

Recibido: 10 de marzo de 2026 | Revisado: 5 de abril de 2026 | Aceptado: 28 de abril de 2026 | Publicado: 30 de junio de 2026

ARTÍCULO CIENTÍFICO · SAPIENS GLOBAL · ARTÍCULO 13

Campo / Field	Contenido / Content
Tipo de contribución / Article type	Revisión de alcance / Scoping review
Título en español	Laboratorios escolares con sensores de bajo costo en educación secundaria básica: revisión de alcance sobre indagación, alfabetización de datos y argumentación científica
Title in English	School Laboratories with Low-Cost Sensors in Lower Secondary Education: A Scoping Review of Inquiry, Data Literacy, and Scientific Argumentation
Autorías / Authors	Luz Herminia Cueva-Camacho — Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Ecuador — ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1862-8651
Correspondencia / Correspondence	Luz Herminia Cueva-Camacho — luzh.cueva@educacion.gob.ec

Identificación

- Tipo de contribución: Revisión de alcance. - Título en español: **Laboratorios escolares con sensores de bajo costo en educación secundaria básica: revisión de alcance sobre indagación, alfabetización de datos y argumentación científica.** - Title in English: **School Laboratories with Low-Cost Sensors in Lower Secondary Education: A Scoping Review of Inquiry, Data Literacy, and Scientific Argumentation.** - Autores: Luz Herminia Cueva-Camacho. - Correspondencia: Luz Herminia Cueva-Camacho, luzh.cueva@educacion.gob.ec.

Resumen

Introducción: Los sensores de bajo costo permiten que una pregunta escolar produzca series de datos sobre temperatura, luz, ruido, movimiento, pH o calidad del aire. Sin embargo, disponer de mediciones no garantiza indagación ni pensamiento científico: la validez del instrumento, la distribución de roles y el andamiaje para interpretar incertidumbre condicionan lo que se aprende. **Objetivo:** Mapear la evidencia publicada hasta el 28 de febrero de 2026 sobre laboratorios e investigaciones escolares con sensores de bajo costo y su relación con indagación, alfabetización de datos y argumentación científica en educación secundaria básica y edades próximas. **Métodos:** Se realizó una revisión de alcance orientada por JBI y reportada con PRISMA-ScR. Diez consultas históricas en Crossref recuperaron 600 registros; 515 fueron únicos, 24 pasaron el filtro automatizado y 16 informes se añadieron mediante rastreo dirigido. Se evaluaron 40 informes y se incluyeron 20 fuentes. Se extrajeron diseño, muestra, dispositivo, papel docente, resultados, equidad y limitaciones. **Resultados:** La evidencia escolar se concentró en calidad del aire, ambiente, pH y computación física. Los estudios pretest-postest sugirieron mejoras en conocimiento, confianza o concepciones, pero fueron pequeños, no aleatorizados y multicomponente. La ciencia ciudadana amplió autenticidad y participación; su calidad educativa dependió de que el alumnado formulara preguntas, inspeccionara datos, discutiera anomalías y comunicara conclusiones. Las fuentes técnicas mostraron que calibración, deriva y condiciones ambientales impiden tratar una lectura como verdad exacta. Los marcos de indagación y argumentación destacaron guía docente, alternativas explicativas e incertidumbre explícita. **Conclusiones:** El sensor es productivo cuando funciona como objeto

de crítica y no solo como recolector automático. Un diseño responsable articula pregunta, calibración, registro de metadatos, visualización, contraste de explicaciones, construcción de argumentos y auditoría de participación. La evidencia disponible apoya viabilidad y mecanismos plausibles, pero no demuestra un efecto causal general ni resultados ecuatorianos.

Palabras clave: sensores de bajo costo; indagación científica; alfabetización de datos; argumentación científica; educación secundaria.

