

Recibido: 12 de marzo de 2026 | Revisado: 9 de abril de 2026 | Aceptado: 30 de abril de 2026 | Publicado: 30 de junio de 2026

ARTÍCULO CIENTÍFICO · SAPIENS GLOBAL · ARTÍCULO 14

Campo / Field	Contenido / Content
Tipo de contribución / Article type	Revisión de alcance / Scoping review
Título en español	Simuladores digitales guiados en Física de Bachillerato: revisión de alcance sobre comprensión conceptual, transferencia y retención
Title in English	Guided Digital Simulations in High School Physics: A Scoping Review of Conceptual Understanding, Transfer, and Retention
Autorías / Authors	NORA MARGARITA CASTRO-MACIAS — UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO, Ecuador — ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6848-117X
Correspondencia / Correspondence	NORA MARGARITA CASTRO-MACIAS — noram.castro@docentes.educacion.edu.ec

Identificación

- Tipo de contribución: Revisión de alcance. - Título en español: **Simuladores digitales guiados en Física de Bachillerato: revisión de alcance sobre comprensión conceptual, transferencia y retención.** - Title in English: **Guided Digital Simulations in High School Physics: A Scoping Review of Conceptual Understanding, Transfer, and Retention.** - Autores: NORA MARGARITA CASTRO-MACIAS. - Correspondencia: NORA MARGARITA CASTRO-MACIAS, noram.castro@docentes.educacion.edu.ec.

Resumen

Introducción: Las simulaciones interactivas hacen visibles relaciones físicas difíciles de observar y permiten manipular variables con retroalimentación inmediata. Su disponibilidad no garantiza cambio conceptual: el resultado depende de la pregunta, la guía, las representaciones, el comparador y la calidad de la evaluación. **Objetivo:** Mapear la evidencia publicada hasta el 31 de marzo de 2026 sobre simuladores digitales guiados y sus relaciones con comprensión conceptual, transferencia y retención en Física de educación secundaria. **Métodos:** Se realizó una revisión de alcance orientada por JBI y reportada con PRISMA-ScR. Diez consultas históricas en Crossref recuperaron 600 registros; 549 fueron únicos y 102 pasaron un filtro temático. Se evaluaron 40 informes y se incluyeron 20 fuentes. Se extrajeron diseño, población, dominio, simulador, guía, comparador, medición, hallazgo y limitaciones. **Resultados:** La evidencia fue generalmente favorable para comprensión conceptual inmediata cuando la simulación se integró con predicción, exploración, explicación, indagación guiada o aprendizaje basado en problemas. Las síntesis mostraron que los experimentos virtuales pueden igualar o superar prácticas tradicionales en algunos desenlaces y que la combinación real-virtual suele ser beneficiosa; no apareció una secuencia universalmente superior. Los estudios escolares se concentraron en electricidad, mecánica, ondas y energía, con diseños cuasiexperimentales, instrumentos locales y seguimiento breve. Transferencia, retención, accesibilidad y fidelidad se midieron con menor frecuencia. **Conclusiones:** La simulación debe entenderse como una representación manipulable dentro de una arquitectura pedagógica, no como una intervención autosuficiente. El diseño más defendible articula predicción, exploración con restricciones productivas, explicación multirrepresentacional, contraste con fenómenos físicos y tarea de transferencia. La evidencia no permite afirmar un efecto causal general ni resultados ecuatorianos.

Palabras clave: simuladores digitales; Física; comprensión conceptual; Bachillerato; indagación; transferencia del aprendizaje.

