

Chapter 1 / Capítulo 1



The Surnames of Education
ISBN: 978-9915-9928-4-6
DOI: 10.62486/978-9915-9928-4-6.Ch01
Pages: 1-37

© 2026 The authors. This is an open access
book chapter distributed under the terms of
the Creative Commons Attribution (CC BY)
4.0 License.

Science education: questioning, investigating and deciding with evidence

Educación científica: Preguntar, investigar y decidir con evidencia

Verenice Sánchez Castillo¹  

Edixon Chacón Guerrero²  

¹ Universidad de la Amazonia. Florencia, Colombia.

² Saint Mary's University. Texas, Estados Unidos.

ABSTRACT

Contemporary science education requires moving beyond the transmission of content and developing the ability to interpret claims, assess evidence, recognize uncertainty, and make justified decisions. This chapter examines scientific literacy as an integrated competence involving conceptual knowledge, inquiry practices, epistemic reasoning, and responsible participation in social and technological contexts. It analyzes the formulation of investigable questions, inquiry design, causal inference, evidence-based argumentation, experimentation, modeling, and STEM and STEAM approaches as means of turning learning into an active practice of constructing and revising knowledge. The public dimension of science is also addressed through science communication, critical data literacy, citizen science, and socioscientific issues, distinguishing between what evidence can support and what requires ethical or political deliberation. The chapter further considers the educational use of generative artificial intelligence, emphasizing the need to verify outputs, understand model limitations, and preserve human judgment. Cases and applied situations show that confidence should be proportional to the quality of available evidence and that science education should teach learners to revise conclusions when better data emerge. Overall, the chapter proposes a form of science education oriented toward questioning, investigating, arguing, deciding, and rationally correcting judgments so that knowledge can be transferred to academic, professional, and civic situations. Scientific literacy is therefore presented not as the accumulation of fixed answers, but as the disciplined capacity to use evidence, examine limits, and remain open to revision. The revision of beliefs is presented as an intellectual strength and as a condition for responsible participation in debates where science, technology, values, and public decisions intersect.

Keywords: scientific literacy; evidence; inquiry; critical thinking; artificial intelligence

RESUMEN

La educación científica contemporánea exige superar la transmisión de contenidos y desarrollar capacidades para interpretar afirmaciones, valorar evidencias, reconocer incertidumbres y tomar decisiones justificadas. Este capítulo examina la alfabetización científica como una competencia integrada por conocimiento conceptual, prácticas de indagación, razonamiento epistemológico y participación responsable en contextos sociales y tecnológicos. Se analizan la formulación de preguntas investigables, el diseño de indagaciones, la inferencia causal, la argumentación basada en evidencia, la experimentación, la modelización y los enfoques STEM y STEAM como medios para convertir el aprendizaje en una práctica activa de construcción y revisión del conocimiento. También se aborda la dimensión pública de la ciencia mediante la comunicación científica, la lectura crítica de datos, la ciencia ciudadana y los problemas sociocientíficos, distinguiendo entre lo que la evidencia permite afirmar y aquello que requiere deliberación ética o política. El capítulo incorpora además el uso educativo de la inteligencia artificial generativa, destacando la necesidad de verificar sus resultados, comprender los límites de los modelos y conservar capacidad de juicio. Los casos y aplicaciones muestran que la confianza debe ser proporcional a la calidad de la evidencia y que la formación científica debe enseñar a revisar conclusiones cuando aparecen mejores datos. En conjunto, se propone una educación científica orientada a preguntar, investigar, argumentar, decidir y corregir razonadamente, de modo que el conocimiento pueda transferirse a situaciones académicas, profesionales y ciudadanas. La revisión de creencias se presenta como una fortaleza intelectual y como condición para participar responsablemente en debates donde ciencia, tecnología, valores y decisiones públicas se entrecruzan.

Palabras clave: alfabetización científica; evidencia; indagación; pensamiento crítico; inteligencia artificial

INTRODUCCIÓN

Una parte creciente de la vida cotidiana exige tomar posición frente a afirmaciones que se presentan como científicas. Las personas deben decidir qué creer sobre una vacuna, un alimento, una noticia climática, una aplicación de inteligencia artificial, una prueba genética o un tratamiento. En muchos casos la dificultad principal no es la ausencia de información, sino su abundancia. Datos, gráficos, testimonios, videos y respuestas automáticas circulan con velocidades que superan la capacidad ordinaria de verificación. En ese escenario, educar científicamente significa preparar para distinguir evidencia de opinión, correlación de causalidad, consenso de autoridad y precisión de apariencia.

La alfabetización científica contemporánea se desplaza así desde el dominio de contenidos hacia una relación más compleja entre conocimientos, procedimientos, epistemología y decisión. El marco de ciencias de PISA 2025 refuerza esta orientación al reconocer competencias relacionadas con explicar fenómenos, construir y evaluar diseños de investigación e interpretar información y evidencia científica. El valor educativo de este enfoque está en hacer visible que la ciencia no es únicamente un conjunto de respuestas acumuladas; también es una forma disciplinada de producir preguntas, contrastar explicaciones y revisar conclusiones.

Esta ampliación plantea una tensión. Cuanto más se expande el repertorio de tecnologías educativas, más fácil resulta confundir acceso a herramientas con formación científica. Un estudiante puede generar un informe con inteligencia artificial, ejecutar una simulación o visualizar un modelo tridimensional sin comprender los supuestos que sostienen la representación. Del mismo modo, un docente puede incorporar plataformas digitales sin modificar la lógica transmisiva de su enseñanza. La tecnología amplía posibilidades, pero no reemplaza la construcción de criterios.

La educación científica tampoco puede reducirse a la preparación de futuras carreras STEM. Su relevancia excede el mercado laboral porque interviene en la deliberación pública. Cambio climático, biodiversidad, energía, salud pública, datos personales y automatización tecnológica contienen dimensiones técnicas y políticas. El ciudadano no necesita convertirse en especialista en cada campo, pero sí necesita reconocer cuándo una afirmación requiere evidencia, qué preguntas permiten examinarla y qué incertidumbres permanecen abiertas.

Este capítulo organiza la discusión alrededor de una idea central: una educación científica sólida debe convertir el conocimiento en capacidad de juicio. La secuencia que guía el capítulo es interpretar, juzgar, decidir, actuar, observar consecuencias y revisar. El último verbo es decisivo. La ciencia se distingue por su disposición a corregirse frente a nueva evidencia; una educación científica que no enseñe a revisar creencias reproduce información, pero no forma pensamiento científico.

El capítulo se organiza en seis acápites. El primero establece qué significa comprender la ciencia y por qué la alfabetización científica exige algo más que recordar conceptos. El segundo se concentra en la indagación, la argumentación y la calidad de la evidencia. El tercero examina el trabajo experimental, los laboratorios, los proyectos y los enfoques STEM/STEAM. El cuarto sitúa la ciencia en la vida pública mediante comunicación, ciencia ciudadana, alfabetización de datos, inclusión y conocimiento situado. El quinto aborda la inteligencia artificial como oportunidad y como nuevo problema de verificación. El sexto reúne casos, secuencias didácticas e instrumentos que permiten trasladar el argumento del capítulo a la práctica.

La lectura secuencial permite seguir la progresión completa del argumento, aunque el acápite de herramientas puede consultarse de manera independiente. El capítulo está dirigido a docentes, estudiantes, formadores, investigadores y lectores interesados en comprender cómo se construye y se evalúa evidencia en contextos educativos y cotidianos.

En ese marco, la educación científica se parece menos a una colección de respuestas que a una práctica de orientación. Cuando una persona entra en un territorio desconocido, un mapa puede ayudarlo, pero solo si sabe leer la escala, reconocer qué elementos fueron omitidos y contrastar la representación con lo que encuentra en el camino. Algo semejante ocurre con un gráfico epidemiológico, una predicción climática o una respuesta producida por inteligencia artificial: son representaciones útiles, pero su valor depende de comprender cómo se construyeron y qué parte de la realidad dejan fuera. La metáfora del mapa resulta pertinente porque recuerda que aprender ciencia exige usar representaciones sin confundirlas con el fenómeno mismo (National Research Council, 2012; Hodson, 2014).

Esta perspectiva permite comprender por qué la educación científica ha adquirido una dimensión pública que desborda el aula. Durante la pandemia de COVID-19, por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud describió una infodemia: una sobreabundancia de información, verdadera y falsa, que dificultaba a las personas reconocer qué recomendaciones merecían

confianza. El problema no era únicamente disponer de más datos; consistía en discriminar fuentes, comprender incertidumbres, reconocer cambios legítimos en la evidencia y distinguirlos de la manipulación deliberada (World Health Organization [WHO], 2020). Situaciones semejantes aparecen frente a la crisis climática, la seguridad alimentaria, los riesgos tecnológicos y el uso de algoritmos.

Por eso, el capítulo evita dos simplificaciones frecuentes. La primera identifica alfabetización científica con cultura general: conocer nombres, fechas o definiciones. La segunda la reduce a una destreza técnica reservada a quienes estudiarán carreras STEM. Entre ambos extremos se encuentra una capacidad más amplia: interpretar afirmaciones, preguntar de dónde provienen, examinar qué evidencia las sostiene, valorar su calidad, reconocer límites y decidir de manera proporcional a la incertidumbre disponible. Bybee (1997), Laugksch (2000), DeBoer (2000) y Roberts (2007) muestran que esta discusión tiene una historia larga; el presente añade nuevas condiciones tecnológicas y sociales.