Abstract

Introduction: Low-cost sensors allow school questions to generate data series on temperature, light, noise, motion, pH, or air quality. Yet measurements alone do not ensure inquiry or scientific thinking: instrument validity, role distribution, and scaffolding for uncertainty shape what students learn. **Objective:** To map evidence published through February 28, 2026, on school laboratories and investigations using low-cost sensors and their relationships with inquiry, data literacy, and scientific argumentation in lower secondary education and adjacent age groups. **Methods:** A JBI-oriented scoping review was reported using PRISMA-ScR. Ten historical Crossref searches retrieved 600 records; 515 were unique, 24 passed the automated filter, and 16 reports were added through targeted citation and DOI tracing. Forty reports were assessed and 20 sources were included. Design, sample, device, teacher role, outcomes, equity, and limitations were extracted. **Results:** School evidence clustered around air quality, environment, pH, and physical computing. Pre-post studies suggested gains in knowledge, confidence, or conceptions, but were small, non-randomized, and multicomponent. Citizen science increased authenticity and participation; its educational quality depended on students asking questions, inspecting data, discussing anomalies, and communicating conclusions. Technical sources showed that calibration, drift, and environmental conditions prevent treating a sensor reading as exact truth. Inquiry and argumentation frameworks emphasized teacher guidance, alternative explanations, and explicit uncertainty. **Conclusions:** Sensors are educationally productive when treated as objects of critique rather than automatic data collectors. Responsible design connects questions, calibration, metadata, visualization, competing explanations, argument construction, and participation audits. Current evidence supports feasibility and plausible mechanisms, but not a general causal effect or Ecuadorian outcomes.

Keywords: low-cost sensors; scientific inquiry; data literacy; scientific argumentation; secondary education.

Introducción

Un laboratorio escolar suele asociarse con instrumentos especializados, espacios equipados y prácticas que producen pocos datos. Los microcontroladores, sensores ambientales, teléfonos móviles y kits programables de bajo costo modifican esa restricción. Una clase puede registrar temperatura cada minuto, comparar iluminación entre espacios, construir un sensor de pH o seguir variaciones de calidad del aire. Esta disponibilidad convierte fenómenos cotidianos en series analizables y aproxima la actividad escolar a prácticas contemporáneas de ciencia basada en datos.

El potencial, sin embargo, contiene una dificultad central: producir una cifra no equivale a producir evidencia. Una lectura depende del principio de medición, la calibración, el rango, la ubicación, el tiempo de respuesta, las condiciones ambientales y el tratamiento posterior. Las revisiones técnicas de Morawska et al. (2018) y Karagulian et al. (2019) muestran que el desempeño de sensores de bajo costo varía entre contaminantes, contextos y procedimientos. Ocultar esa variación puede enseñar una idea equivocada de objetividad; convertirla en objeto de análisis permite discutir precisión, validez, error e incertidumbre.

La alfabetización de datos comprende formular preguntas que puedan responderse con datos, reconocer cómo fueron producidos, organizar y visualizar registros, interpretar patrones, detectar anomalías y sostener conclusiones proporcionales. En un laboratorio con sensores, estas acciones no ocurren automáticamente. Un panel puede mostrar una curva atractiva y aun así dejar intactas preguntas esenciales: ¿qué representa cada punto?, ¿hubo valores perdidos?, ¿se movió el sensor?, ¿la diferencia excede la incertidumbre?, ¿qué explicación alternativa es plausible? El valor educativo reside en la relación entre datos, contexto y argumento.

La argumentación científica añade otra exigencia. Una afirmación debe conectarse con evidencia pertinente mediante un razonamiento explícito, reconocer límites y responder a alternativas. Kervinen y Aivelo (2023) observaron que estudiantes de 13 a 14 años podían mantener incertidumbre, imaginar alternativas y reformular metas en ciencia ciudadana ecológica. Pols et al. (2022) organizaron 19 comprensiones de evidencia a lo largo de fases que abarcan diseño, medición, procesamiento e interpretación. Ambas contribuciones desplazan la atención desde obtener “el dato correcto” hacia justificar por qué un conjunto de observaciones respalda —o no— una conclusión.

El papel docente resulta decisivo. El metaanálisis de Lazonder y Harmsen (2016) mostró que la guía favorece el aprendizaje por indagación. Con sensores, la orientación incluye ayudas técnicas y epistemológicas: acotar preguntas, anticipar variables, construir un procedimiento, distribuir roles, decidir cuándo recalibrar, examinar valores atípicos y exigir que una afirmación se apoye en evidencia. Una consigna abierta sin andamiaje puede convertir la clase en resolución de problemas de conexión; una receta cerrada puede reducirla a seguir instrucciones.