Abstract

Introduction: Interactive simulations make difficult-to-observe physical relationships visible and allow learners to manipulate variables with immediate feedback. Availability alone does not ensure conceptual change: outcomes depend on the question, guidance, representations, comparator, and assessment quality. **Objective:** To map evidence published through March 31, 2026, on guided digital simulations and their relationships with conceptual understanding, transfer, and retention in secondary physics education. **Methods:** A JBI-oriented scoping review was reported using PRISMA-ScR. Ten historical Crossref searches retrieved 600 records; 549 were unique and 102 passed a thematic filter. Forty reports were assessed and 20 sources were included. Design, population, domain, simulation, guidance, comparator, measurement, findings, and limitations were extracted. **Results:** Evidence was generally favorable for immediate conceptual understanding when simulations were integrated with prediction, exploration, explanation, guided inquiry, or problem-based learning. Reviews suggested that virtual experiments can match or outperform traditional practices for some outcomes and that real–virtual combinations are often beneficial; no universally superior sequence emerged. School studies clustered around electricity, mechanics, waves, and energy, with quasi-experimental designs, locally developed instruments, and short follow-up periods. Transfer, retention, accessibility, and fidelity were measured less often. **Conclusions:** Simulations should be understood as manipulable representations within a pedagogical architecture rather than self-sufficient interventions. The most defensible design connects prediction, productively constrained exploration, multi-representational explanation, comparison with physical phenomena, and transfer tasks. Current evidence does not support a universal causal effect or Ecuadorian outcomes.

Keywords: digital simulations; physics; conceptual understanding; high school; inquiry; learning transfer.

Introducción

Aprender Física exige coordinar fenómenos observables, modelos, lenguaje, diagramas, ecuaciones y relaciones causales. Una persona puede resolver un ejercicio sustituyendo valores y mantener, al mismo tiempo, una concepción incompatible con el principio físico. En mecánica, electricidad, ondas o termodinámica, esas concepciones alternativas suelen persistir porque la experiencia cotidiana, la notación y las explicaciones escolares no siempre convergen.

Las simulaciones digitales interactivas ofrecen una respuesta parcial. Permiten variar una magnitud, mantener otras constantes y observar una consecuencia de forma inmediata. También representan elementos invisibles —vectores, campos, partículas, flujo de energía— y conectan una misma situación con gráficos, números y animaciones. Podolefsky et al. (2010) mostraron que la interactividad, la retroalimentación dinámica, las analogías y las representaciones múltiples pueden sostener exploración comprometida. Sin embargo, una interfaz intuitiva no sustituye la actividad intelectual de predecir, explicar y revisar una idea.

La expresión “laboratorio virtual” agrupa usos diferentes. Una simulación puede funcionar como demostración proyectada por el docente, exploración libre, ejercicio con instrucciones paso a paso, investigación guiada, problema, evaluación formativa o preparación para un experimento físico. Atribuir a la herramienta el resultado del paquete completo confunde mecanismo y recurso. Smetana y Bell (2012) concluyeron que las simulaciones resultan más productivas como complemento, con apoyo de calidad, reflexión y disonancia cognitiva.

La comparación con laboratorios físicos tampoco admite una jerarquía simple. Lo virtual reduce ruido, acelera repeticiones y hace visibles mecanismos; lo físico introduce materialidad, incertidumbre, destreza y restricciones auténticas. De Jong et al. (2013) propusieron tratar ambos entornos como complementarios. Wörner et al. (2022), en una revisión de 42 estudios experimentales, encontraron que combinar experimentos reales y virtuales fue generalmente favorable, pero no identificaron un orden universalmente superior. El orden debe responder a la función: preparar, simplificar, contrastar, extender o validar.

La comprensión conceptual es el desenlace más frecuente, aunque se mide de formas incompatibles. Algunos estudios usan inventarios reconocidos; otros construyen pruebas locales sin evidencia suficiente de validez. Un posttest inmediato puede captar familiaridad con representaciones o preguntas practicadas. La transferencia exige resolver una situación nueva; la retención exige conservar y reorganizar el conocimiento después de un intervalo. Brinson (2015) advirtió que gran parte de la evaluación de laboratorios no tradicionales privilegia conocimiento declarativo y mide menos prácticas de investigación.

La guía constituye otro moderador. El metaanálisis de Lazonder y Harmsen (2016) mostró que la indagación guiada favorece aprendizaje y desempeño. En una simulación, la guía puede orientar interpretación, diseño del experimento o autorregulación. Demasiada estructura reduce la exploración a completar casillas; poca estructura puede producir manipulación sin sentido. La meta es ofrecer restricciones productivas que preserven decisiones conceptuales.

En Ecuador, el currículo oficial del Bachillerato General Unificado integra recursos digitales y analógicos, investigación, experimentación y argumentación crítica. Esta alineación sostiene pertinencia curricular, pero no demuestra que una intervención con simulaciones haya producido resultados locales. El expediente carece de datos pretest-posttest de los seis paralelos previstos originalmente. Por ello, esta revisión reemplaza responsablemente la ruta cuasiexperimental y construye un mapa para futuras evaluaciones.

