagación ofrecen una base explicativa que permite comprender por qué las simulaciones bien diseñadas promueven procesos cognitivos de orden superior, como la explicación, la argumentación y la modelación, siempre que el andamiaje se reduzca de manera gradual y se incluyan momentos de reflexión y debriefing (Kapici, Akcay, & Cakir, 2022; Hung & Tsai, 2020). En biología y disciplinas afines, los laboratorios virtuales facilitan la visualización de procesos microscópicos y moleculares, la experimentación segura y la integración progresiva entre teoría y práctica. Diversos estudios en educación secundaria y superior evidencian mejoras en el rendimiento académico, la comprensión conceptual y las actitudes hacia las ciencias, particularmente cuando la implementación de estas herramientas se realiza de forma curricular, con evaluación formativa y guía docente explícita (Robles Moral & Martínez Ballesteros, 2022; Yildirim, 2020; Bazie et al., 2024; Reyes et al., 2024). Asimismo, revisiones y metaanálisis realizados en distintos contextos respaldan estos resultados, aunque advierten una heterogeneidad de efectos y resaltan la importancia del diseño instruccional, la formación docente y las condiciones de implementación como factores determinantes (Zaturrahmi, Festiyed, & Ellizar, 2020; Ali, Ullah, & Khan, 2022; Campos Mera & Benarroch, 2024; Rosli & Ishak, 2024).

La experiencia educativa posterior a la pandemia revela tanto avances como tensiones. Por un lado, se evidencia una expansión del repertorio digital y del uso de recursos educativos abiertos (REA), lo que ha favorecido la diversificación de materiales y estrategias de enseñanza. Por otro, persisten brechas de acceso, heterogeneidad en los apoyos pedagógicos y desafíos relacionados con la sostenibilidad institucional y la equidad tecnológica (Kerres & Buchner, 2022; Arriaga-Cárdenas & Lara-Magaña, 2023; Poo, Lau, & Chen, 2023). En el contexto latinoamericano, la innovación educativa se vincula estrechamente con políticas orientadas a la

equidad y al género, así como con estrategias diseñadas para contextos con infraestructura limitada, que promueven el uso de recursos abiertos adaptados a los estilos de aprendizaje y a las necesidades locales (Rodés-Paragarino & Gewerc, 2022; Camacho-Marín et al., 2020; Campos-Ortuño, Hernández-Serrano, Renes-Arellano, & Lena-Acebo, 2023; Mičunović, Rako, & Feldvari, 2023; Bulathwela, Pérez-Ortiz, Yilmaz, & Shawe-Taylor, 2022; Kuo, Kuo, & Tseng, 2024; Guevara, García-Melo, & Franco-Pérez, 2022). En el ámbito de la educación médica, las comparaciones entre modalidades virtuales y presenciales en la enseñanza de biología celular y tisular han mostrado impactos diferenciados sobre el aprendizaje significativo, lo que refuerza la necesidad de implementar diseños instruccionales sólidos, evaluaciones auténticas y una articulación coherente con las prácticas clínicas simuladas (Garibay-González, Martínez-Cuazitl, Mata-Miranda, & Vázquez-Zapien, 2025; Govender, 2023).

Existe consenso en que los laboratorios virtuales constituyen un complemento valioso, pero no sustituyen el trabajo práctico presencial. La tendencia más aceptada promueve la adopción de modelos híbridos o *blended* que integren ambos formatos, aprovechando las fortalezas de cada uno para optimizar el aprendizaje y la participación estudiantil (Griffin et al., 2025; Haberbosch, Deiters, & Schaal, 2025; Myburgh, 2022; Delgado, Bhark, & Donahue, 2021). Desde la perspectiva de la equidad y la calidad educativa, esta articulación requiere políticas institucionales que garanticen infraestructura adecuada, conectividad estable, disponibilidad de tiempo docente, reconocimiento académico y programas de desarrollo profesional continuo. También exige lineamientos éticos y protocolos de protección de datos cuando se incorpora la analítica del aprendizaje como herramienta de monitoreo y evaluación (Elmoazen, Saqr, Khalil, & Wasson, 2023; Deriba, Saqr, & Tukiainen, 2024). Del mismo modo, la integración de recursos educativos abiertos y simulaciones digitales demanda el fortalecimiento de competencias docentes en marcos como TPACK (conocimiento tecnológico, pedagógico y del contenido), con el fin de promover un uso verdaderamente didáctico y no meramente instrumental de la tecnología (Kuo, Kuo, & Tseng, 2024; Rodés-Paragarino & Gewerc, 2022).

Desde una perspectiva metodológica, la consolidación del campo requiere la elaboración de síntesis rigurosas con criterios transparentes que permitan acumular evidencia y orientar decisiones curriculares basadas en resultados verificables (Newman & Gough, 2020). En los estudios cualitativos, el análisis temático se configura como una herramienta idónea para

comprender las experiencias y prácticas docentes, identificar patrones de uso y establecer categorías que contribuyan al rediseño de las estrategias didácticas (Braun & Clarke, 2006). En conjunto, la literatura revisada converge en tres ideas fundamentales: primero, el potencial de los laboratorios virtuales para promover la comprensión conceptual, la indagación y la autorregulación del aprendizaje; segundo, la necesidad de contar con andamiajes, formación docente y procesos de debriefing que permitan capitalizar dicho potencial; y tercero, la conveniencia de adoptar modelos complementarios, presenciales y virtuales, sensibles al contexto, la accesibilidad y la equidad educativa.