La equidad atraviesa la implementación. Los kits de bajo costo disminuyen barreras, pero no eliminan diferencias de conectividad, mantenimiento, experiencia previa, accesibilidad o participación. Ga et al. (2021) identificaron el riesgo de que pocos estudiantes monopolicen la técnica y el acceso a los datos. Si una persona conecta, otra programa y el resto observa, el producto grupal puede ocultar una distribución desigual de oportunidades para aprender. Por ello, la equidad debe examinar acceso a instrumentos, rotación de roles, tiempo para interpretar y formas alternativas de participación.

El currículo ecuatoriano de Ciencias Naturales para Educación General Básica promueve indagación, razonamiento hipotético-deductivo, argumentación y uso responsable de tecnologías y fuentes. Esta convergencia hace pertinente el laboratorio con sensores, pero no autoriza a afirmar que una experiencia internacional funcionará del mismo modo en Ecuador. En este expediente no existen datos escolares ecuatorianos ni una intervención ejecutada. La revisión informa un marco de diseño y evaluación, no resultados locales.

La pregunta fue: ¿qué evidencia publicada hasta el 28 de febrero de 2026 describe usos, resultados, mecanismos, limitaciones y condiciones de implementación de laboratorios e investigaciones escolares con sensores de bajo costo respecto de la indagación, alfabetización de datos y argumentación científica en secundaria básica y edades próximas? El objetivo fue mapear la evidencia, distinguir viabilidad de efectividad y proponer un modelo de implementación responsable y evaluable.

Métodos

Diseño y norma de reporte

Se realizó una revisión de alcance porque la literatura combina diseños escolares, ciencia ciudadana, desarrollo tecnológico, estudios cualitativos, comparaciones de laboratorio y revisiones técnicas. 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 registro de selección y la matriz se conservaron en el expediente SG-2026-013. No hubo registro prospectivo externo.

Elegibilidad

El marco PCC consideró como población principal a estudiantes de secundaria básica, aproximadamente entre 11 y 15 años, y docentes que mediaban su aprendizaje. Se aceptaron primaria superior o secundaria superior cuando el estudio aportaba un mecanismo directamente transferible. El concepto incluyó sensores de bajo costo, programables, ambientales o móviles usados para producir o interpretar datos dentro de una investigación escolar. Se incluyeron laboratorios físicos, ciencia ciudadana y configuraciones híbridas; usar datos de sensores sin manipular el dispositivo fue elegible cuando el proceso de indagación estaba descrito.

Los contextos comprendieron ciencias naturales, física, química, ambiente, geociencias y computación física conectada con una pregunta científica. Los desenlaces incluyeron conocimiento, indagación, alfabetización de datos, argumentación, incertidumbre, confianza, actitudes, participación, equidad y viabilidad. Se admitieron estudios experimentales, cuasiexperimentales, observacionales, cualitativos, mixtos, de diseño e implementación, además de síntesis o marcos indispensables. La ventana principal fue 2016–2026; fuentes anteriores se conservaron solo como antecedentes fundacionales. Se excluyeron educación superior, uso de dispositivos sin actividad científica, sensores industriales sin contexto escolar, opiniones sin datos y publicaciones posteriores al corte.

Fuentes y búsqueda

El 11 de agosto de 2026 se ejecutó una recuperación histórica limitada al 28 de febrero de 2026 mediante Crossref REST API. Diez consultas combinaron términos sobre sensores de bajo costo, Arduino, micro:bit, ciencia ciudadana, laboratorios escolares, aire, pH, indagación, alfabetización de datos, argumentación y educación secundaria. Cada consulta solicitó 60 artículos. La búsqueda se complementó con verificación por DOI, ERIC, páginas editoriales, rastreo de referencias y fuentes oficiales ecuatorianas. No se afirmó acceso exhaustivo a bases de suscripción.

Selección y extracción

Se recuperaron 600 registros y se deduplicaron 515 por DOI o título. El filtro temático automatizado dejó 24 candidatos. El rastreo dirigido agregó 16 informes pertinentes que la recuperación automatizada no había retenido. Se evaluaron 40 informes y se incluyeron 20 fuentes; 20 se excluyeron con motivo. Esta suma suplementaria se declara para evitar presentar el filtro automatizado como una búsqueda exhaustiva.