La pregunta fue: ¿qué evidencia publicada hasta el 31 de marzo de 2026 describe los efectos, asociaciones, mecanismos y condiciones de implementación de simuladores digitales guiados sobre comprensión conceptual, transferencia y retención en Física de educación secundaria? El objetivo fue mapear diseños, dominios, formas de guía, comparadores y desenlaces, y derivar criterios para un futuro estudio ecuatoriano sin extrapolar resultados internacionales.

Métodos

Diseño y reporte

Se realizó una revisión de alcance por la heterogeneidad de tecnologías, poblaciones, dominios, comparadores y medidas. La conducción se orientó por JBI (Peters et al., 2020) y el reporte por PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018). El protocolo, las consultas, el cribado y la matriz forman parte del expediente SG-2026-014. No existió registro prospectivo externo.

Elegibilidad

El marco PCC definió como población principal a estudiantes de educación secundaria o Bachillerato. Se admitieron niveles adyacentes cuando aportaban mecanismos directamente transferibles, pero se marcaron por separado. El concepto incluyó simulaciones digitales interactivas y laboratorios virtuales de Física integrados en una actividad pedagógica explícita. Se excluyeron videos o animaciones sin manipulación, simulaciones no físicas y herramientas generativas cuyo componente principal no fuera la experimentación simulada.

Los contextos incluyeron mecánica, electricidad, ondas, óptica, termodinámica y otros dominios de Física escolar, en aula, laboratorio, modalidad remota o combinada. Se admitieron diseños experimentales, cuasiexperimentales, observacionales, cualitativos, mixtos, de diseño e implementación, además de revisiones para síntesis y rastreo. Los desenlaces fueron comprensión conceptual, concepciones alternativas, transferencia, retención, explicación, participación, fidelidad y accesibilidad. La ventana principal fue 2010–31 de marzo de 2026, en español, inglés o portugués.

Búsqueda

El 11 de agosto de 2026 se ejecutó una recuperación histórica limitada al corte mediante Crossref REST API. Diez consultas combinaron PhET, simulación interactiva, laboratorio virtual, Física, secundaria, comprensión conceptual, cambio conceptual, transferencia, retención, indagación guiada, experimentos reales y múltiples representaciones. Cada consulta solicitó 60 artículos de revista. Se complementó con rastreo de DOI, revisiones clave, fuentes editoriales y currículo oficial ecuatoriano. No se afirmó cobertura exhaustiva de bases cerradas.

Selección, extracción y síntesis

Se recuperaron 600 registros y 549 fueron únicos. Un filtro amplio de simulación, Física y educación dejó 102 candidatos. Tras título y resumen, 40 informes fueron evaluados con mayor detalle; se incluyeron 20 y se excluyeron 20 con motivo. Las revisiones no se contaron como estudios primarios adicionales.

Se extrajeron año, país, nivel, diseño, muestra descrita, dominio, simulador, forma de guía, comparador, instrumento, desenlaces, hallazgo, transferencia o retención, fidelidad, limitación, DOI y URL. La confianza interpretativa consideró comparador, validez de la medida, tamaño, pérdidas, independencia del postest y posibilidad de separar la simulación de otros componentes. No se recalcularon efectos ni se ejecutó metaanálisis.

Resultados

Flujo y composición

La Tabla 1 resume el flujo. Las 20 fuentes incluyeron cinco síntesis, dos marcos, dos comparaciones experimentales, ocho estudios de secundaria, dos intervenciones adicionales y un estudio de mecanismo. Predominaron electricidad, mecánica, ondas, energía y calor. La mayor parte de la evidencia escolar procedió de África y Asia; la evidencia latinoamericana y ecuatoriana directamente comparable fue escasa.