La tesis que recorre las páginas siguientes parte de una idea sencilla: el conocimiento científico adquiere valor educativo cuando permite revisar el propio juicio. La persona científicamente alfabetizada no es quien nunca se equivoca, sino quien puede reconstruir por qué creyó algo, qué dato modificó su interpretación y qué nueva evidencia volvería a cambiarla. Esa disposición distingue una convicción examinada de una certeza rígida. En tiempos de respuestas instantáneas, enseñar a revisar puede ser más importante que enseñar a contestar con rapidez.

1.1. COMPRENDER LA CIENCIA

Alfabetización científica, evidencia e incertidumbre

Comprender ciencia exige algo más que recordar conceptos. Significa reconocer cómo se construye una afirmación, qué evidencia la sostiene, qué incertidumbre la acompaña y por qué una explicación puede cambiar sin que ese cambio vuelva irrelevante el conocimiento previo.

La educación científica comienza cuando el conocimiento deja de ser una lista de respuestas y se convierte en una forma de interpretar afirmaciones, reconocer incertidumbre, comparar explicaciones y revisar lo que se cree a la luz de nueva evidencia. La alfabetización científica ha evolucionado desde definiciones centradas en vocabulario y contenidos hacia enfoques que integran comprensión conceptual, prácticas científicas y capacidad de decisión. Ese desplazamiento puede observarse en trabajos clásicos y marcos contemporáneos que entienden la ciencia escolar como preparación para interpretar problemas reales, no únicamente para aprobar asignaturas (Laugksch, 2000; DeBoer, 2000; Bybee, 1997; Millar, 2006; Roberts, 2007; National Research Council, 2012; Lederman & Abell, 2014; OECD, 2025).

El recorrido histórico de la educación científica muestra que cada etapa ha intentado responder a una preocupación social distinta. Durante buena parte del siglo XX, la expansión de la escolarización y el desarrollo tecnológico impulsaron currículos centrados en dominar contenidos disciplinares. Más adelante, la discusión se desplazó hacia la capacidad de utilizar esos contenidos para interpretar problemas reales y participar en sociedades profundamente tecnificadas. Esa evolución explica por qué hoy resulta insuficiente definir la alfabetización científica como un inventario estable de conocimientos (DeBoer, 2000; Laugksch, 2000).

La transformación también responde a un cambio en la relación entre ciudadanía y experticia. Decisiones que antes quedaban en ámbitos especializados —vacunación, calidad del aire, uso de datos genéticos, tecnologías energéticas— forman ahora parte de debates cotidianos. La escuela no puede anticipar cada controversia futura, pero sí puede formar criterios transferibles: reconocer qué afirmaciones requieren evidencia, cómo se evalúa una fuente y qué grado de incertidumbre es razonable aceptar antes de decidir. Esa transferencia constituye uno de los rasgos más importantes de una educación científica duradera.

ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA: DE SABER CONTENIDOS A CONSTRUIR JUICIO

La preocupación por una ciudadanía capaz de comprender ciencia se consolidó durante el siglo XX a medida que los desarrollos tecnológicos modificaron economía, guerra, salud y ambiente. Con el tiempo, la alfabetización científica dejó de asociarse exclusivamente con preparación para carreras científicas y empezó a relacionarse con participación pública y vida cotidiana. Laugksch (2000) mostró que el concepto ha sido utilizado con significados diversos según quién lo define y con qué propósito. DeBoer (2000) también documentó su relación con

movimientos de reforma educativa. Esta diversidad explica por qué no existe una única medida universal de alfabetización científica.

La historia del concepto es útil porque evita tratar las competencias actuales como naturales o atemporales. Cada época selecciona problemas que considera prioritarios. Hoy, la inteligencia artificial, la crisis climática y la desinformación amplían el campo; mañana pueden aparecer nuevas exigencias. La alfabetización científica es una capacidad histórica que debe conservar principios de evidencia y revisión mientras adapta sus objetos. La expresión alfabetización científica ha cambiado de significado a medida que la ciencia pasó de ocupar un espacio especializado a mediar decisiones ordinarias. En su sentido más limitado, una persona alfabetizada sería aquella que domina conceptos elementales de física, química, biología o ciencias de la Tierra. Esa definición resulta insuficiente para sociedades en las que cualquier ciudadano recibe explicaciones científicas parciales a través de medios, plataformas digitales, publicidad y sistemas automatizados.

Una concepción más exigente integra conocimiento conceptual con conocimiento procedimental y epistemológico. Saber qué es una variable, una muestra, una relación causal o una incertidumbre de medida permite leer de otro modo los mensajes públicos. La alfabetización científica implica por tanto reconocer cómo se produce una afirmación, qué datos la respaldan, qué alternativas podrían explicarla y qué límites tiene su generalización. Esta perspectiva aproxima la educación científica a la formación ciudadana. Una persona puede recordar fórmulas y, aun así, aceptar una gráfica manipulada o una correlación engañosa. También puede desconocer detalles técnicos y, sin embargo, formular preguntas pertinentes sobre tamaño de muestra, fuente, método y conflicto de interés. La educación científica de calidad debe formar ambas dimensiones: conocimiento suficiente y hábitos de examen.

El desplazamiento desde contenidos hacia juicio no elimina el conocimiento disciplinar; cambia la función que cumple. Una persona necesita conceptos para interpretar fenómenos, pero necesita también saber cuándo esos conceptos son suficientes y cuándo debe buscar información adicional. Millar (2006) mostró que una propuesta de ciencia para el siglo XXI adquiere sentido cuando conecta conocimientos con situaciones en las que el ciudadano debe comprender información, evaluar riesgos y participar en decisiones. Roberts (2007) distingue precisamente entre una alfabetización centrada en mirar hacia dentro de la ciencia y otra orientada a usar ciencia en contextos sociales. Ambas son necesarias y se refuerzan mutuamente.

Esta relación puede explicarse mediante una analogía. Conocer palabras de un idioma no equivale a conversar en él. De la misma manera, memorizar términos científicos no garantiza que una persona pueda interpretar una controversia sobre vacunas, energía o contaminación. La competencia aparece cuando los conceptos se movilizan para hacer preguntas, comparar fuentes y construir una posición revisable. Bybee (1997) ya advertía que la alfabetización científica debía entenderse en grados y no como una condición binaria; hoy esa idea resulta todavía más relevante porque las situaciones cotidianas mezclan ciencia, tecnología, economía y valores.

El marco de ciencias de PISA 2025 refleja esta evolución al organizar la competencia alrededor de explicar fenómenos, evaluar diseños de investigación e interpretar datos y evidencia. Se trata de un marco evaluativo, no de una receta pedagógica, pero su formulación ayuda a observar un cambio de énfasis: saber ciencia incluye comprender cómo se produce y usa evidencia (OECD, 2025). El desafío para la escuela consiste en traducir esta aspiración en experiencias donde el estudiante haga algo más que reconocer la respuesta correcta.

Desde esta perspectiva, el aula de ciencias necesita abandonar la idea de que la explicación docente cierra un tema. Una explicación puede ser el punto de partida para preguntar qué observaciones la respaldan, con qué otras explicaciones compite y bajo qué condiciones dejaría de ser suficiente. Esa dinámica aproxima la enseñanza a la lógica real del conocimiento científico y reduce la distancia entre aprender un contenido y aprender a pensar con él (Crawford, 2014; National Research Council, 2012).

El debate sobre alfabetización científica también obliga a distinguir entre acceso a información y capacidad para usarla. Internet ha reducido el costo de encontrar definiciones, videos y bases de datos, pero esa abundancia no elimina la necesidad de seleccionar, comparar y contextualizar. Laugsch (2000) advertía que la alfabetización científica depende del propósito con que se define; en el presente, uno de esos propósitos es permitir que la ciudadanía navegue entornos donde la información disponible supera ampliamente el tiempo y la experticia para revisarla toda.

Esta condición modifica el rol del docente. Si antes una parte importante de su autoridad provenía de controlar el acceso al contenido, hoy su función se desplaza hacia la organización de criterios: qué diferencia una fuente primaria de una secundaria, qué significa que un hallazgo

sea replicable, cómo se reconoce un consenso provisional y por qué una excepción llamativa no invalida automáticamente una regularidad bien establecida. DeBoer (2000) y Roberts (2007) permiten leer este cambio como una continuación del debate histórico sobre para qué se enseña ciencia.

También cambia la relación entre saber y actuar. Una persona puede comprender el mecanismo de una enfermedad y aun así tomar una mala decisión si interpreta incorrectamente el riesgo; puede conocer el cambio climático y subestimar una gráfica engañosa; puede dominar conceptos estadísticos y aceptar una afirmación porque coincide con sus preferencias. La educación científica necesita entonces articular conocimiento con hábitos de examen y con una disposición a revisar. Esa combinación explica por qué la competencia científica es simultáneamente cognitiva, epistemológica y práctica.

EVIDENCIA, INCERTIDUMBRE Y MODELOS: CÓMO SE SOSTIENE UNA EXPLICACIÓN

La imagen escolar de la ciencia suele presentar trayectorias lineales: problema, hipótesis, experimento, resultado y conclusión. La práctica científica real es más iterativa. Los investigadores reformulan preguntas, descartan instrumentos, discuten interpretaciones, encuentran resultados contradictorios y revisan supuestos. Enseñar esa dinámica ayuda a comprender que la incertidumbre no es sinónimo de ignorancia, sino una propiedad que puede describirse y administrarse. Comprender la naturaleza de la ciencia protege frente a dos extremos. El primero es el cientificismo, que presenta cualquier enunciado acompañado de terminología técnica como verdad indiscutible. El segundo es el relativismo, que interpreta la provisionalidad científica como evidencia de que todas las opiniones tienen el mismo valor. Entre ambos extremos se encuentra una idea más rigurosa: el conocimiento científico es revisable, pero su grado de confiabilidad depende de métodos, convergencia de evidencia, replicación y crítica especializada.