Sobre este trasfondo, el presente trabajo analiza la percepción docente respecto al uso de laboratorios virtuales y simulaciones en la enseñanza de la biología en tres contextos educativos: educación secundaria pública, educación secundaria privada y educación superior, con énfasis en los cursos de biología celular y molecular en programas de medicina. Se parte de la premisa de que, aunque los contenidos disciplinares sean compartidos, la efectividad de estas herramientas depende de múltiples factores, entre ellos las condiciones institucionales —infraestructura, conectividad y licenciamiento, las competencias docentes formación pedagógica y digital y las políticas de apoyo relacionadas con los tiempos, la evaluación y la integración curricular. Estos elementos suelen diferir significativamente entre los distintos sectores educativos (Guevara, García-Melo, & Franco-Pérez, 2022; Campos-Ortuño, Hernández-Serrano, Renes-Arellano, & Lena-Acebo, 2023; Deriba, Saqr, & Tukiainen, 2024). Comprender cómo estos componentes median la adopción, el uso y el impacto percibido de los laboratorios virtuales permitirá identificar buenas prácticas y obstáculos, además de formular recomendaciones que favorezcan una integración pedagógica equitativa, sostenible y pertinente con las demandas científicas y profesionales del siglo XXI.

Finalmente, este estudio aporta en dos direcciones complementarias. En primer lugar, sistematiza los hallazgos internacionales más recientes sobre el uso de laboratorios virtuales, la integración de estrategias de indagación y el empleo de recursos educativos abiertos (REA), estableciendo vínculos con las realidades latinoamericanas y los escenarios propios de la educación médica. En segundo lugar, documenta la voz docente en tres tipos de instituciones pública, privada y universitaria, ofreciendo insumos valiosos para la toma de decisiones curriculares, el fortalecimiento del desarrollo profesional docente y la formulación de políticas institucionales que consoliden modelos híbridos sustentados en la evidencia (Newman & Gough,

2020; Kerres & Buchner, 2022; Garibay-González, Martínez-Cuazitl, Mata-Miranda, & Vázquez-Zapien, 2025).

2. Metodología

Metodológicamente, la investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo), de tipo descriptivo y experimental. En la fase cuantitativa, se aplicó una encuesta estructurada de 10 ítems con escala tipo Likert a 73 profesores de los tres ámbitos, mediante muestreo a conveniencia. Las preguntas, diseñadas con el apoyo de herramientas de inteligencia artificial, fueron seleccionadas tras un análisis comparativo para garantizar su pertinencia y alineación con los objetivos del estudio y posteriormente validadas por juicio de expertos. Este instrumento evaluó aspectos como la efectividad percibida de los laboratorios virtuales, la infraestructura tecnológica disponible, la formación docente para su uso, la motivación estudiantil, el desarrollo del pensamiento crítico y las barreras de implementación.

En la fase cualitativa, se realizó una entrevista en profundidad a un docente representativo de cada contexto, público, privado y universitario, la cual fue validada previamente mediante juicio de expertos, abordando variables como formación académica, experiencia profesional, habilidades pedagógicas, investigación, actitudes y contexto institucional.

Estas entrevistas, fueron grabadas y se empleó el método de análisis temático propuesto por Braun & Clarke (2006) en seis fases: familiarización con los datos, en la cual se realizó una lectura exhaustiva de las tres entrevistas transcritas, identificando expresiones clave, experiencias docentes y reflexiones sobre el uso de simulaciones digitales y laboratorios virtuales en la enseñanza de la biología; generación de códigos iniciales, donde se identificaron y etiquetaron segmentos significativos de las transcripciones que respondían a los objetos de estudio; codificación temática inicial, en la que se aplicó una codificación deductiva basada en cinco categorías: percepción pedagógica, barreras tecnológicas, evaluación y reflexión, propuestas de mejora y comparación entre sectores; valoración de la codificación, cada entrevista fue codificada empleando una escala de valoración con los siguientes niveles: 0 (ausente), 1 (presencia moderada) y 2 (desarrollo profundo); revisión y definición de temas, a partir de la codificación, se realizaron los procesos de búsqueda, revisión, definición y denominación de los temas

emergentes y presentación de resultados, finalmente, se presenta un resumen analítico correspondiente a cada docente entrevistado.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados fruto del proceso metodológico descrito previamente.

3.1. Análisis cualitativo

3.1.1 Nube de Palabras Filtrada

La siguiente imagen muestra las palabras más frecuentes en las entrevistas.

Figura 1

Nube de palabras más frecuentes



Las palabras más destacadas reflejan los temas centrales abordados por los docentes: simulaciones, laboratorios, estudiantes, herramientas, virtuales, aprendizaje, institución, resultados, análisis, experiencia, entre otras.