Tabla 1. Flujo de selección

Etapas	n	Descripción
Registros recuperados	600	Diez consultas históricas en Crossref
Registros únicos	549	Deduplicación por DOI o título
Candidatos temáticos	102	Simulación, Física y educación
Informes evaluados	40	Priorización por pertinencia y trazabilidad
Fuentes incluidas	20	Estudios, síntesis y marcos
Informes excluidos	20	Motivo conservado en la matriz

Comprensión conceptual inmediata

Banda y Nzabahimana (2021) revisaron 31 estudios experimentales o cuasiexperimentales sobre PhET. La mayoría informó mejoras conceptuales en diversas áreas, especialmente cuando PhET se integró con indagación, aprendizaje basado en problemas, laboratorio virtual o andamiaje. La revisión también registró resultados no significativos y pidió estudios mayores. Esta combinación impide convertir el patrón favorable en garantía.

Los estudios escolares de Rwanda, Indonesia, Nigeria y Ghana incluidos en la matriz informaron señales favorables en electrostática, oscilaciones, momento e impulso, energía y otros conceptos. Uwambajimana et al. (2023) examinaron electrostática en escuelas secundarias de Rwanda. Las secuencias de instrucción conceptual interactiva sobre oscilación y momento buscaron confrontar concepciones alternativas mediante predicción, simulación y explicación. En conjunto, los estudios apoyan plausibilidad, pero suelen combinar herramienta, guía, trabajo colaborativo y nueva evaluación.

La interpretación causal se debilita cuando el grupo experimental recibe más tiempo, novedad, interacción o retroalimentación que el comparador. También se debilita si el instrumento repite situaciones de la simulación. Un resultado robusto requiere un comparador con igual contenido y tiempo, una medida conceptual externa y análisis ajustado por desempeño basal.

Guía y arquitectura de actividad

La evidencia converge en que “usar PhET” no describe una intervención. Podolefsky et al. (2010) identificaron exploración comprometida cuando la interfaz ofrecía retroalimentación inmediata, conexiones concretas y representaciones coordinadas. La pregunta conceptual inicial dirigía la exploración sin fijar cada acción. Smetana y Bell (2012) resaltaron apoyo, reflexión y disonancia cognitiva.

Los estudios de andamiaje y de indagación guiada sugieren una secuencia recurrente: predecir, manipular una variable, observar, representar, explicar y revisar la predicción. El valor de la predicción es hacer visible el modelo inicial; el de la explicación es evitar que una animación sustituya el razonamiento. La guía debe preguntar por relaciones y mecanismos, no solo indicar qué botón presionar.

El exceso de guía también puede imponer carga extrínseca. Una hoja extensa puede fragmentar la atención entre pantalla, instrucciones y registro. Por ello, la guía debería concentrarse en pocas decisiones conceptuales, dejar tiempo para exploración y utilizar pausas de explicación. La fidelidad debe registrar qué preguntas se usaron, cuánto tiempo se exploró, qué representaciones se activaron y qué intervenciones realizó el docente.

Real, virtual y combinado

Zacharia y Olympiou (2011) compararon manipulación física y virtual en calor y temperatura. Las condiciones manipulativas fueron similares entre sí y superiores al control, lo que sugiere que manipular relaciones puede importar más que la fisicalidad en ese contexto. Olympiou y Zacharia (2012) estudiaron la combinación de manipulativos y mostraron el potencial de coordinar ventajas.

La revisión de Wörner et al. (2022) encontró que 25 de 30 trabajos asociados a la comparación principal favorecieron combinaciones real-virtual frente a una sola modalidad; cuatro no hallaron diferencia y uno favoreció el experimento real. Entre los estudios que compararon orden, los resultados fueron mixtos. La inferencia práctica no es “virtual primero” o “real primero”, sino asignar una función: simplificar un mecanismo, preparar una técnica, contrastar un modelo o extender condiciones imposibles de reproducir.