El conocimiento conceptual responde qué entidades, relaciones y modelos utiliza una disciplina. El procedimental permite decidir cómo observar, medir y analizar. El epistemológico explica por qué determinados procedimientos producen evidencia y qué criterios permiten juzgar una explicación. Los tres niveles se necesitan mutuamente. Un estudiante puede conocer la definición de densidad y aplicar una fórmula sin comprender cómo diseñar una medición fiable. También puede ejecutar un procedimiento correctamente sin entender por qué se repite una medida o se controla una variable. La integración de niveles convierte ejercicios aislados en prácticas científicas.

Esta clasificación ayuda a diseñar currículo y evaluación. Cada unidad puede preguntar no solo “qué debe saber el estudiante”, sino “qué debe poder hacer con ese conocimiento” y “qué debe comprender sobre cómo se justifica”. El resultado es una enseñanza menos fragmentada. La ciencia trabaja mediante modelos: diagramas, ecuaciones, simulaciones, analogías y representaciones que simplifican aspectos de un fenómeno. Aprender ciencias implica aprender a usar modelos y también reconocer que ninguno reproduce la realidad en todos sus detalles.

Cuando los estudiantes comparan modelos pueden analizar qué variables incluye cada uno, qué predicciones permite y dónde falla. Esta práctica evita tratar diagramas escolares como imágenes literales. Un modelo del átomo, del clima o de un ecosistema es una herramienta explicativa construida para determinados propósitos. Las tecnologías digitales multiplican las representaciones disponibles. La visualización interactiva permite modificar parámetros y observar consecuencias, pero también puede ocultar supuestos. La pregunta científica sigue siendo qué representa el modelo, con qué evidencia se valida y hasta dónde puede extrapolarse.

Aprender sobre ciencia implica también aprender cómo se construyen y se comparan representaciones. Modelos, gráficos y explicaciones no son copias del mundo; son herramientas para pensar, con alcances y límites específicos. La investigación en educación científica ha mostrado que hacer explícitas estas prácticas ayuda a diferenciar aprender contenidos, aprender sobre la ciencia y hacer ciencia (Hodson, 2014).

El carácter provisional del conocimiento suele interpretarse de manera equivocada. En lenguaje cotidiano, provisional puede sonar a débil o poco confiable. En ciencia ocurre lo contrario: una explicación es fuerte cuando especifica qué evidencia la apoya y permanece abierta a revisión si aparecen mejores datos. La posibilidad de corregirse constituye una fuente de confiabilidad, no una falla. Lederman y Abell (2014) han insistido en que comprender la naturaleza de la ciencia implica reconocer su base empírica, su dimensión inferencial, su carácter social y su capacidad de revisión.

Los modelos hacen visible esta condición. Un modelo climático, una simulación molecular

o un diagrama de ecosistema seleccionan relaciones relevantes y omiten otras. Funcionan como mapas: permiten orientarse precisamente porque simplifican. El problema aparece cuando se olvida la escala y se trata el mapa como si fuera el territorio. Hodson (2014) distingue entre aprender ciencia, aprender sobre ciencia y hacer ciencia; esa distinción ayuda a entender por qué utilizar un modelo exige discutir también qué supone, qué predice y dónde puede fallar.

En el aula, la incertidumbre puede trabajarse de forma explícita. Dos grupos que obtienen medidas distintas no necesariamente demuestran que el experimento salió mal. La discrepancia puede abrir preguntas sobre instrumentos, tamaño de muestra, condiciones de medición o variabilidad natural. Cuando la enseñanza convierte cada diferencia en error que debe ocultarse, transmite una imagen irreal de la práctica científica. Cuando la convierte en objeto de análisis, permite comprender cómo se construye la confianza en los resultados (Coleman et al., 2023).

Las representaciones científicas adquieren autoridad porque permiten anticipar, comparar y explicar, pero esa autoridad siempre es condicional. Un modelo epidemiológico puede orientar políticas sin predecir exactamente cada caso; un modelo climático puede describir tendencias robustas mientras conserva incertidumbre sobre impactos locales; una simulación escolar puede ilustrar un principio y omitir fricciones presentes en el mundo real. Aprender a preguntar para qué sirve este modelo resulta más productivo que decidir si el modelo es simplemente correcto o incorrecto (National Research Council, 2012).

Esta forma de lectura ayuda a comprender por qué los desacuerdos científicos no tienen todos el mismo significado. Algunas discrepancias reflejan datos insuficientes; otras, decisiones metodológicas razonables; otras, conflictos teóricos que todavía no se resuelven. La existencia de desacuerdo no significa ausencia de conocimiento. La tarea educativa consiste en mostrar cómo se distribuye el grado de confianza y por qué determinadas conclusiones pueden considerarse robustas aun cuando permanezcan preguntas abiertas.

Una dimensión adicional es la construcción del consenso. En la comunicación pública suele imaginarse que un consenso científico significa que todos los especialistas piensan exactamente lo mismo. En realidad, el consenso suele aparecer cuando diferentes métodos, equipos y líneas de evidencia convergen suficientemente como para sostener una conclusión de trabajo. Persisten discusiones sobre mecanismos, magnitudes o excepciones, pero esas discusiones no obligan a reiniciar desde cero. Comprender esta dinámica ayuda a interpretar por qué la ciencia puede conservar desacuerdos internos y, al mismo tiempo, ofrecer recomendaciones razonablemente firmes.

Esta idea resulta esencial frente a estrategias retóricas que presentan cualquier disenso como prueba de que la ciencia no sabe. La incertidumbre legítima tiene estructura: se expresa en intervalos, escenarios, supuestos y preguntas abiertas. La desinformación, en cambio, suele utilizar una incertidumbre parcial para desacreditar el conjunto. La alfabetización científica permite preguntar si el punto discutido afecta realmente la conclusión principal o si se trata de una diferencia secundaria dentro de un marco ampliamente respaldado.

La confianza pública no depende únicamente de resultados correctos. También depende de que los procedimientos puedan ser examinados, de que los conflictos de interés se hagan visibles y de que los cambios de recomendación sean explicados. Cuando una institución modifica una conclusión porque dispone de nueva evidencia, la comunicación debe mostrar qué cambió y por qué. De otro modo, una corrección científica puede interpretarse como contradicción o incompetencia.

Para la educación, el aprendizaje es directo: los estudiantes necesitan experimentar situaciones donde una conclusión provisional sea revisada de manera explícita. Si todas las actividades escolares terminan confirmando lo que el libro ya decía, la ciencia aparece como un ritual de comprobación. Cuando una investigación obliga a modificar una idea inicial, el estudiante vive una dimensión más auténtica del conocimiento científico.

El papel de la experticia merece una discusión propia. La alfabetización científica no pretende que cada ciudadano pueda sustituir a un especialista, del mismo modo que saber leer un plano no convierte a una persona en arquitecta. Su función es permitir reconocer qué tipo de experticia se necesita, qué señales hacen confiable a una comunidad profesional y cómo interpretar desacuerdos entre especialistas. La competencia ciudadana consiste en evaluar la estructura de la justificación sin fingir que toda persona posee el mismo nivel de conocimiento técnico.

Esa diferencia entre participación y sustitución ayuda a evitar un falso dilema frecuente: obedecer ciegamente a la autoridad o rechazarla por completo. Una relación madura con la ciencia combina confianza provisional y capacidad de preguntar. El ciudadano puede aceptar una recomendación porque proviene de un proceso experto robusto y, al mismo tiempo, exigir

transparencia sobre datos, conflictos de interés y criterios de revisión.

Una consecuencia pedagógica de todo lo anterior es que la profundidad no puede medirse por la cantidad de conceptos introducidos. Un tema alcanza madurez cuando el estudiante puede relacionar definición, evidencia, límites y aplicación. Por eso, trabajar durante varias páginas sobre un mismo concepto no constituye repetición si cada vuelta añade una dimensión distinta: origen histórico, mecanismo, ejemplo, contraejemplo, aplicación y condición de revisión. La ciencia escolar gana coherencia cuando las ideas reaparecen en contextos nuevos en lugar de ser abandonadas después de una definición breve.

Esta forma de progresión también mejora la paráfrasis académica. Parafrasear no es sustituir palabras de un autor por sinónimos; es reconstruir una idea dentro del argumento propio, relacionarla con otras fuentes y explicar qué función cumple. Cuando Laugksch, DeBoer, Bybee y Roberts aparecen en una misma discusión, el lector puede observar continuidad, diferencias y evolución conceptual. La cita deja de ser un respaldo decorativo y se convierte en parte de una conversación intelectual.

THERANOS: CUANDO PARECER CIENTÍFICO NO EQUIVALE A ESTAR VALIDADO

El caso de Theranos permite observar con claridad la diferencia entre apariencia de innovación y evidencia validada. La empresa prometía realizar numerosos análisis clínicos a partir de pequeñas gotas de sangre y fue presentada durante años como un ejemplo de disrupción tecnológica. En 2018, la Securities and Exchange Commission acusó a la compañía y a sus principales directivos de haber realizado afirmaciones falsas o exageradas sobre el desempeño de su tecnología y señaló que gran parte de las pruebas de pacientes se realizaban en analizadores comerciales convencionales, no en el dispositivo propietario que sostenía la narrativa pública de la empresa (U.S. Securities and Exchange Commission [SEC], 2018).