3.1.2 Matriz de Codificación Temática

Tabla 1

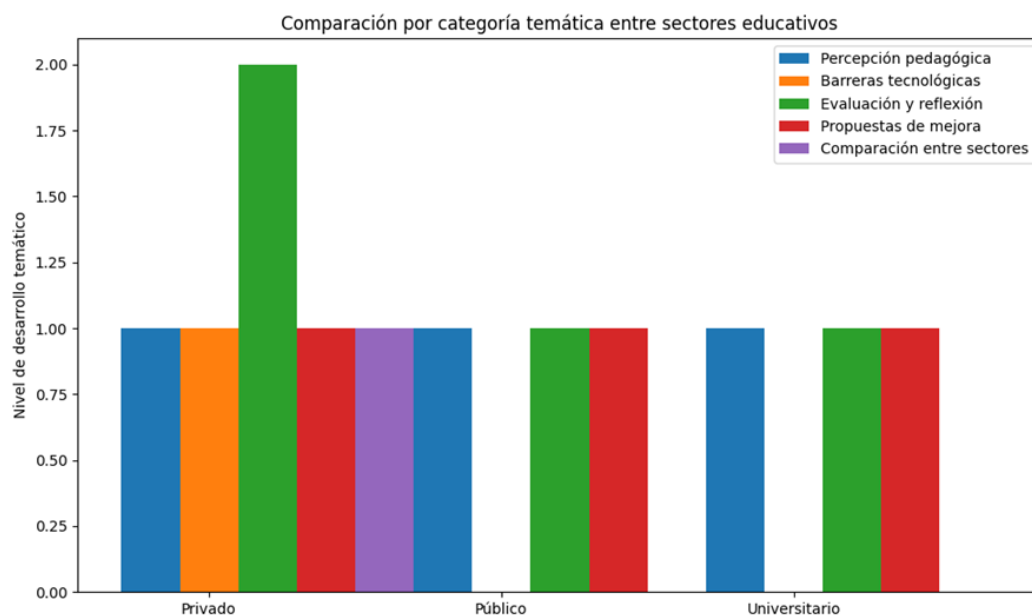
Matriz de codificación temática

Docente	Percepción pedagógica	Barreras tecnológicas	Evaluación y reflexión	Propuestas de mejora	Comparación entre sectores
Privado	1	1	2	1	1
Público	1	0	1	1	0
Universitario	1	0	1	1	0

Nota: Nivel de desarrollo (0 = ausente, 1 = moderado, 2 = profundo) de cada categoría por sector.

Figura 2

Nivel de desarrollo de cada categoría temática por sector educativo



En la Tabla 1 se encuentran los datos que soportan la Figura 2 de acuerdo con la codificación, en la que se muestra el nivel de desarrollo de cada categoría temática por sector educativo.

El sector privado se destaca en la categoría de evaluación y reflexión y ésta tiene presencia en todas las categorías. Los sectores público y universitario muestran ausencia en las categorías barreras tecnológicas y comparación entre sectores. La percepción pedagógica está presente en todos los sectores, lo que indica un consenso acerca del valor educativo de las simulaciones.

3.1.3 Búsqueda y revisión de temas

A partir de la codificación, se identificaron los siguientes temas emergentes (Tabla 2):

Tabla 2

Categorías, y temas emergentes

Categoría	Tema emergente
Percepción pedagógica	Simulaciones como herramientas motivadoras, facilitadoras del aprendizaje.
Barreras tecnológicas	Brecha digital entre sectores; limitaciones por licencias y conectividad.
Evaluación y reflexión	Uso del debriefing, informes de laboratorio y análisis de resultados.
Propuestas de mejora	Integración curricular, trabajo interdisciplinario, inversión institucional.
Comparación entre sectores	Diferencias en infraestructura, formación docente y acceso a tecnología.

Al contrastar los temas entre sectores, el sector privado muestra un mayor desarrollo en evaluación y reflexión, y presencia en todas las categorías. El sector público presenta ausencia en barreras tecnológicas y comparación entre sectores, aunque propone mejoras relevantes. El sector universitario comparte limitaciones similares al sector público, pero cuenta con mejores infraestructura y formación.

3.1.4 Definición y denominación de temas.

Los temas se definieron de la siguiente manera:

- Transformación pedagógica: Las simulaciones permiten conectar teoría con práctica, mejorar la comprensión y fomentar la autonomía.
- Desigualdad tecnológica: Las diferencias en acceso a equipos, conectividad y licencias afectan la implementación.
- Reflexión crítica: El debriefing y el análisis posterior son esenciales para consolidar el aprendizaje.

- Innovación institucional: Se requieren políticas, recursos y articulación curricular para integrar estas herramientas.
- Brechas estructurales: Las diferencias entre sectores reflejan desigualdades en recursos y preparación docente.

3.1.5. Resumen analítico

Finalmente, la Tabla 3 resume los perfiles analíticos de los tres docentes entrevistados en el estudio sobre el impacto de laboratorios virtuales y simulaciones digitales en la enseñanza de la biología.

Tabla 3

Perfiles analíticos de los docentes entrevistados

Sector / Categoría	Público	Privado	Universitario
Percepción pedagógica	Utiliza simulaciones digitales como parte integral de su práctica docente. Destaca su capacidad para motivar a los estudiantes y facilitar el aprendizaje en ciencias exactas.	Inicialmente veía los laboratorios virtuales como recursos complementarios, pero con el tiempo reconoce su potencial para dinamizar las clases, promover la curiosidad científica y facilitar la comprensión de procesos biológicos complejos. Destaca que fomentan la autonomía del estudiante.	Considera las simulaciones clínicas como fundamentales para conectar teoría con práctica médica. Las utiliza desde su experiencia como médico y licenciado en biología y química.
Barreras tecnológicas	Señala limitaciones importantes en infraestructura, como la falta de equipos, conectividad y acceso a licencias completas. Los estudiantes deben usar sus celulares y él	Aunque la institución cuenta con buena infraestructura (salas de informática, proyectores, conexión estable, dispositivos personales), identifica como barrera el acceso limitado a plataformas completas debido al costo de las	No identifica grandes limitaciones gracias al hospital simulado, que cuenta con tecnología avanzada, actores y casos clínicos reales.