Tabla 2. Funciones pedagógicas de una secuencia guiada

Fase	Acción del estudiante	Función de la simulación	Evidencia evaluable
Predicción	Explicita relación esperada	Presenta situación sin revelar resultado	Modelo inicial y justificación
Exploración	Varía una magnitud y controla otras	Retroalimentación inmediata	Registro de pruebas y patrones
Representación	Coordina gráfico, vector, número y fenómeno	Hace visibles relaciones	Correspondencia entre representaciones
Explicación	Revisa la predicción y propone mecanismo	Permite repetir casos críticos	Argumento con evidencia
Contraste	Compara con experimento o caso real	Simplifica o extiende condiciones	Límites del modelo
Transferencia	Resuelve un problema nuevo	Puede retirarse o cambiar de contexto	Aplicación no practicada
Retención	Reexplica después de un intervalo	No necesariamente disponible	Persistencia y reorganización

Transferencia y retención

Transferencia y retención fueron menos frecuentes que el postest inmediato. Muchas publicaciones usaron “comprensión” para pruebas administradas inmediatamente después de actividades semejantes. Eso puede demostrar aprendizaje próximo, pero no aplicación a un diagrama nuevo, una situación cotidiana o un problema sin simulación.

Una evaluación de transferencia debería cambiar al menos una característica superficial, conservar el principio físico y exigir explicación. Para retención, la prueba debe aplicarse después de un intervalo y evitar reutilizar exactamente los ítems. Cuando los estudios no informaron esos elementos, esta revisión no infirió permanencia.

Participación, accesibilidad y fidelidad

La simulación puede disminuir costos materiales y riesgos, pero requiere dispositivo, energía, interfaz y tiempo docente. Un grupo con una sola pantalla puede concentrar el control en una persona. La participación debe evaluarse más allá del clic: quién predice, decide qué variar, interpreta y explica. Roles rotativos y preguntas individuales breves pueden reducir el monopolio.

La accesibilidad fue insuficientemente reportada. Color, tamaño de controles, navegación por teclado, idioma, velocidad de animación y compatibilidad con lectores o ampliación afectan uso. Una futura evaluación debe registrar barreras y ofrecer alternativas equivalentes.

Discusión

Hallazgo principal

El conjunto de evidencia es compatible con un beneficio de las simulaciones para comprensión conceptual, pero la afirmación defendible es condicional. La herramienta aporta visualización, manipulación y retroalimentación; la arquitectura pedagógica convierte esas posibilidades en aprendizaje. Los efectos observados no deben atribuirse al software cuando la intervención también cambia guía, tiempo, colaboración o evaluación.

Las síntesis más amplias coinciden en complementariedad y apoyo. La evidencia escolar reciente ofrece ejemplos en contextos con recursos diversos, pero su certeza está limitada por estudios locales, instrumentos propios y seguimiento corto. La escasez de transferencia y retención significa que “mejoró la comprensión” suele referirse al posttest próximo.

Implicaciones para Bachillerato

Una unidad ecuatoriana podría seleccionar un principio de mecánica común al currículo, usar un inventario conceptual pertinente y construir una secuencia de cuatro momentos: predicción individual, exploración en pares, explicación con múltiples representaciones y problema de transferencia. Un experimento físico breve permitiría discutir qué simplifica la simulación y qué introduce la realidad.

El diseño evaluativo debería comparar paralelos equivalentes, registrar línea base y fidelidad, usar intención de tratar cuando corresponda e informar tamaños de efecto con intervalos. La retención a cuatro semanas, prevista en la ficha original, sigue siendo valiosa. La publicación futura deberá reportar pérdidas, equivalencia basal, accesibilidad, exposición y cualquier desviación.

La simulación no debería utilizarse para reemplazar experiencias físicas cuya finalidad sea desarrollar destrezas instrumentales o comprender incertidumbre experimental. Puede, en cambio, preparar la experiencia, aislar una relación o permitir condiciones difíciles de producir. El objetivo determina la combinación.

Modelo de decisión

Antes de integrar una simulación, el docente puede responder cinco preguntas: ¿qué concepción se quiere hacer visible?, ¿qué variable debe manipular el estudiante?, ¿qué representación añade valor?, ¿qué evidencia permitirá explicar?, y ¿qué tarea demostrará transferencia sin depender de la interfaz? Si esas preguntas no tienen respuesta, la simulación corre el riesgo de ser demostrativa u ornamental.

Limitaciones

La búsqueda se ejecutó retrospectivamente en agosto de 2026 con corte a marzo de 2026. Crossref no sustituye bases de educación y no hubo acceso exhaustivo a índices de suscripción. La selección y extracción fueron realizadas por un solo equipo editorial. Algunos informes fueron recuperados mediante metadatos limitados. El corpus mezcla revisiones y estudios primarios; se evitó doble conteo, pero existe solapamiento conceptual. Varios estudios provienen de contextos no latinoamericanos y no permiten generalización a Ecuador. No se ejecutó metaanálisis.