Para la educación científica, el interés del caso no reside en reconstruir una historia empresarial de fraude, sino en examinar cómo una narrativa tecnocientífica puede adquirir credibilidad antes de que la evidencia sea accesible y contrastable. El prestigio de inversionistas, la cobertura mediática, la estética de laboratorio y la promesa de transformar la medicina funcionaron como señales sociales de confianza. Sin embargo, ninguna de esas señales sustituía preguntas básicas: ¿qué ensayos de validación independientes existían?, ¿qué precisión tenía el sistema?, ¿qué resultados se habían comparado con métodos estándar?, ¿qué parte de la tecnología podía ser auditada por terceros?

El caso funciona como una analogía de muchas situaciones cotidianas. Una afirmación puede llegar acompañada de gráficos, palabras técnicas o una institución prestigiosa y seguir necesitando examen. La alfabetización científica enseña precisamente a separar la fuente de autoridad del proceso de justificación. La pregunta central no es quién dice algo, sino qué cadena de evidencia permite sostenerlo y qué controles reducen la posibilidad de error o sesgo. Esa distinción no elimina la importancia de la experiencia experta; la sitúa dentro de un sistema de validación más amplio.

También permite discutir un principio que atraviesa toda la obra: la confianza científica es institucional y procedimental. Se construye mediante protocolos, comparación, replicación, revisión y posibilidad de escrutinio. Cuando esos mecanismos se debilitan, la retórica de innovación puede ocupar el lugar de la prueba. En el aula, un análisis del caso puede llevar a que el estudiante reconstruya qué evidencia habría sido necesaria antes de aceptar las promesas, qué datos deberían ser públicos y qué señales habrían permitido distinguir una innovación prometedora de una afirmación todavía insuficientemente demostrada.

En la práctica científica, la fuerza de una conclusión rara vez depende de una sola pieza de evidencia. Se parece más a una red: observaciones, experimentos, modelos, comparaciones y replicaciones se sostienen entre sí. Una evidencia aislada puede ser llamativa; varias líneas independientes que convergen reducen la probabilidad de que el patrón sea producto de un error particular. Esta idea de convergencia ayuda a superar la expectativa escolar de encontrar una prueba definitiva para cada afirmación.

Las jerarquías de evidencia, muy utilizadas en campos como la medicina, pueden ser útiles si se entienden con cautela. Un ensayo controlado responde bien ciertas preguntas causales, mientras un estudio observacional puede ser imprescindible cuando experimentar sería imposible o poco ético. La pregunta adecuada no es qué diseño ocupa siempre el nivel más alto, sino qué diseño resulta más pertinente para la afirmación que se intenta sostener. Enseñar esta relación entre pregunta y evidencia evita convertir el método científico en una lista rígida de pasos.

CIENCIA, DECISIONES Y RESPONSABILIDAD PÚBLICA

Los problemas sociocientíficos permiten trasladar el conocimiento a situaciones en las que valores, intereses y evidencia interactúan. Cambio climático, vacunación, energía nuclear, edición genética o minería no se resuelven únicamente con un dato. Exigen comprender evidencia y, además, deliberar sobre riesgos, distribución de costos, justicia y prioridades colectivas. El propósito educativo no es convertir la clase de ciencias en un espacio de adhesión a una posición predeterminada. El desafío es enseñar a construir argumentos explícitos, separar premisas empíricas de juicios de valor y reconocer cuándo dos personas discrepan por evidencia diferente y cuándo lo hacen por criterios normativos distintos.

Los problemas sociocientíficos muestran con especial claridad que una decisión puede contener simultáneamente componentes empíricos y normativos. El campo ha desarrollado marcos para enseñar a razonar en controversias donde la evidencia importa, pero no elimina por sí sola las preguntas sobre valores, riesgos o justicia (Sadler, 2004; Zeidler et al., 2005; Kolstø, 2001). Los problemas científicos contemporáneos involucran decisiones éticas. Editar genes, utilizar animales, almacenar datos biométricos o desplegar sistemas de reconocimiento facial exige más que conocimiento técnico. La educación científica debe enseñar a distinguir preguntas empíricas de preguntas normativas y a reconocer dónde se intersectan.

La ética no debe aparecer únicamente al final de un tema como complemento. Puede integrarse desde el diseño de investigaciones: consentimiento, privacidad, impacto ambiental, distribución de riesgos y responsabilidad sobre resultados. Esta integración muestra que la práctica científica ocurre dentro de instituciones y sociedades. Formar juicio ético no significa imponer una respuesta uniforme. Significa ofrecer herramientas para identificar actores afectados, consecuencias previsibles, derechos, incertidumbres y conflictos de valores. El razonamiento científico aporta información; la deliberación ética orienta decisiones.

Los problemas sociocientíficos muestran que la evidencia rara vez llega sola a la decisión. Una política energética puede apoyarse en datos sobre emisiones y costos, pero la elección también involucra criterios de equidad, seguridad, autonomía y distribución territorial de impactos. Zeidler et al. (2005) y Sadler (2004) subrayan que estos problemas son pedagógicamente valiosos precisamente porque obligan a articular razonamiento científico con dimensiones éticas y sociales.

Esta articulación evita una confusión frecuente: pensar que reconocer valores debilita la objetividad. La objetividad no exige fingir que las decisiones carecen de intereses o consecuencias; exige diferenciar con claridad qué parte de un argumento depende de evidencia empírica y qué parte expresa una preferencia normativa. Kolstø (2001) propone herramientas para tratar dimensiones científicas de controversias ciudadanas sin convertir la clase en adoctrinamiento. El estudiante aprende a identificar qué desacuerdos pueden resolverse buscando mejores datos y cuáles requieren deliberación sobre prioridades.

El resultado es una concepción más exigente de responsabilidad. Una persona científicamente alfabetizada no solo pregunta si una afirmación es verdadera; pregunta también qué consecuencias tiene actuar sobre ella, quién asume el riesgo, qué incertidumbres persisten y qué mecanismos permiten revisar la decisión. Esa secuencia conecta conocimiento y ciudadanía sin convertir la ciencia en árbitro absoluto de la vida social.

1.2 PREGUNTAR, INVESTIGAR Y ARGUMENTAR

De la indagación a la inferencia causal

Investigar comienza mucho antes de recoger datos. Empieza al transformar una inquietud general en una pregunta que pueda ser examinada y continúa al decidir qué observaciones serían capaces de apoyar, debilitar o modificar una explicación.

La ciencia escolar se vuelve intelectualmente significativa cuando el estudiante puede pasar de una afirmación a una pregunta investigable, de los datos a una inferencia y de una conclusión inicial a una revisión razonada. La literatura sobre indagación coincide en que la autonomía del estudiante no elimina el acompañamiento docente. Formular buenas preguntas, diseñar procedimientos, interpretar resultados y argumentar requieren andamiajes que se retiran gradualmente a medida que aumenta el dominio de las prácticas científicas (Pedaste et al., 2015; Dobber et al., 2017; Crawford, 2014; Dolenc & Kazanis, 2020).

DE LA PREGUNTA AL DISEÑO DE INDAGACIÓN

El aprendizaje por indagación reorganiza la clase alrededor de preguntas que pueden ser investigadas. No todas las preguntas cumplen esa función. Algunas demandan definiciones; otras requieren comparar condiciones, establecer relaciones o evaluar explicaciones. La labor docente consiste en transformar curiosidad en problemas suficientemente acotados para que los estudiantes puedan buscar evidencia y construir inferencias. La revisión de Dobber et al. (2017) mostró que el papel del docente sigue siendo decisivo en la educación basada en indagación. El acompañamiento efectivo no desaparece cuando el alumno asume mayor protagonismo; cambia de forma. El profesor modela preguntas, provee andamiajes, ayuda a interpretar datos y evita que la autonomía se transforme en desorientación.

Crawford (2014) propone desplazar la mirada desde una noción genérica de indagación hacia prácticas científicas más concretas. Formular modelos, diseñar mediciones, argumentar con evidencia, analizar errores y comunicar resultados hacen visible qué significa participar en la producción de conocimiento. Esta transición tiene consecuencias para la evaluación. Una prueba que solo solicita recordar conceptos puede medir una fracción pequeña de la competencia científica. Evaluar prácticas exige tareas en las que el estudiante interprete información, justifique decisiones metodológicas, compare explicaciones o determine qué evidencia adicional necesitaría.

El razonamiento experimental no se limita a ejecutar instrucciones. Diseñar comparaciones justas, anticipar resultados, identificar variables y explicar por qué una observación cuenta como evidencia son capacidades centrales. Estudios de evaluación del razonamiento científico han mostrado la utilidad de hacer visibles estas decisiones durante la enseñanza (Coleman et al., 2023).

Una buena pregunta científica tiene una arquitectura. Delimita un fenómeno, anticipa qué podría observarse y hace posible imaginar resultados diferentes. Pedaste et al. (2015) muestran que la indagación puede organizarse en fases —orientación, conceptualización, investigación, conclusión y discusión—, pero estas fases no constituyen una secuencia rígida. La investigación real retrocede, reformula y vuelve a medir. Presentarla como receta fija puede ser útil para iniciar, aunque debe superarse a medida que aumenta la autonomía del estudiante.

El acompañamiento docente resulta decisivo en ese tránsito. Dobber et al. (2017) encuentran que la indagación exige intervenciones pedagógicas específicas: modelar preguntas, ofrecer andamiajes, ayudar a interpretar datos y sostener espacios de reflexión. La autonomía no consiste en dejar al estudiante solo; consiste en retirar apoyos progresivamente a medida que desarrolla criterios propios. Esa distinción explica por qué algunas actividades etiquetadas como indagación terminan siendo instrucciones abiertas sin una verdadera construcción de conocimiento.