Se extrajeron año, país, diseño, muestra, dispositivo, papel docente, desenlaces, hallazgo principal, implicación de equidad, limitación, DOI y URL. Los estudios educativos se separaron de marcos, fuentes técnicas y guías metodológicas. La confianza interpretativa consideró comparador, tamaño, medición, transparencia y posibilidad de aislar el sensor del conjunto de actividades. No se calculó metaanálisis.

Resultados

Flujo y composición

La Tabla 1 presenta el flujo. La evidencia escolar se concentró en Norteamérica y Europa. Calidad del aire fue el dominio predominante, seguido por agua/pH, ecología y computación física. La diversidad de edades y métodos impidió una estimación común de efecto. No se identificó una evaluación ecuatoriana elegible.

Tabla 1. Flujo de selección

Etapa	n	Descripción
Registros recuperados	600	Diez consultas históricas en Crossref
Registros únicos	515	Deduplicación por DOI o título
Candidatos automatizados	24	Filtro temático amplio
Informes suplementarios	16	Rastreo dirigido de DOI, referencias y fuentes
Informes evaluados	40	Revisión detallada
Fuentes incluidas	20	Evidencia escolar, marcos, técnica y método
Informes excluidos	20	Motivo registrado en la matriz

Sensores como infraestructura para preguntar y medir

DaSH integra micro:bit, gator:bit y sensores en unidades de ciencias de grados medios (Chakarov et al., 2021). Su contribución principal consiste en reducir la distancia entre conectar un sensor, registrar datos y usarlos en una investigación. Ga et al. (2021) desarrollaron una arquitectura Arduino/Raspberry Pi con plataforma IoT para distribuir procedimientos y acceso a datos. SchoolAIR (2024) mostró una configuración de sensores DIY, conectividad y panel para calidad del aire interior. Estos trabajos sustentan viabilidad; no demuestran por sí solos ganancias causadas por el dispositivo.

El kit air:bit permitió a estudiantes construir, programar e investigar el aire local (Fjukstad et al., 2018). Seroy et al. (2020) llevaron la construcción más lejos: estudiantes calibraron sensores espectrofotométricos de pH y midieron agua local. En tres cursos se observaron ganancias de contenido y autoconfianza. El diseño pretest-postest sin control impide atribuir el cambio exclusivamente al sensor, pero muestra un mecanismo educativo relevante: construir y calibrar obliga a relacionar principio químico, instrumento, procedimiento y dato.

La comparación entre laboratorios virtuales aumentados y laboratorios físicos con sensores (Zacharia & Olympiou, 2016) advierte contra una oposición simple entre “real” y “virtual”. La representación, la secuencia de tareas y la discusión pueden ser tan importantes como la modalidad. El instrumento físico aporta materialidad y error auténtico; la simulación puede controlar variables y hacer visibles relaciones. Un diseño híbrido puede usar ambas funciones sin declarar una superioridad universal.

Resultados de aprendizaje y confianza

Los estudios con evaluación educativa ofrecieron señales favorables, pero de certeza limitada. Castell et al. (2021) trabajaron con 30 escuelas y 60 clases de cuarto grado; en 12 clases con medición pre-post aumentaron respuestas correctas y disminuyeron algunas concepciones erróneas sobre aire. Windleharth y Katagiri (2022) observaron en cuatro clases de ciencias marinas ganancias modestas de conocimiento y mayor confianza, sin cambio de interés. Grossberndt et al. (2021) informaron actitudes favorables hacia ciencia y ambiente, mientras el cambio conductual fue débil. Estos resultados impiden tratar conocimiento, confianza, interés y conducta como un único desenlace.

Las intervenciones fueron multicomponente: incluían talleres, problemas ambientales, discusión, docentes, visualizaciones y en ocasiones ciencia ciudadana. Por ello, una mejora posterior no identifica qué componente produjo el cambio. La lectura responsable es que un conjunto pedagógico apoyado por sensores puede producir oportunidades valiosas; demostrar cuánto añade el sensor requiere comparadores equivalentes, medidas externas y registro de fidelidad.