	comparte datos para que puedan participar.	licencias. Las versiones gratuitas no ofrecen todas las funcionalidades necesarias.	
Evaluación y reflexión	Implementa informes de laboratorio y preguntas orientadoras para fomentar el análisis posterior a las simulaciones. Promueve el uso del método científico.	Integra el debriefing mediante discusiones guiadas, comparaciones entre resultados virtuales y físicos, y análisis de errores. Promueve el uso del método científico y el aprendizaje significativo.	El debriefing es esencial para profundizar en conceptos, aclarar vacíos y desarrollar competencias clínicas. Se realiza después de cada simulación.
Propuestas de mejora	Sugiere una integración interdisciplinaria y la inversión institucional en plataformas educativas con licencias completas. Propone que las simulaciones se articulen al currículo.	Sugiere crear un banco institucional de recursos digitales por áreas, implementar evaluaciones conjuntas entre departamentos y fomentar la transversalidad. También propone aumentar el tiempo de formación docente en herramientas digitales.	Sugiere ampliar el uso de simulaciones a otras áreas de formación médica y fortalecer la preparación docente mediante diplomados.
Comparación entre sectores	Reconoce que universidades y colegios privados tienen mayores recursos, lo que permite una experiencia más individualizada y profunda en simulaciones.	Reconoce una brecha significativa entre el sector privado y el público, especialmente en conectividad, acceso a licencias y formación docente. Considera que el cambio debe ser estructural, desde políticas públicas hasta la actitud del profesorado.	Observa vacíos en la formación previa de estudiantes provenientes de colegios, especialmente públicos, en el uso de simulaciones. Considera que hay una brecha en la preparación para la educación superior.

3.2 Análisis cuantitativo de encuestas

En el componente cuantitativo, se aplicó una encuesta estructurada de 10 ítems con escala tipo Likert (1–5) a una muestra de 73 docentes. El instrumento fue diseñado con el apoyo de herramientas de inteligencia artificial y validado por expertos, asegurando la pertinencia de los ítems con respecto a los objetivos del estudio. La encuesta evaluó aspectos como la efectividad percibida de los laboratorios virtuales, la infraestructura tecnológica disponible, la formación docente para su uso, la motivación estudiantil, el desarrollo del pensamiento crítico y las barreras de implementación. Los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística descriptiva (media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximo) y análisis comparativo entre instituciones. Se aplicaron pruebas de normalidad Shapiro-Wilk y posteriormente se utilizó la prueba de Kruskal–Wallis para comparar medias. Adicionalmente, se calcularon correlaciones bivariadas entre los ítems relacionados con percepción de utilidad y motivación estudiantil, aplicando el coeficiente de Spearman. A continuación, se presentan los resultados.

3.2.1 Datos Estadísticos descriptivos (globales)

Tabla 4

Estadísticos descriptivos

Ítem	n	media	mediana	desv_est	mín	máx
Percepción de utilidad	73	3.71	4.00	0.85	1.00	5.00
Motivación estudiantil	73	3.55	4.00	0.78	2.00	5.00
Satisfacción general	73	3.53	3.50	0.82	2.00	5.00
Claridad de contenidos	73	3.62	4.00	0.93	1.00	5.00
Apoyo docente	73	3.70	4.00	0.79	2.00	5.00

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos globales de los principales ítems evaluados en la encuesta aplicada a 73 docentes. En términos generales, los resultados muestran una valoración positiva del uso de laboratorios virtuales y simulaciones digitales. La percepción de utilidad obtuvo la media más alta (3.71), seguida del apoyo docente (3.70) y la claridad de

contenidos (3.62), lo que evidencia que los participantes consideran estas herramientas útiles y acompañadas de una adecuada orientación pedagógica.

La motivación estudiantil (3.55) y la satisfacción general (3.53) presentaron medias ligeramente menores, aunque aún dentro del rango favorable (≥ 3.5). Las desviaciones estándar moderadas (0.78–0.93) reflejan variabilidad interinstitucional, lo que sugiere diferencias en la experiencia docente según el contexto educativo (público, privado o superior). En conjunto, estos resultados evidencian una actitud predominantemente positiva hacia la incorporación de simulaciones y laboratorios virtuales, con oportunidades de mejora en la motivación y la percepción global de satisfacción docente.

3.2.2 Pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk por grupo)

Tabla 5

Datos de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk, por grupo

Ítem	grupo	n	w	p Shapiro
Percepción de utilidad	educación superior	38	0.804	0.000
Percepción de utilidad	privada	43	0.804	0.000
Percepción de utilidad	pública	69	0.866	0.000
Motivación estudiantil	educación superior	38	0.798	0.000
Motivación estudiantil	privada	43	0.810	0.000
motivación estudiantil	pública	69	0.844	0.000
Satisfacción general	educación superior	38	0.781	0.000
Satisfacción general	privada	43	0.879	0.000
Satisfacción general	pública	69	0.872	0.000

Claridad de contenidos	educación superior	38	0.864	0.000
Claridad de contenidos	privada	43	0.844	0.000
Claridad de contenidos	pública	69	0.891	0.000
Apoyo docente	educación superior	38	0.809	0.000
Apoyo docente	privada	43	0.862	0.000
Apoyo docente	pública	69	0.847	0.000

La Tabla 5 muestra los datos y resultados de la prueba de normalidad realizada. Los resultados evidencian que, en todos los ítems evaluados, los valores de p son inferiores a 0.05, lo que indica que los datos no siguen una distribución normal en ninguno de los tres contextos educativos (público, privado y educación superior). Esta falta de normalidad fue consistente en todas las variables analizadas, es decir, en la percepción de utilidad, la motivación estudiantil, la satisfacción general, la claridad de contenidos y el apoyo docente. Por tanto, se justificó el uso de pruebas no paramétricas, específicamente el test de Kruskal–Wallis, para la comparación de medias entre instituciones.