Un diseño investigativo puede entenderse como una negociación con la realidad. Cada medición acepta ciertas simplificaciones: define variables, establece unidades y deja factores fuera. El rigor no elimina esas decisiones; las hace explícitas. Crawford (2014) propone hablar de prácticas científicas para enfatizar que investigar incluye modelizar, planear, medir, argumentar y comunicar. La pregunta educativa entonces cambia de ¿hicieron el experimento? a ¿qué decisiones metodológicas tomaron y qué implicaciones tuvieron para la conclusión?

La calidad de una investigación depende en buena medida de la relación entre la pregunta y el diseño. Una muestra enorme no corrige una pregunta mal formulada; un instrumento sofisticado no compensa una variable definida de manera ambigua. Esa relación puede trabajarse en el aula pidiendo al estudiante que justifique no solo qué hará, sino por qué ese procedimiento puede responder la pregunta. El cambio parece pequeño, pero convierte el protocolo en argumento metodológico.

Las prácticas de repetición y replicación aportan otra capa de profundidad. Repetir una medición dentro del mismo grupo ayuda a estimar variabilidad; replicar implica que otro grupo o equipo intente obtener resultados comparables de manera independiente. La distinción permite discutir por qué la ciencia confía más en resultados que resisten múltiples contrastes que en hallazgos aislados. Coleman et al. (2023) muestran que estas competencias de diseño e interpretación pueden enseñarse y evaluarse explícitamente.

En ese sentido, la indagación no debería terminar cuando aparece un resultado esperado. La coincidencia entre predicción y dato puede deberse a que la explicación es buena, pero también a casualidad, sesgo de confirmación o un diseño que no permitía resultados alternativos. Preguntar qué habría contado como evidencia en contra obliga a construir investigaciones genuinamente contrastables.

DATOS, CAUSALIDAD Y RIESGO

El pensamiento crítico en ciencias no equivale a desconfiar sistemáticamente. Consiste en ajustar el grado de confianza a la calidad de la evidencia. Una fuente puede ser confiable para describir un procedimiento y débil para justificar una conclusión causal. Un estudio puede estar correctamente ejecutado y, aun así, responder una pregunta distinta de la que el lector quiere resolver. Las intervenciones de indagación contextualizada han mostrado potencial para fortalecer pensamiento crítico cuando conectan problemas científicos con situaciones significativas. Pursitasari et al. (2020) reportaron mejoras en habilidades de pensamiento crítico mediante aprendizaje por indagación basado en contexto. La relevancia del hallazgo reside menos en una receta única y más en el mecanismo: el estudiante debe utilizar conceptos para explicar situaciones y defender decisiones.

Una de las dificultades más frecuentes en la interpretación pública de ciencia consiste en transformar correlaciones en causas. Dos variables pueden moverse juntas por coincidencia, por una tercera variable o porque existe una relación causal directa. La educación científica debe enseñar a formular estas alternativas antes de aceptar una explicación. Los diseños experimentales aportan herramientas para fortalecer inferencias causales, pero no todos los fenómenos pueden estudiarse mediante experimentos controlados. En epidemiología, clima o ecología se utilizan diseños observacionales, series temporales, modelos y triangulación de evidencia. Comprender esta diversidad evita creer que solo el experimento clásico produce conocimiento válido.

Una estrategia didáctica efectiva consiste en presentar titulares correlacionales y pedir hipótesis alternativas. El estudiante aprende a preguntar por mecanismos, temporalidad, grupos comparables y variables de confusión. Esta práctica tiene impacto directo en la lectura de publicidad, salud y debates públicos. La ciencia informa muchas decisiones mediante probabilidades. Sin embargo, las personas suelen interpretar de manera distinta un riesgo expresado como porcentaje, frecuencia natural o cambio relativo. La educación científica puede mejorar decisiones si enseña a convertir representaciones y distinguir riesgo absoluto de riesgo relativo.

Una reducción del cincuenta por ciento parece enorme, pero su significado depende del punto de partida. Pasar de dos casos por cada diez mil a uno por cada diez mil representa la misma reducción relativa que pasar de veinte a diez, pero las implicaciones prácticas son distintas. Trabajar con estos ejemplos muestra por qué el contexto numérico importa. La alfabetización de riesgo también exige considerar consecuencias. Una decisión puede ser racional aun cuando no garantice un resultado, porque se toma bajo incertidumbre y pondera probabilidades, beneficios, costos y valores. La ciencia aporta estimaciones; la decisión integra además preferencias y responsabilidades.

Los datos no hablan por sí solos. Son huellas producidas por un procedimiento de observación y adquieren significado dentro de una pregunta. Una misma serie puede sugerir explicaciones distintas si cambia el denominador, el periodo o la población de referencia. Esta idea es central para la alfabetización científica porque gran parte de la comunicación pública transforma datos en titulares antes de que el lector conozca cómo fueron obtenidos.

La diferencia entre correlación y causalidad es uno de los puntos donde ese salto resulta más visible. Observar que dos variables se mueven juntas puede orientar una investigación, pero no establece por sí mismo qué produce qué. La inferencia causal necesita temporalidad, mecanismos plausibles, control de explicaciones alternativas y, cuando es posible, diseños experimentales. En epidemiología, ecología o ciencias sociales, donde el control completo rara vez es posible, la confianza surge de la convergencia entre distintos tipos de evidencia.

El razonamiento de riesgo añade otra capa. Una reducción relativa puede sonar dramática aunque el riesgo absoluto cambie poco; una probabilidad pequeña puede seguir siendo relevante si la consecuencia es catastrófica. Enseñar estas diferencias permite evitar decisiones guiadas únicamente por porcentajes llamativos. La educación científica ayuda a preguntar por frecuencia, gravedad, exposición y posibilidad de mitigación antes de convertir un número en recomendación.

La discusión sobre causalidad también abre la puerta a la reproducibilidad. Un resultado aislado puede ser interesante; un resultado que otros equipos obtienen mediante procedimientos comparables adquiere mayor fuerza. Esta lógica no significa que toda réplica deba producir números idénticos. Las diferencias entre muestras, contextos e instrumentos forman parte de la evaluación. Lo importante es observar si el patrón general resiste el contraste o si depende de condiciones demasiado particulares.

La ciencia abierta ha reforzado estas preguntas al promover datos, códigos y procedimientos

accesibles cuando las condiciones éticas lo permiten. Para el aula, el principio puede adaptarse de manera sencilla: registrar con suficiente detalle para que otro grupo pueda reconstruir lo que se hizo. Una práctica de laboratorio gana profundidad cuando otro equipo intenta repetirla y debe resolver ambigüedades del protocolo. La trazabilidad se convierte en criterio de calidad.

La estadística aporta herramientas para describir incertidumbre, pero puede convertirse en una caja negra si se limita a aplicar fórmulas. Una media resume una distribución; un intervalo expresa un rango compatible con los datos y supuestos; una prueba estadística no decide por sí sola si un resultado es importante. La educación científica debería relacionar cada técnica con la pregunta que intenta responder para evitar una cultura de números que parece rigurosa sin comprender su significado.

En decisiones reales, además, la relevancia práctica puede diferir de la significancia estadística. Un efecto muy pequeño puede resultar estadísticamente detectable en una muestra enorme y seguir siendo poco importante para una persona o una política. Por el contrario, un efecto potencialmente grave puede requerir atención aun cuando la evidencia inicial sea limitada. Aprender a distinguir magnitud, precisión y consecuencia fortalece el razonamiento de riesgo.

El razonamiento de riesgo es especialmente útil para conectar matemáticas y ciencias. Una probabilidad nunca existe en el vacío: se refiere a un evento, una población, un horizonte temporal y unas consecuencias. Expresar el riesgo en frecuencias naturales —por ejemplo, uno de cada mil— suele facilitar la comprensión frente a porcentajes relativos sin base. En salud, ambiente e ingeniería, la misma probabilidad puede llevar a decisiones distintas si cambia la gravedad del resultado o la posibilidad de mitigarlo.

La alfabetización científica madura incluye además la capacidad de distinguir ausencia de evidencia de evidencia de ausencia. Un estudio que no encuentra un efecto puede haber tenido una muestra insuficiente o un instrumento poco sensible; en otros casos, múltiples estudios consistentes permiten reducir razonablemente la expectativa de un efecto relevante. Este matiz evita interpretar cada resultado nulo como demostración definitiva y cada resultado positivo como prueba concluyente.

El análisis causal puede enriquecerse preguntando por mecanismos. Si una relación estadística tiene una explicación causal plausible, debería ser posible describir una cadena de procesos que conecte las variables. Cuando no existe un mecanismo claro, la asociación puede seguir siendo útil, pero la conclusión debe formularse con mayor cautela. Esa proporcionalidad entre evidencia y lenguaje es una habilidad central del discurso científico.

El sesgo de confirmación ofrece un puente entre psicología y educación científica. Las personas tienden a buscar y recordar información compatible con sus expectativas, por lo que una investigación bien diseñada necesita crear oportunidades para encontrar resultados que contradigan la hipótesis. Formular de antemano qué observación contaría en contra de una explicación es una forma sencilla de proteger el proceso contra esa tendencia.

Los resultados negativos también tienen valor. Una hipótesis que no recibe apoyo puede ayudar a descartar mecanismos, mejorar instrumentos o reformular preguntas. Cuando la escuela premia únicamente encontrar el resultado correcto, incentiva a ocultar datos incómodos y reproduce una cultura contraria a la investigación. Aprender a documentar un resultado inesperado fortalece integridad y pensamiento crítico.