Ciencia ciudadana, autenticidad y participación

Varaden et al. (2021) involucraron a 258 niños de cinco escuelas, 30 docentes y 80 mochilas sensoras; el proyecto produjo alrededor de 490 millones de mediciones durante 2000 trayectos. La escala ilustra una ventaja: cada estudiante puede relacionar datos con su recorrido y exposición. Otu et al. (2024) co-diseñaron campañas en tres escuelas primarias de Londres. Estas experiencias acercan la investigación a decisiones del entorno y posicionan al alumnado como participante, no solo receptor.

La autenticidad no debe confundirse con participación profunda. Phillips et al. (2019) propusieron dimensiones cognitivas, afectivas, sociales, conductuales y motivacionales. Recolectar datos activa principalmente una contribución conductual; interpretar, cuestionar y decidir añade dimensiones cognitivas y sociales. Un proyecto escolar debería verificar quién formula preguntas, quién manipula, quién visualiza, quién argumenta y quién comunica. Rotar roles es necesario, pero no suficiente: cada rol debe tener contenido intelectual reconocible.

Alfabetización de datos, evidencia e incertidumbre

Las publicaciones de actividades con sensores de gases muestran que el contexto ambiental puede generar preguntas y datos relevantes (Delaine et al., 2021). El paso decisivo es examinar la procedencia del dato. Morawska et al. (2018) y Karagulian et al. (2019) documentaron variación de desempeño por sensor, contaminante, entorno y calibración. En el aula, esta limitación puede convertirse en contenido: comparar dos unidades, cotejar con una referencia, registrar temperatura y humedad, explicar valores perdidos y distinguir resolución de exactitud.

La rúbrica de comprensiones de evidencia de Pols et al. (2022) permite organizar esas decisiones en fases. Antes de medir, se define la variable y el rango esperado; durante la medición, se registran condiciones y cambios; después, se limpian datos sin ocultar decisiones, se visualizan patrones, se evalúan explicaciones y se comunica incertidumbre. Esta secuencia evita una práctica frecuente: presentar una gráfica terminada sin discutir cómo fue producida.

Kervinen y Aivelo (2023) mostraron que la incertidumbre puede gestionarse de forma productiva. Los estudiantes imaginaron explicaciones alternativas, mantuvieron reservas en el argumento y reformularon actividades. Esto sugiere que la calidad del pensamiento no se mide solo por llegar a una respuesta, sino por ajustar el grado de certeza a la evidencia. El docente puede solicitar formulaciones como “los datos son compatibles con...”, “la diferencia podría explicarse por...” y “sería necesario medir...”.

Andamiaje docente y organización del laboratorio

La síntesis de Lazonder y Harmsen (2016) respalda la guía en indagación. Con sensores, el andamiaje debe ser decreciente y explícito. Una primera experiencia puede ofrecer pregunta, procedimiento y plantilla de análisis; una segunda puede dejar abierta la ubicación o frecuencia de muestreo; una tercera puede exigir que el grupo diseñe y justifique el protocolo. La autonomía se construye, no se presupone.

La organización debe impedir el monopolio técnico señalado por Ga et al. (2021). Se proponen cuatro roles rotativos: responsable de instrumento, responsable de metadatos y calidad, analista/visualizador y argumentador/auditor. El último verifica que cada afirmación tenga evidencia, razonamiento y límite. Para estudiantes con discapacidad o menor experiencia técnica, las interfaces, tamaños de texto, contrastes, alternativas de entrada y tiempos deben planificarse antes de la actividad.

Modelo de implementación responsable

La síntesis produjo una cadena de siete decisiones. La Tabla 2 no es una estimación de efectividad, sino un modelo derivado de mecanismos y riesgos observados.

Tabla 2. Cadena de diseño y evidencia para un laboratorio escolar con sensores

Fase	Pregunta de control	Evidencia mínima	Riesgo que evita
Problema	¿La pregunta admite datos relevantes?	Variable, contexto y contraste definidos	Medir sin propósito
Instrumento	¿Qué mide y con qué limitaciones?	Rango, resolución, calibración y unidad	Tratar lectura como verdad
Protocolo	¿Cómo se hará comparable la medición?	Ubicación, tiempo, repeticiones y metadatos	Confundir cambio con procedimiento
Datos	¿Qué transformaciones se realizaron?	Archivo original y registro de limpieza	Ocultar decisiones
Análisis	¿El patrón es robusto y pertinente?	Visualización, variabilidad y anomalías	Elegir solo datos favorables
Argumento	¿La conclusión es proporcional?	Afirmación, evidencia, razonamiento y límite	Sobreinterpretación
Participación	¿Quién tuvo oportunidad de pensar?	Rotación y auditoría de contribuciones	Monopolio técnico