3.2.3 Comparaciones de medias entre instituciones

Tabla 6

Datos y resultados de la prueba no paramétrica (Kruskal-Wallis)

Ítem	Estadístico	p	Interpretación
Percepción de utilidad	15.633	0.000	significativo (p<0.05)
Motivación estudiantil	24.889	0.000	significativo (p<0.05)
Satisfacción general	2.784	0.249	no significativo
Claridad de contenidos	19.648	0.000	significativo (p<0.05)

Apoyo docente	9.458	0.009	significativo ($p < 0.05$)
---------------	-------	-------	---------------------------------

Los resultados de la prueba de Kruskal–Wallis (Tabla 6), evidencian diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en los ítems percepción de utilidad, motivación estudiantil, claridad de contenidos y apoyo docente, lo que indica que las valoraciones de los docentes sobre el uso de laboratorios virtuales y simulaciones digitales varían según el tipo de institución. En contraste, la satisfacción general no mostró diferencias significativas ($p = 0.249$), reflejando una percepción similar entre los tres contextos educativos. En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque la satisfacción global con las herramientas digitales es homogénea, existen variaciones importantes en la percepción de su utilidad, motivación y apoyo institucional, determinadas probablemente por las condiciones tecnológicas y pedagógicas de cada entorno educativo.

3.2.4 Correlaciones

Tabla 7

Análisis de correlación entre ítems y grupos

Grupo	Ítem a	ítem b	r	p
Educación superior	percepción de utilidad	motivación estudiantil	0.226	0.173
Colegio privado	percepción de utilidad	motivación estudiantil	0.086	0.582
Colegio Público	percepción de utilidad	motivación estudiantil	-0.035	0.773

Los resultados del análisis de correlaciones entre los ítems percepción de utilidad y motivación estudiantil muestran valores bajos y no significativos en los tres grupos institucionales (Tabla 7). En educación superior se obtuvo un coeficiente $r = 0.226$ ($p = 0.173$), en colegios privados $r = 0.086$ ($p = 0.582$) y en colegios públicos $r = -0.035$ ($p = 0.773$). Estos valores indican ausencia de correlación significativa, lo que sugiere que, aunque ambos constructos se relacionan teóricamente, su vínculo no es lineal en las percepciones docentes. En

otras palabras, la percepción de utilidad de los laboratorios virtuales no necesariamente se traduce en un incremento proporcional de la motivación estudiantil. Este hallazgo resalta la influencia de otros factores institucionales y pedagógicos que podrían mediar la relación entre utilidad percibida y motivación en los diferentes contextos educativos.

4. Discusión

Los hallazgos de este estudio confirman que el uso de laboratorios virtuales y simulaciones digitales constituye una herramienta pedagógica de alto potencial para fortalecer la enseñanza de la biología en los distintos niveles educativos (Hung & Tsai, 2020; Yildirim, 2020; Campos Mera & Benarroch, 2024). Esta afirmación se sustenta en los resultados tanto cuantitativos como cualitativos obtenidos. En el análisis estadístico descriptivo, los docentes otorgaron valoraciones favorables a los ítems de percepción de utilidad (media = 3.71), apoyo docente (media = 3.70) y claridad de contenidos (media = 3.62). Estos resultados evidencian una aceptación generalizada de las simulaciones y laboratorios virtuales como recursos eficaces para la enseñanza y la comprensión de conceptos complejos en biología (Robles Moral & Martínez Ballesteros, 2022; Huber, Highfield, & Kaufman, 2018). No obstante, las puntuaciones ligeramente inferiores en motivación estudiantil (media = 3.55) y satisfacción general (media = 3.53) sugieren que, aunque los docentes reconocen el valor pedagógico de estas tecnologías, aún persisten desafíos en su implementación y en la experiencia de aprendizaje del estudiantado (Kapici, Akcay, & Cakir, 2022; Haberbosch, Deiters, & Schaal, 2025).

El análisis de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk mostró que los datos no siguieron una distribución normal en ninguno de los contextos educativos evaluados ($p < 0.05$), lo que justificó la aplicación de pruebas no paramétricas para la comparación de medias. Los resultados de la prueba de Kruskal–Wallis evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en los ítems de percepción de utilidad, motivación estudiantil, claridad de contenidos y apoyo docente ($p < 0.05$), lo que indica que las valoraciones de los docentes varían según el tipo de institución. En particular, los docentes de instituciones privadas y de educación superior expresaron percepciones más favorables que aquellos del sector público, diferencia que puede atribuirse a factores como la disponibilidad de infraestructura tecnológica, el acceso a plataformas con licencias completas y una formación más consolidada en competencias digitales.

(Guevara, García-Melo, & Franco-Pérez, 2022; Garibay-González, Martínez-Cuazitl, Mata-Miranda, & Vázquez-Zapien, 2025).

Este hallazgo concuerda con lo expuesto por Hernández-Suárez, Prada-Núñez y Gamboa-Suárez (2020) y por Camacho-Marín y Guerra (2021), quienes señalan que la integración efectiva de las tecnologías de la información y la comunicación en los procesos educativos depende no solo de la disponibilidad de recursos materiales, sino también del acompañamiento pedagógico y la formación continua del profesorado. En este sentido, la brecha tecnológica entre instituciones se constituye en un factor determinante que condiciona la calidad de la enseñanza y del aprendizaje mediados por tecnología (Rosli & Ishak, 2024; Zaturrahmi, Festiyed, & Ellizar, 2020).