VOLKSWAGEN: LA MEDICIÓN QUE FUE DISEÑADA PARA ENGAÑAR

En septiembre de 2015, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos informó que determinados vehículos diésel de Volkswagen incorporaban software capaz de reconocer cuándo estaban siendo sometidos a pruebas de emisiones. Durante el ensayo, el sistema activaba controles que reducían emisiones; en conducción normal, esos controles disminuían y los vehículos podían emitir óxidos de nitrógeno muy por encima de los límites permitidos. La EPA señaló que algunos modelos llegaban a emitir hasta cuarenta veces el estándar aplicable (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2015).

El caso resulta pedagógicamente potente porque muestra que la calidad de una medición depende del sistema completo, no solo del instrumento. Un ensayo puede ser técnicamente correcto y, aun así, producir una representación falsa si el objeto medido modifica su comportamiento al detectar la prueba. En términos científicos, el problema obliga a discutir validez externa: ¿el resultado del laboratorio representa lo que ocurre en condiciones reales? La pregunta trasciende la industria automotriz y aparece en evaluaciones educativas, pruebas de software, ensayos clínicos y estudios de comportamiento.

También permite examinar la diferencia entre error y manipulación. Un error experimental puede surgir de limitaciones honestas del procedimiento; la manipulación introduce intencionalmente una condición que hace que los datos respalden una imagen engañosa. La educación científica necesita formar sensibilidad frente a ambas posibilidades. Pedir replicación independiente, comparar datos de laboratorio con observaciones de campo y revisar supuestos de medición son prácticas que fortalecen la inferencia.

El aprendizaje más importante no consiste en recordar la cifra de emisiones, sino en comprender que cualquier dato contiene una historia de producción. ¿Quién midió?, ¿en qué condiciones?, ¿qué sabía el sistema de medición?, ¿qué diferencias existían entre el escenario de prueba y el uso real? Convertir esas preguntas en hábitos de lectura protege frente a una cultura que suele presentar los números como si fueran transparentes.

HIDROITUANGO: CAUSALIDAD E INCERTIDUMBRE EN UN SISTEMA COMPLEJO

La contingencia de Hidroituango en 2018 permite estudiar cómo se construye una explicación causal en un sistema de ingeniería complejo. La noticia de Portafolio ofrece una entrada a la cronología (Acosta, 2019); el contraste puede continuar con el boletín que EPM publicó el 1 de marzo de 2019 y el informe complementario de SkavaConsulting. EPM presentó como hipótesis más probable la erosión de zonas débiles del piso de la Galería Auxiliar de Desviación, vinculada con el paso del agua y un tratamiento insuficiente. Skava delimitó su análisis a esa galería y excluyó los sucesos posteriores al 30 de abril de 2018 y las demás obras del proyecto (Empresas Públicas de Medellín [EPM], 2019; SkavaConsulting, 2019, pp. 4–6). Una explicación sobre el taponamiento debe conservar esos límites: no constituye, por sí sola, una explicación de todas las consecuencias de la contingencia ni una decisión sobre responsabilidades jurídicas.

Los sistemas complejos enseñan una lección importante sobre causalidad: el evento visible suele ser el último eslabón de una cadena. La pregunta ¿qué causó la emergencia? puede tener respuestas en distintos niveles: un mecanismo físico inmediato, una decisión de ingeniería previa, un problema de comunicación o una combinación de factores. En el aula, este tipo de caso permite comparar explicaciones monocausales con explicaciones sistémicas y mostrar por qué una investigación técnica necesita reconstruir temporalidad, interacciones y condiciones de borde.

También permite trabajar incertidumbre sin convertirla en improvisación. Cuando existe riesgo para comunidades, la decisión debe tomarse antes de conocer cada detalle. El razonamiento científico aplicado exige actualizar escenarios a medida que llega información, distinguir lo probable de lo posible y comunicar qué parte de la explicación está confirmada y cuál sigue abierta. Esta manera de pensar resulta transferible a salud pública, gestión del riesgo y decisiones ambientales.

EXPEDIENTE DE EVIDENCIA: DISTINGUIR MECANISMO, ALCANCE Y RESPONSABILIDAD

El expediente puede organizarse con tres piezas identificables: la noticia de Acosta (2019), el Avance informativo No. 124 de EPM (2019) y el Informe complementario del análisis de causa raíz física de SkavaConsulting (2019). La primera permite examinar el relato periodístico; la segunda, la comunicación pública de la entidad que encargó el estudio; la tercera, la argumentación técnica y sus límites. La autoría y la relación institucional de cada documento forman parte de la lectura: una fuente primaria aporta acceso directo a una afirmación, pero ese carácter no elimina la necesidad de contrastarla.

El informe complementario distingue hipótesis examinadas, factores contribuyentes y causa física probable; además, separa consideraciones de construcción y de diseño (SkavaConsulting, 2019, pp. 4 y 38–39). Para utilizarlo en el aula, cada equipo debe formular una afirmación acotada y registrar qué fragmento la sostiene. Después compara una explicación centrada en un mecanismo inmediato con otra que reconstruya interacciones entre condiciones geológicas, flujo y decisiones técnicas. El producto es una nota que indique conclusión, evidencia, explicación alternativa y pregunta pendiente. Quedan abiertas las afirmaciones que exigirían documentos adicionales; el ejercicio no transforma una hipótesis técnica en un fallo judicial.

El control de calidad científico incluye además procesos sociales como la revisión por pares. La revisión no garantiza que un estudio sea correcto, pero obliga a exponer decisiones metodológicas y argumentos al escrutinio de otros especialistas. Puede detectar errores, pedir

análisis adicionales o señalar interpretaciones demasiado fuertes. Presentarla como un sello infalible sería tan problemático como ignorar su función. La educación científica puede usarla para explicar que la confiabilidad emerge de controles acumulativos y no de una autoridad única.

Algo semejante ocurre con la confiabilidad de las mediciones. Un instrumento puede ser preciso —producir valores muy próximos entre sí— y, sin embargo, estar sistemáticamente desplazado respecto al valor real. Diferenciar precisión y exactitud permite comprender por qué calibrar, comparar instrumentos y documentar condiciones de medición son prácticas centrales. Este tipo de distinción adquiere sentido cuando se conecta con casos reales y no cuando aparece como una definición aislada.

ARGUMENTAR, REVISAR Y APRENDER DEL ERROR

La argumentación convierte datos en razones. En el aula, la estructura afirmación–evidencia–razonamiento resulta útil porque obliga a explicitar el vínculo entre lo observado y lo concluido. Sin esa mediación, los estudiantes pueden producir resultados correctos sin comprender por qué apoyan una explicación. Aprender a argumentar también implica reconocer contraargumentos y condiciones bajo las cuales una explicación dejaría de ser suficiente. Esta práctica introduce una ética intelectual: sostener una idea con firmeza proporcional a la evidencia y estar dispuesto a revisarla.

La argumentación científica es una práctica de aprendizaje, no un adorno discursivo. Las aulas que hacen explícita la relación entre afirmaciones, datos y justificaciones crean mejores condiciones para examinar ideas y construir normas compartidas de discusión (Driver et al., 2000; Osborne, 2010). La calidad de una argumentación científica depende tanto de la evidencia utilizada como de la conexión explícita entre evidencia y conclusión. Presentar datos no basta si el razonamiento que los relaciona con una afirmación permanece implícito. La estructura afirmación-evidencia-razonamiento ayuda a hacer visible esa conexión.

Una argumentación madura incorpora condiciones de validez. En lugar de afirmar que un resultado demuestra definitivamente una explicación, el estudiante puede indicar que la evidencia la apoya bajo ciertas condiciones y que existen alternativas no descartadas. Este lenguaje no representa debilidad; refleja precisión epistemológica. Las discusiones en grupo permiten practicar esta habilidad cuando se establecen normas de crítica a ideas y no a personas. El desacuerdo se convierte en una herramienta para mejorar explicaciones. La clase aprende que cambiar de opinión frente a mejor evidencia es una fortaleza intelectual.

Pensar científicamente incluye observar el propio razonamiento. La metacognición permite al estudiante identificar qué entiende, qué supone y qué necesita comprobar. Antes de una investigación puede anticipar resultados; durante el proceso puede revisar estrategias; después puede comparar predicciones con evidencia. Los diarios de laboratorio y protocolos de reflexión son útiles cuando no se reducen a formalidades. Preguntas como “¿qué cambió en mi explicación?”, “¿qué dato fue decisivo?” o “¿qué error volvería a evitar?” obligan a reconstruir el aprendizaje y hacen visible el proceso de revisión.

La metacognición adquiere nueva importancia con IA generativa. Si una herramienta propone rápidamente una solución, el estudiante necesita reconocer qué parte comprende de manera autónoma. Pedirle que explique sin asistencia, transfiera a un problema nuevo o identifique supuestos permite diferenciar apoyo de dependencia. La indagación contextualizada puede fortalecer el pensamiento crítico cuando obliga a usar conceptos para explicar situaciones, contrastar información y justificar decisiones. Este mecanismo ha sido documentado en experiencias de aprendizaje por indagación basada en contexto (Pursitasari et al., 2020).

Argumentar científicamente es una forma de hacer visible el razonamiento. Driver et al. (2000) mostraron que la cultura del aula necesita normas que permitan criticar ideas sin convertir el desacuerdo en ataque personal. Osborne (2010) profundizó esta idea al señalar que el discurso crítico y colaborativo puede transformar la argumentación en una herramienta para aprender, no simplemente en una manera de presentar resultados ya decididos.