Discusión

Hallazgo principal

La revisión no sustenta la afirmación “los sensores mejoran el pensamiento científico” como efecto general. Sustenta una afirmación más precisa: los sensores de bajo costo pueden ampliar frecuencia, escala y autenticidad de la medición, y esas posibilidades pueden apoyar indagación, alfabetización de datos y argumentación cuando el diseño obliga a justificar la producción e interpretación de la evidencia. El mecanismo no es el dispositivo aislado, sino la cadena pregunta–instrumento–datos–argumento.

Esta distinción explica la heterogeneidad. Los estudios de diseño muestran viabilidad; los pretest-postest muestran cambios temporales compatibles con beneficio; los estudios cualitativos revelan procesos de incertidumbre; la ciencia ciudadana muestra participación y relevancia; las revisiones técnicas delimitan validez. Ningún estrato sustituye a los demás. Un ensayo podría estimar efecto sin explicar cómo se produjo; una observación cualitativa puede explicar el mecanismo sin estimar magnitud.

Implicaciones para secundaria básica

En secundaria básica, una progresión razonable comienza con fenómenos de respuesta visible y riesgo bajo: luz, temperatura, humedad, sonido o movimiento. Calidad del aire y pH requieren más atención a calibración y seguridad. Cada unidad debe conservar los datos originales, un diccionario de variables y un cuaderno de decisiones. La evaluación debería distinguir manejo técnico, calidad del protocolo, lectura de datos y fuerza del argumento.

Un diseño evaluativo mínimo podría comparar una secuencia habitual con una secuencia apoyada por sensores manteniendo iguales pregunta, tiempo y mediación. Debe medir conocimientos antes y después, usar una tarea de transferencia no idéntica a la práctica, valorar argumentos con rúbrica y registrar exposición real. El análisis debe informar medias y distribución: quién progresa, quién queda fuera de los roles centrales y qué fallas técnicas afectan oportunidades.

Para Ecuador, la alineación curricular es plausible, pero la infraestructura y la formación no pueden suponerse. Antes de una implementación amplia se necesita un piloto local con inventario de conectividad, seguridad eléctrica, disponibilidad de repuestos, idioma de interfaces y accesibilidad. El resultado de ese piloto debe presentarse como local, sin importar efectos internacionales.

Equidad e integridad de datos

“Bajo costo” es relativo. Debe incluir sensor, microcontrolador, cables, fuente, computador o teléfono, conectividad, repuestos, calibración y tiempo docente. El costo por grupo puede disminuir mediante estaciones rotativas, pero esa solución cambia la dosis y la participación. Reportar solo el precio del sensor subestima la intervención.

La integridad exige preservar archivos crudos, no borrar atípicos sin criterio, documentar fallas y proteger datos potencialmente sensibles. Sensores de ubicación, sonido o exposición personal pueden registrar información sobre movimientos o hábitos. Una actividad escolar debe minimizar datos, evitar identificación innecesaria y definir quién accede, por cuánto tiempo y con qué finalidad.

Limitaciones de la revisión

La búsqueda se ejecutó retrospectivamente en agosto de 2026, pero aplicó un corte documental de febrero de 2026. Crossref no sustituye bases temáticas y el acceso a bases cerradas no fue exhaustivo. Un solo equipo editorial realizó selección y extracción; no se calculó concordancia. Parte de la evidencia proviene de primaria o secundaria superior y se usa por transferibilidad, no por equivalencia. Varias publicaciones son descripciones o pruebas de concepto. Las medidas educativas son heterogéneas y frecuentemente autoinformadas. Las fuentes técnicas y metodológicas se incluyeron para interpretar medición y revisión, no como estudios de efectividad escolar.

Conclusiones

Los laboratorios con sensores de bajo costo ofrecen una vía realista para que estudiantes produzcan datos sobre fenómenos cercanos. Su contribución educativa depende de convertir la medición en una práctica argumentada: definir variables, calibrar, registrar contexto, visualizar, confrontar explicaciones y expresar incertidumbre. La evidencia disponible muestra viabilidad, participación auténtica y señales favorables en conocimiento o confianza, pero su certeza es limitada por diseños no aleatorizados y programas multicomponente.