Por otro lado, el análisis de correlación entre la percepción de utilidad y la motivación estudiantil no mostró resultados estadísticamente significativos en ninguno de los tres grupos institucionales ($r < 0.23$; $p > 0.17$). Este hallazgo sugiere que, aunque los docentes reconocen estas herramientas como útiles, dicha percepción no se traduce necesariamente en un incremento proporcional de la motivación de los estudiantes (Ali, Ullah, & Khan, 2022; Sui, Chen, Cheng, & Chang, 2023). Este resultado invita a reflexionar sobre la complejidad de los factores que influyen en la motivación, entre los que se incluyen la metodología de implementación, el contexto institucional, las características del estudiantado y el acompañamiento pedagógico. De este modo, se reafirma que la tecnología, por sí sola, no garantiza un aprendizaje significativo, sino que requiere integrarse en un marco pedagógico sólido, contextualizado y orientado a la construcción activa del conocimiento (Moreno & Mayer, 2021; Newman & Gough, 2020).

El análisis cualitativo complementó estos resultados al resaltar la importancia de la reflexión docente y del debriefing como estrategias pedagógicas esenciales para consolidar aprendizajes significativos (Braun & Clarke, 2006; Haberbosch, Deiters, & Schaal, 2025). Los docentes entrevistados coincidieron en que las simulaciones digitales facilitan la articulación entre la teoría y la práctica, promueven la autonomía del estudiante y favorecen la comprensión de procesos biológicos complejos (Myburgh, 2022; Sypsas & Kalles, 2018). No obstante, también identificaron barreras relacionadas con la falta de conectividad, el acceso limitado a licencias completas y la necesidad de una formación docente más sólida que integre competencias tecnopedagógicas (Kerres & Buchner, 2022; Arriaga-Cárdenas & Lara-Magaña, 2023). Estas percepciones coinciden con lo planteado por Moreno y Mayer (2021), quienes

subrayan el valor del aprendizaje multimodal como medio para favorecer la comprensión de conceptos abstractos y de alta complejidad.

En conjunto, los resultados del estudio evidencian que, si bien existe una valoración positiva generalizada hacia el uso de laboratorios virtuales y simulaciones digitales, su implementación efectiva requiere superar barreras estructurales, fortalecer la formación docente y promover políticas institucionales que garanticen la equidad tecnológica entre los diferentes sectores educativos (Elmoazen, Saqr, Khalil, & Wasson, 2023; Campos-Ortuño, Hernández-Serrano, Renes-Arellano, & Lena-Acebo, 2023). Asimismo, la ausencia de correlación significativa entre la percepción de utilidad y la motivación estudiantil plantea la necesidad de continuar investigando las variables mediadoras que influyen en el aprendizaje activo, como el diseño instruccional, la interacción docente-estudiante y el contexto sociocultural en el que se desarrolla la práctica pedagógica (Reyes, Isleta, Regala, & Bialba, 2024; Griffin et al., 2025).

5. Conclusiones

Los resultados de este estudio permiten concluir que los laboratorios virtuales y las simulaciones digitales son percibidos por los docentes como herramientas pedagógicas de alto valor en los distintos niveles educativos analizados (Zaturrahmi, Festiyed, & Ellizar, 2020; Bazie, Lemma, Workneh, & Estifanos, 2024). Esta valoración positiva se refleja en los promedios elevados obtenidos en los ítems de percepción de utilidad, apoyo docente y claridad de contenidos, lo que evidencia que estas tecnologías favorecen la comprensión de conceptos complejos en biología y fortalecen el proceso de enseñanza-aprendizaje (Sui, Chen, Cheng, & Chang, 2023; Hung & Tsai, 2020). No obstante, la implementación efectiva de estas herramientas continúa enfrentando limitaciones estructurales, particularmente en el sector público, donde las barreras tecnológicas como la falta de conectividad, la carencia de equipos adecuados y el acceso restringido a licencias completas dificultan su uso sostenido y equitativo (Guevara, García-Melo, & Franco-Pérez, 2022; Campos Mera & Benarroch, 2024).

De igual forma, la ausencia de una correlación significativa entre la percepción de utilidad y la motivación estudiantil podría indicar que la sola presencia de tecnología no es suficiente para generar un impacto directo en la disposición y motivación de los estudiantes hacia el aprendizaje

(Kapici, Akcay, & Cakir, 2022; Ali, Ullah, & Khan, 2022). El análisis cualitativo también evidenció que los docentes valoran especialmente el uso del debriefing y de otras estrategias de reflexión posterior a las simulaciones, las cuales potencian el aprendizaje profundo y la apropiación significativa de los contenidos (Braun & Clarke, 2006; Haberbosch, Deiters, & Schaal, 2025). Esta práctica, más consolidada en los contextos privados y universitarios, debería promoverse en todos los niveles educativos como parte integral del uso de laboratorios virtuales, en coherencia con enfoques pedagógicos centrados en el estudiante y en el desarrollo de la metacognición (Hung & Tsai, 2020; Sapriati et al., 2023).

En síntesis, la integración de laboratorios virtuales y simulaciones digitales en la enseñanza de la biología requiere no solo infraestructura adecuada y formación técnica, sino también una transformación pedagógica que articule estas herramientas con prácticas educativas innovadoras, colaborativas y contextualizadas (Rosli & Ishak, 2024; Campos-Ortuño, Hernández-Serrano, Renes-Arellano, & Lena-Acebo, 2023). Solo a través de este enfoque integral será posible avanzar hacia una educación científica más equitativa, inclusiva y pertinente frente a los desafíos del siglo XXI (Kerres & Buchner, 2022; Rodés-Paragarino & Gewerc, 2022).