Una afirmación fuerte se parece a un puente: los datos son uno de sus pilares, pero el razonamiento es la estructura que permite pasar de un lado al otro. Acumular datos sin explicar por qué apoyan una conclusión produce un puente incompleto. Del mismo modo, una explicación elegante sin evidencia suficiente puede parecer sólida y fallar al primer contraste. Esta metáfora ayuda a que el estudiante comprenda que la calidad argumentativa depende tanto de la evidencia como del vínculo lógico que la convierte en razón.

La revisión cierra el ciclo. Cuando una hipótesis falla, el aprendizaje no consiste en borrar

el intento y escribir la respuesta esperada. Consiste en documentar qué supuesto resultó insuficiente y qué cambió en la explicación. Los diarios de indagación y las discusiones posteriores al experimento adquieren valor cuando registran ese movimiento intelectual. La metacognición permite distinguir entre haber producido una respuesta y comprender por qué se considera válida.

1.3 EXPERIMENTAR, MODELAR Y CREAR

Laboratorios, proyectos y evaluación auténtica

El trabajo práctico adquiere valor cuando transforma una idea en algo que puede ponerse a prueba. Manipular materiales, ejecutar una simulación o construir un prototipo no constituyen por sí mismos aprendizaje científico; se convierten en aprendizaje cuando obligan a predecir, observar, comparar, explicar y revisar.

Experimentar no significa únicamente manipular materiales. Significa construir una situación en la que una idea pueda ponerse a prueba, registrar qué ocurre y utilizar el resultado para sostener, modificar o abandonar una explicación. El trabajo práctico conserva un lugar central en la educación científica cuando conecta acción con interpretación. La evidencia disponible respalda el valor del laboratorio y de los proyectos cuando existen objetivos cognitivos claros, andamiaje y oportunidades de explicar resultados (Shana & Abulibdeh, 2020; Bybee et al., 2006). En paralelo, los enfoques STEM/STEAM han ampliado la conexión entre investigación, diseño y solución de problemas, aunque la integración efectiva exige algo más que juxtaponer disciplinas (Boice et al., 2024).

EL LABORATORIO COMO ESPACIO DE RAZONAMIENTO

El laboratorio escolar suele asociarse con manipulación de instrumentos, pero su valor educativo depende de la relación entre acción y explicación. Seguir instrucciones sin tomar decisiones puede producir destreza procedimental con baja comprensión. Por ello, la práctica experimental necesita momentos explícitos de predicción, registro, interpretación y discusión. Shana y Abulibdeh (2020) muestran la relevancia del trabajo práctico en el aprendizaje de las ciencias. La literatura contemporánea extiende esta discusión hacia entornos híbridos en los que laboratorios físicos y virtuales pueden cumplir funciones complementarias.

La cultura escolar suele penalizar el error, mientras la práctica científica lo utiliza para aprender sobre instrumentos, supuestos y procedimientos. Una medición que se desvía de lo esperado puede revelar problemas de calibración, variabilidad natural o una hipótesis incompleta. Cuando el estudiante solo busca reproducir un resultado conocido, pierde la oportunidad de interpretar anomalías. El laboratorio puede reorganizarse alrededor de preguntas sobre discrepancia: ¿por qué dos grupos obtuvieron valores diferentes?, ¿qué fuentes de error son aleatorias y cuáles sistemáticas?, ¿qué modificación del procedimiento permitiría decidir entre explicaciones alternativas? Estas preguntas convierten el error en objeto de análisis y fortalecen la comprensión de incertidumbre.

Esta perspectiva es especialmente importante en laboratorios virtuales. Una simulación puede producir resultados demasiado limpios y generar una imagen idealizada de la experimentación. Combinar simulaciones con datos reales permite mostrar que los modelos representan el mundo bajo condiciones controladas, mientras la observación empírica incorpora ruido, límites y contingencias. Los laboratorios virtuales permiten repetir procedimientos, variar parámetros, representar fenómenos no observables directamente y reducir barreras asociadas a infraestructura o seguridad. Su principal ventaja no es reemplazar el laboratorio físico, sino ampliar las posibilidades de exploración.

Las revisiones recientes señalan que la efectividad depende del diseño del andamiaje. Una simulación rica en estímulos puede aumentar la carga cognitiva si el estudiante no sabe qué observar. La guía procedimental, la retroalimentación y la relación con modelos conceptuales siguen siendo necesarias. El principio pedagógico es claro: la interactividad no garantiza comprensión.

Una práctica de laboratorio puede ser muy activa y, al mismo tiempo, intelectualmente pobre. El estudiante puede medir, mezclar o registrar durante una hora y salir sin haber tomado una sola decisión científica. Hodson (2014) advierte que aprender a hacer ciencia demanda oportunidades para diseñar, interpretar y justificar, no solo para seguir protocolos. Por eso, el

grado de apertura de una experiencia debe definirse en función del objetivo y de la experiencia previa del grupo.

El error experimental permite observar la diferencia entre actividad y razonamiento. Cuando dos resultados no coinciden, la pregunta productiva es qué tipo de discrepancia apareció. Un error aleatorio sugiere repetir o aumentar observaciones; un error sistemático obliga a revisar instrumento o diseño; un resultado inesperado puede cuestionar la hipótesis. Coleman et al. (2023) muestran que imaginar, diseñar e interpretar experimentos puede evaluarse de forma explícita y no quedar escondido detrás de la nota final del informe.

Los laboratorios virtuales amplían ese repertorio, sobre todo cuando permiten explorar condiciones costosas, peligrosas o difíciles de observar. Su principal fortaleza aparece al variar parámetros rápidamente y hacer visibles relaciones que en el laboratorio físico pueden permanecer ocultas. Su debilidad surge cuando la simulación se percibe como realidad sin discutir qué supuestos contiene. El aprendizaje más potente aparece al comparar ambos entornos y preguntar qué puede mostrar cada uno que el otro no muestra.

El laboratorio también es un espacio para aprender sobre instrumentos. Un termómetro, un sensor de pH o una balanza no entregan la realidad; producen lecturas dentro de un rango, con una resolución y unas condiciones de calibración. Discutir estos límites permite que el estudiante comprenda por qué dos dispositivos pueden producir valores distintos sin que uno de ellos esté necesariamente averiado. La medición se vuelve entonces un problema epistemológico y no solo técnico.

En química, física o biología, muchas discrepancias significativas aparecen cuando el estudiante compara una predicción ideal con un sistema real. Las pérdidas de energía, la contaminación de una muestra, la variabilidad biológica o las limitaciones del equipo obligan a explicar por qué el mundo se aparta del modelo. Ese momento suele ser más formativo que obtener el valor esperado en la primera medición.

Los laboratorios virtuales son especialmente útiles para separar variables y visualizar procesos, pero deben combinarse con una discusión explícita de sus supuestos. Una simulación puede permitir experimentar cientos de veces sin costo ni riesgo; el laboratorio físico devuelve fricción, ruido e incertidumbre. La comparación entre ambos entornos enseña que toda representación ilumina ciertos aspectos y oscurece otros.

El trabajo práctico también permite discutir la relación entre observación y teoría. Ningún estudiante observa un fenómeno desde una neutralidad absoluta: decide qué medir, qué comparar y qué considera relevante a partir de conceptos previos. Por ello, el laboratorio no debe presentarse como un espacio donde los hechos hablan solos, sino como un escenario donde las observaciones adquieren significado al ser interpretadas mediante modelos. Esta relación entre teoría y evidencia ayuda a comprender por qué dos investigadores pueden mirar el mismo conjunto de datos y formular preguntas diferentes.

El docente puede hacer visible esa relación mediante actividades de predicción. Antes de medir, el estudiante anticipa qué espera encontrar y por qué; después compara la predicción con los datos. La distancia entre ambas no se trata como simple equivocación, sino como información sobre el modelo utilizado. Este procedimiento transforma la experiencia práctica en una conversación entre expectativa, observación y explicación, y fortalece la comprensión de la ciencia como proceso de construcción y revisión.

PROYECTOS, SIMULACIONES Y PENSAMIENTO COMPUTACIONAL

El aprendizaje basado en proyectos ofrece un puente entre ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas cuando la tarea exige integrar conocimiento para producir una solución verificable. El metaanálisis de Zhang et al. (2024) encontró efectos favorables del aprendizaje basado en proyectos sobre pensamiento computacional, aunque la magnitud de los resultados depende de diseño, duración y características de implementación. El pensamiento computacional no debe confundirse con aprender un lenguaje de programación. Incluye descomposición de problemas, identificación de patrones, abstracción, diseño de procedimientos y evaluación de soluciones. Estas capacidades dialogan con la indagación científica porque ambas exigen representar problemas y someter soluciones a prueba.

La incorporación de artes en STEAM pretende ampliar formas de representación, diseño y creatividad. Su valor depende de que la integración sea auténtica. Añadir un componente visual a una actividad científica no produce por sí mismo una experiencia transdisciplinar. La integración ocurre cuando distintos lenguajes disciplinarios modifican la forma en que se formula y resuelve

el problema.

Las experiencias con robótica, dispositivos físicos y aprendizaje basado en desafíos permiten desarrollar diseños iterativos. El prototipo falla, se revisa, vuelve a probarse y genera evidencia sobre la solución. Ese ciclo convierte el error en información, una idea profundamente científica. Las estrategias lúdicas pueden aumentar motivación y persistencia cuando se articulan con objetivos cognitivos claros. La literatura reciente sobre aprendizaje basado en juegos en ciencias naturales encuentra efectos positivos en motivación, autoeficacia y rendimiento, pero también heterogeneidad entre estudios.