Conclusiones

Los simuladores digitales pueden apoyar comprensión conceptual en Física de secundaria cuando hacen manipulables relaciones relevantes y se integran en una secuencia de predicción, exploración, representación y explicación. La combinación con experimentos reales suele ser productiva, pero no existe un orden universal: cada modalidad debe cumplir una función.

La base empírica es favorable pero desigual. Predominan diseños cuasiexperimentales, posttest inmediato e instrumentos locales; transferencia, retención, fidelidad y accesibilidad reciben menos atención. Por ello, las futuras evaluaciones deben separar recurso y pedagogía, usar comparadores equivalentes, medidas externas, tareas nuevas y seguimiento diferido.

En Ecuador, la pertinencia curricular justifica un piloto, no una afirmación de efectividad. Este artículo ofrece criterios para diseñarlo y evaluarlo sin presentar resultados inexistentes.

Declaraciones

Financiación: La investigación no recibió financiación externa.

Conflictos de intereses: La persona autora declara no tener conflictos de intereses.

Contribuciones de autoría (CRediT): NORA MARGARITA CASTRO-MACIAS: conceptualización, metodología, investigación, curación de datos, análisis formal, visualización, redacción del borrador y revisión y edición.

Uso de inteligencia artificial: Se emplearon herramientas de IA como apoyo editorial para organización y revisión lingüística. No se utilizaron para fabricar datos, fuentes ni resultados; la responsabilidad intelectual y la verificación final corresponden a la persona autora.

Disponibilidad de datos: La revisión utiliza fuentes públicas. El registro de búsqueda, el cribado y la matriz forman parte del expediente anonimizado SG-2026-014.

Ética: No se recopilaron datos de participantes ni se ejecutó una intervención escolar.

Referencias

- Banda, H. J., & Nzabahimana, J. (2021). Effect of integrating physics education technology simulations on students' conceptual understanding in physics: A review of literature. *Physical Review Physics Education Research*, 17, 023108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.023108>
- Brinson, J. R. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional versus traditional laboratories: A review of empirical research. *Computers & Education*, 87, 218–237. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003>
- 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>
- Lazonder, A. W., & Harmsen, R. (2016). Meta-analysis of inquiry-based learning: Effects of guidance. *Review of Educational Research*, 86(3), 681–718. <https://doi.org/10.3102/0034654315627366>
- Ministerio de Educación del Ecuador. (s. f.). *Bachillerato General Unificado*. <https://educacion.gob.ec/curriculo-bgu/>
- Olympiou, G., & Zacharia, Z. C. (2012). Blending physical and virtual manipulatives. *Science Education*, 96(1), 21–47. <https://doi.org/10.1002/sce.20463>
- Peters, M. D. J., et al. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBIM Evidence Synthesis*, 18(10), 2119–2126. <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>
- Podolefsky, N. S., Perkins, K. K., & Adams, W. K. (2010). Factors promoting engaged exploration with computer simulations. *Physical Review Special Topics–Physics Education Research*, 6, 020117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020117>
- Smetana, L. K., & Bell, R. L. (2012). Computer simulations to support science instruction and learning: A critical review. *International Journal of Science Education*, 34(9), 1337–1370. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182>
- Tricco, A. C., et al. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR). *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

- Uwambajimana, S., Minani, E., Mollel, A. D., & Nyirahabimana, P. (2023). The impact of using PhET simulation on conceptual understanding of electrostatics within selected secondary schools of Muhanga District, Rwanda. *Journal of Mathematics and Science Teacher*. <https://doi.org/10.29333/mathsciteacher/13595>
- Wörner, S., Kuhn, J., & Scheiter, K. (2022). The best of two worlds: A systematic review on combining real and virtual experiments in science education. *Review of Educational Research*, 92(6), 911–952. <https://doi.org/10.3102/00346543221079417>
- Zacharia, Z. C., & Olympiou, G. (2011). Physical versus virtual manipulative experimentation in physics learning. *Learning and Instruction*, 21(3), 317–331. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2010.03.001>