Los resultados de este estudio abren diversas líneas de investigación que podrían ser abordadas en trabajos futuros. Una de ellas consiste en profundizar en el análisis de las variables mediadoras que influyen en la relación entre la percepción de utilidad y la motivación estudiantil, tales como el estilo de enseñanza, el nivel de autonomía del estudiante, el tipo de simulación empleada ya sea exploratoria, guiada o gamificada y el grado de integración curricular de estas herramientas (Govender, 2023; Shambare & Jita, 2025). Asimismo, resulta pertinente indagar en el papel que desempeña la formación docente en el éxito de la implementación de los laboratorios virtuales y las simulaciones digitales, considerando su impacto en la sostenibilidad pedagógica y en la calidad de la enseñanza (Garibay-González, Martínez-Cuazitl, Mata-Miranda, & Vázquez-Zapien, 2025; Myburgh, 2022).

Finalmente, resultaría valioso ampliar el espectro disciplinar del análisis incorporando otras áreas del conocimiento, como la química, la física o incluso las ciencias sociales, con el propósito de determinar si los patrones identificados en la enseñanza de la biología se replican en otros campos del saber (Reyes, Isleta, Regala, & Bialba, 2024; Griffin et al., 2025).

6. Referencias

- Ali, N., Ullah, S., & Khan, D. (2022). Interactive laboratories for science education: A subjective study and systematic literature review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 6(10), 85. <https://doi.org/10.3390/mti6100085>
- Arriaga Cárdenas, O. G., & Lara Magaña, P. del C. (2023). La innovación en la educación superior y sus retos a partir del COVID-19. *Revista Educación*. <https://doi.org/10.15517/revedu.v47i1.51979>
- 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>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Bulathwela, S., Pérez-Ortiz, M., Yilmaz, E., & Shawe-Taylor, J. (2022). Power to the learner: Towards human-intuitive and integrative recommendations with open educational resources. *Sustainability*, 14(18), 11682. <https://doi.org/10.3390/su141811682>
- Camacho, R., Rivas, C., Gaspar, M., & Quiñonez, C. (2020). Innovación y tecnología educativa en el contexto actual latinoamericano. *Revista de Ciencias Sociales*, 23(3). <https://doi.org/10.31876/rcs.v26i0.34139>
- Campos Mera, G., & Benarroch Benarroch, A. (2024). Laboratorios virtuales para la enseñanza de las ciencias: una revisión sistemática. *Enseñanza de las Ciencias Revista de investigación y experiencias didácticas*, 42(2), 109–129. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.6040>
- Campos Ortuño, R., Hernández-Serrano, M.-J., Renes-Arellano, P., & Lena-Acebo, F. J. (2023). Recursos Educativos Abiertos adaptados a estilos de aprendizaje para la enseñanza de competencias digitales en Educación Superior. *Revista de Estilos de Aprendizaje*, 16(31), 4–18. <https://doi.org/10.55777/rea.v16i31.4602>
- Delgado, T., Bhark, S.-J., & Donahue, J. (2021). Pandemic Teaching: Creating and teaching cell biology labs online during COVID-19. *Biochemistry and Molecular Biology Education: A*

Bimonthly Publication of the International Union of Biochemistry and Molecular Biology, 49(1), 32–37. <https://doi.org/10.1002/bmb.21482>

- Deriba, F. G., Saqr, M., & Tukiainen, M. (2024). Assessment of accessibility in virtual laboratories: a systematic review. *Frontiers in education*, 9. <https://doi.org/10.3389/educ.2024.1351711>
- Dittrich, L., Aagaard, T., & Hjukse, H. (2022). The perceived affordances of simulation-based learning: online student teachers' perspectives. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 19(1), 60. <https://doi.org/10.1186/s41239-022-00366-2>
- Elmoazen, R., Saqr, M., Khalil, M., & Wasson, B. (2023). Learning analytics in virtual laboratories: a systematic literature review of empirical research. *Smart Learning Environments*, 10(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00244-y>
- Garibay-González, F., Martínez-Cuazitl, A., Mata-Miranda, M. M., & Vázquez-Zapien, G. J. (2025). Educación virtual y presencial en biología celular y tisular: impacto en el aprendizaje significativo de estudiantes de medicina. *Educación médica*, 28(1), 21. <https://doi.org/10.33588/fem.281.1365>
- Govender, R. (2023). Teaching and learning using virtual labs: Investigating the effects on students' self-regulation. *Cogent Education*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/2331186x.2023.2172308>
- Griffin, C. S., Loughran, S., Kelly, B., Healy, E., Lambe, G., van Rossum, A., Murphy, B., Moore, E., Burke, C., Morrin, A., Breslin, C., Heaney, F., Rooney, D., Bree, R., & Drumm, B. T. (2025). Virtual laboratories complement but should not replace face-to-face classes: perceptions of life science students at Dundalk Institute of Technology, Ireland. *Advances in Physiology Education*, 49(6), 314–330. <https://doi.org/10.1152/advan.00227.2024>
- Guevara, G., García-Melo, J. E., & Franco-Pérez, L. M. (2022). Oportunidades y desafíos de los docentes en programas de biología con asignaturas teórico-prácticas de dos instituciones colombianas de educación superior bajo restricciones de pandemia. *Revista Iberoamericana de Educación*, 88(1), 85–100. <https://doi.org/10.35362/rie8814833>
- Haberbosch, M., Deiters, M., & Schaal, S. (2025). Combining virtual and hands-on lab work in a blended learning approach on molecular biology methods and lab safety for lower