La recomendación central es diseñar el laboratorio como una cadena auditable de decisiones y distribuir oportunidades intelectuales entre integrantes del grupo. Futuras evaluaciones deben emplear comparadores claros, tareas de transferencia, rúbricas de evidencia, datos originales, medidas de participación y análisis de equidad. Hasta disponer de investigación local, estas conclusiones deben orientar pilotos ecuatorianos, no presentarse como resultados obtenidos en el país.

Declaraciones

Financiación: La investigación no recibió financiación externa.

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

Contribuciones de autoría (CRediT): Luz Herminia Cueva-Camacho: 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. La matriz de extracción, el registro de cribado y las consultas reproducibles forman parte del expediente anonimizado SG-2026-013.

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

Referencias

- Castell, N., et al. (2021). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality awareness and education? *Frontiers in Climate*, 3, 639128. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.639128>
- Chakarov, A. G., et al. (2021). Data Sensor Hub (DaSH): A physical computing system to support middle grade science education. *Sensors*, 21(18), 6243. <https://doi.org/10.3390/s21186243>
- Delaine, D. A., et al. (2021). Air quality measurements and education: Improving environmental literacy through low-cost gas sensors. *Frontiers in Sensors*, 2, 657920. <https://doi.org/10.3389/fsens.2021.657920>
- Fjukstad, B., et al. (2018). Low-cost programmable air quality sensor kits in science education. In *Proceedings of the 49th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*. <https://doi.org/10.1145/3159450.3159569>
- Ga, Y., Cha, J., & Kim, S. (2021). Development of an IoT-based educational tool to support inquiry learning. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 17(2). <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i02.20089>
- Grossberndt, S., et al. (2021). High school students as citizen scientists to monitor air quality. *Atmosphere*, 12(6), 736. <https://doi.org/10.3390/atmos12060736>
- Iskander, M., & Kapila, V. (2012). A framework for introducing engineering and technology in K–12 education. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 138(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000085](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000085)
- Karagulian, F., et al. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Kervinen, A., & Aivelo, T. (2023). How students manage epistemic uncertainty in ecological citizen science. *Science Education*. <https://doi.org/10.1002/sce.21809>
- 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.). *Currículo de Ciencias Naturales*. <https://educacion.gob.ec/curriculo-ciencias-naturales/>
- Morawska, L., et al. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment. *Environment International*, 116, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Otu, A., et al. (2024). Empowering London primary schools to improve air quality through citizen science. *Sustainability*, 16(17), 7491. <https://doi.org/10.3390/su16177491>

- Peters, M. D. J., et al. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JB/Evidence Synthesis*, 18(10), 2119–2126. <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>
- Phillips, T., et al. (2019). Engagement in science through citizen science: Moving beyond data collection. *Science Education*, 103(3), 665–690. <https://doi.org/10.1002/sce.21501>
- Pols, C. F. J., Dekkers, P. J. J. M., & De Vries, M. J. (2022). What do they know? Investigating students' ability to analyse experimental data in relation to the understandings of evidence. *Physical Review Physics Education Research*, 18, 010111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010111>
- SchoolAIR Consortium. (2024). SchoolAIR: A citizen science IoT framework using low-cost sensors for indoor air quality. *Sensors*, 24(1), 148. <https://doi.org/10.3390/s24010148>
- Seroy, S. K., et al. (2020). High school students build and use low-cost sensors to measure environmental pH. *Journal of Geoscience Education*, 68(4), 334–344. <https://eric.ed.gov/?id=EJ1271457>
- Tricco, A. C., et al. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Varaden, D., et al. (2021). I am an air quality scientist: Children as research partners in air pollution research. *Environmental Research*, 201, 111536. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111536>
- Windleharth, T. W., & Katagiri, Y. (2022). Sensors, students, and self: Empowering high school students through environmental sensor data. *Sensors*, 22(4), 1534. <https://doi.org/10.3390/s22041534>
- Zacharia, Z. C., & Olympiou, G. (2016). Sensor-augmented virtual labs versus physical labs in science learning. *Journal of Science Education and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10956-015-9574-4>