- secondary education students. *Education Sciences*, 15(2), 123. <https://doi.org/10.3390/educsci15020123>
- Huber, B., Highfield, K., & Kaufman, J. (2018). Detailing the digital experience: Parent reports of children's media use in the home learning environment. *British Journal of Educational Technology: Journal of the Council for Educational Technology*, 49(5), 821–833. <https://doi.org/10.1111/bjet.12667>
- Hung, J.-F., & Tsai, C.-Y. (2020). The effects of a virtual laboratory and meta-cognitive scaffolding on students' data modeling competences. *Journal of Baltic Science Education*, 19(6), 923–939. <https://doi.org/10.33225/jbse/20.19.923>
- Kapici, H. O., Akcay, H., & Cakir, H. (2022). Investigating the effects of different levels of guidance in inquiry-based hands-on and virtual science laboratories. *International Journal of Science Education*, 44(2), 324–345. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2028926>
- Kerres, M., & Buchner, J. (2022). Education after the pandemic: What we have (not) learned about learning. *Education Sciences*, 12(5), 315. <https://doi.org/10.3390/educsci12050315>
- Kuo, Y.-C., Kuo, Y.-T., & Tseng, H. (2024). Exploring the factors that influence K-12 teachers' use of open educational resources. *Education Sciences*, 14(3), 276. <https://doi.org/10.3390/educsci14030276>
- Kurtz, M., Benabbou, A., Pons, C., & Broisin, J. (2025). Collaboration in virtual and remote laboratories for education: A systematic literature review. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*. <https://doi.org/10.1007/s11412-025-09454-7>
- Mićunović, M., Rako, S., & Feldvari, K. (2023). Open educational resources (OERs) at European higher education institutions in the field of library and information science during COVID-19 pandemic. *Publications*, 11(3), 38. <https://doi.org/10.3390/publications11030038>
- Myburgh, P. H. (2022). Reflecting on the creation of virtual laboratory experiences for biology students. *Frontiers in education*, 7. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.796840>
- Navarro, C., Arias-Calderón, M., Henríquez, C. A., & Riquelme, P. (2024). Assessment of student and teacher perceptions on the use of virtual simulation in cell biology laboratory education. *Education Sciences*, 14(3), 243. <https://doi.org/10.3390/educsci14030243>

- Newman, M., & Gough, D. (2020). Systematic reviews in educational research: Methodology, perspectives and application. En *Systematic Reviews in Educational Research* (pp. 3–22). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Poo, M. C.-P., Lau, Y.-Y., & Chen, Q. (2023). Are virtual laboratories and remote laboratories enhancing the quality of sustainability education? *Education Sciences*, 13(11), 1110. <https://doi.org/10.3390/educsci13111110>
- Reyes, R. L., Isleta, K. P., Regala, J. D., & Bialba, D. M. R. (2024). Enhancing experiential science learning with virtual labs: A narrative account of merits, challenges, and implementation strategies. *Journal of Computer Assisted Learning*. <https://doi.org/10.1111/jcal.13061>
- Robles Moral, F. J., & Martínez Ballesteros, A. (2022). La genética mendeliana de secundaria a través del laboratorio virtual. *Edutec Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, 82, 217–231. <https://doi.org/10.21556/edutec.2022.82.2695>
- Rodés Paragarino, V., & Gewerc, A. (2022). Educational innovation, open educational resources, and gender in Latin American universities. *Education Sciences*, 13(1), 19. <https://doi.org/10.3390/educsci13010019>
- Rosli, R., & Ishak, N. A. (2024). Integration of virtual labs in Science Education: A systematic literature review. *Jurnal Pendidikan Sains dan Matemaitk Malaysia*, 14(1), 81–103. <https://doi.org/10.37134/jpsmm.vol14.1.8.2024>
- Sapriati, A., Suhandoko, A. D. J., Yundayani, A., Karim, R. A., Kusmawan, U., Mohd Adnan, A. H., & Suhandoko, A. A. (2023). The effect of virtual laboratories on improving students' SRL: An umbrella systematic review. *Education Sciences*, 13(3), 222. <https://doi.org/10.3390/educsci13030222>
- Shambare, B., & Jita, T. (2025). A new era of learning: exploring science teachers' perceptions of virtual lab in rural schools. *Education and Information Technologies*, 30(11), 15185–15205. <https://doi.org/10.1007/s10639-025-13412-z>
- Sui, C.-J., Chen, H.-C., Cheng, P.-H., & Chang, C.-Y. (2023). The go-lab platform, an inquiry-learning space: Investigation into students' technology acceptance, knowledge integration, and learning outcomes. *Journal of Science Education and Technology*, 32(1), 61–77. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10008-x>

- Sypsas, A., & Kalles, D. (2018). Virtual laboratories in biology, biotechnology and chemistry education: A literature review. *Proceedings of the 22nd Pan-Hellenic Conference on Informatics*.
- Yildirim, F. S. (2020). The effect of virtual laboratory applications on 8th grade students' achievement in science lesson. *Journal of education in science, environment and health*. <https://doi.org/10.21891/jeseh.837243>
- Zaturrahmi, Z., Festiyed, F., & Ellizar, E. (2020). The utilization of virtual laboratory in learning: A meta-analysis. *Indonesian Journal of Science and Mathematics Education*, 3(2), 228–236. <https://doi.org/10.24042/ijsme.v3i2.6474>
- Zhang, N., & Liu, Y. (2024). Design and implementation of virtual laboratories for higher education sustainability: a case study of Nankai University. *Frontiers in education*, 8(1322263). <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1322263>