El criterio editorial de este capítulo es evitar una lectura simplista. Gamificar no es sumar puntos y recompensas; implica diseñar decisiones, retroalimentación y progresión de dificultad que mantengan al estudiante cognitivamente activo. El juego educativo fracasa cuando la mecánica ocupa el lugar del problema científico.

El aprendizaje basado en proyectos gana profundidad cuando exige decisiones verificables. Diseñar un sistema de captación de agua, estimar islas de calor o construir un sensor de calidad del aire obliga a relacionar conceptos, medición, modelización y criterios de solución. Para comprobar qué aprendió cada participante, conviene pedir que justifique una decisión del proyecto y después la adapte a una condición nueva. Así se distingue la apropiación de un procedimiento de la capacidad para transferirlo.

El pensamiento computacional aporta una lógica complementaria a la indagación: descomponer, abstraer, identificar patrones, diseñar procedimientos y probar soluciones. Esa lógica aparece incluso cuando no hay programación. Un estudiante que decide qué variables incluir en un modelo de crecimiento poblacional ya está practicando abstracción; quien compara diferentes reglas de un modelo está explorando cómo los supuestos cambian los resultados.

La transdisciplinariedad STEAM adquiere sentido cuando las disciplinas modifican mutuamente la solución. Boice et al. (2024) muestran que no existe una única manera de implementar STEAM. El arte puede intervenir en representación, experiencia, diseño y comunicación; la ingeniería puede obligar a traducir principios en restricciones; las matemáticas permiten cuantificar y comparar. El riesgo aparece cuando se acumulan áreas sin una pregunta común y el proyecto termina siendo una suma de actividades desconectadas.

El valor de un proyecto se observa también en la transferencia. Un estudiante puede resolver una tarea conocida porque recuerda el procedimiento utilizado por el docente y fracasar cuando cambia el contexto. Transferir significa reconocer una estructura común detrás de problemas diferentes. Por eso, después de un proyecto conviene proponer una situación nueva que conserve principios científicos pero cambie materiales, escala o propósito. La explicación del estudiante revela entonces si comprendió el mecanismo o solo la secuencia de pasos.

La motivación merece una lectura similar. Gamificación, robótica o dispositivos novedosos pueden aumentar interés inicial, pero el interés sostenido depende de sentir que se progresa en una tarea significativa. Las recompensas externas pueden ayudar a iniciar, aunque no sustituyen la experiencia de comprender algo que antes resultaba difícil. El diseño pedagógico debe usar la novedad como entrada y trasladar gradualmente el centro hacia el problema científico.

Las actividades STEAM pueden ser especialmente fértiles cuando permiten representar un mismo fenómeno con lenguajes diferentes. Un patrón de ondas puede expresarse mediante ecuaciones, gráficos, sonido y formas visuales; un problema de contaminación puede requerir mediciones, diseño de soluciones y comunicación pública. La integración no ocurre porque aparezcan varias asignaturas en el horario, sino porque ninguna de ellas puede resolver por sí sola la pregunta planteada.

El prototipo representa una forma especialmente fértil de pensamiento porque materializa una hipótesis. Construir un dispositivo obliga a decidir qué relaciones del modelo deben traducirse en dimensiones, materiales o código. Cuando el prototipo falla, el error deja de ser abstracto: aparece como una señal de que alguna relación fue mal comprendida o alguna condición fue omitida. La iteración convierte entonces la construcción en investigación.

En proyectos escolares, el riesgo es enamorarse del producto y dejar de examinar la ciencia que lo sostiene. Una maqueta vistosa puede ocultar una explicación débil; un artefacto simple puede contener un razonamiento sofisticado. Por eso, la evaluación debe pedir que el estudiante conecte cada decisión de diseño con un principio científico y que identifique qué prueba realizó para comprobar su funcionamiento. El valor del producto reside en la evidencia que permitió generarlo y revisarlo.

STEAM, INCLUSIÓN Y EVALUACIÓN AUTÉNTICA

La participación en ciencia está condicionada por expectativas sociales, experiencias tempranas y acceso diferencial a recursos. Las brechas de género, territorio y nivel socioeconómico no se explican únicamente por rendimiento académico. También intervienen la percepción de pertenencia, los modelos de referencia disponibles y la forma en que la ciencia es representada en la escuela. Un currículo inclusivo puede ampliar ejemplos de contribuciones científicas, diversificar problemas y ofrecer múltiples formas de participación sin reducir la exigencia intelectual. La inclusión auténtica se observa cuando más estudiantes pueden formular preguntas, manipular evidencia, liderar investigaciones y reconocerse como capaces de producir conocimiento.

El enfoque de capital científico resulta útil para comprender estas diferencias. No todos los estudiantes llegan con las mismas redes, conversaciones familiares o experiencias extracurriculares. La escuela puede actuar compensatoriamente creando acceso a laboratorios, museos, proyectos, mentorías y comunidades científicas. Los proyectos científicos alcanzan mayor valor cuando plantean problemas que no admiten una solución predeterminada. Diseñar un sistema de captación de agua, estimar exposición a calor urbano o analizar desperdicio alimentario exige integrar conceptos, datos, restricciones y decisiones de diseño. La complejidad obliga a negociar criterios y revisar propuestas.

El riesgo del aprendizaje por proyectos aparece cuando la producción del artefacto desplaza la comprensión científica. Por ello, cada proyecto debe incluir momentos de explicitación conceptual: qué principios explican el funcionamiento, qué datos permiten evaluar desempeño, qué variables deberían controlarse y qué incertidumbres persisten. La evaluación del proyecto puede combinar calidad de solución, rigor del proceso y capacidad de transferencia. Un estudiante demuestra comprensión cuando puede explicar por qué una estrategia funcionó, bajo qué condiciones dejaría de funcionar y cómo adaptaría el modelo a otro contexto.

La evaluación determina en buena medida qué aprenden los estudiantes a considerar importante. Si todas las pruebas privilegian recuerdo de definiciones, la enseñanza tenderá a concentrarse en memoria. Una evaluación auténtica incorpora tareas en las que el estudiante debe interpretar evidencia, proponer procedimientos, justificar decisiones o comunicar conclusiones a públicos distintos. Las rúbricas pueden valorar dimensiones separadas: precisión conceptual, calidad de evidencia, razonamiento, consideración de alternativas, comunicación y revisión. Esta estructura permite distinguir entre un estudiante que llega a una conclusión correcta por intuición y otro que construye un argumento sólido aunque cometa un error menor de cálculo.

La evaluación auténtica también es compatible con el uso responsable de IA. En lugar de prohibir toda herramienta, pueden diseñarse tareas que exijan documentar decisiones, comparar versiones, explicar cambios y defender oralmente el razonamiento. El producto final deja de ser la única evidencia del aprendizaje. La evaluación puede acompañar la transformación de la enseñanza cuando observa no solo respuestas finales, sino procesos de investigación, explicación y revisión. Este giro conecta con propuestas de evaluación formativa en ciencias y con debates actuales sobre cómo evitar que una sola medida reduzca la complejidad del aprendizaje (Earle, 2023; Tytler et al., 2025; Wang et al., 2025).

La inclusión en ciencia no se resuelve únicamente abriendo la puerta del laboratorio. Las oportunidades de participar están mediadas por experiencias previas, recursos, expectativas familiares y formas de reconocimiento. El enfoque de capital científico propuesto por Archer y desarrollado en educación primaria por Nag Chowdhuri et al. (2022) permite observar que la escuela puede ampliar repertorios, referentes y conversaciones que ayudan a más estudiantes a imaginarse como participantes legítimos de la ciencia.

Evaluar auténticamente implica observar la calidad del proceso. Una respuesta correcta puede provenir de memorización, ensayo y error o comprensión profunda; una respuesta incorrecta puede contener un razonamiento valioso que solo falla en un supuesto. Las rúbricas que separan precisión conceptual, calidad de evidencia, razonamiento, alternativas y revisión hacen visible esa diferencia. Esta perspectiva es especialmente importante cuando existen herramientas de IA capaces de producir productos finales sofisticados sin que el aprendizaje sea equivalente.

El propósito de la evaluación cambia entonces de verificar si el estudiante llegó a la conclusión prevista a examinar cómo llegó, qué decisiones tomó y qué haría frente a evidencia contradictoria. La evaluación formativa puede acompañar ese proceso mediante retroalimentación sobre preguntas, diseños, interpretaciones y argumentos. Earle (2023) muestra cómo la evaluación en ciencias puede integrarse a la práctica y no limitarse a una prueba separada del aprendizaje.

Los proyectos complejos ofrecen una oportunidad para trabajar iteración. La primera solución rara vez es la mejor; el prototipo produce información sobre lo que no se había previsto.

En ingeniería y diseño, fallar pronto puede ser una ventaja si el fallo ocurre en condiciones seguras y se documenta. La educación científica puede aprovechar esta lógica para desplazar la cultura escolar donde corregir equivale a ocultar el error.

La iteración también permite discutir criterios múltiples. Una solución puede ser técnicamente eficaz y económicamente inviable; ambientalmente favorable y socialmente inequitativa; precisa pero difícil de mantener. El pensamiento STEAM gana profundidad cuando los estudiantes deben hacer explícitos los criterios con los que comparan alternativas y reconocer que optimizar una dimensión puede empeorar otra.

Esta forma de trabajo acerca la ciencia al territorio. Diseñar un sistema de ahorro de agua o medir microclimas escolares obliga a negociar con restricciones reales: presupuesto, tiempo, materiales, clima y usuarios. La solución deja de ser un ejercicio abstracto y se convierte en una propuesta que debe defenderse frente a evidencia y condiciones concretas.

La seguridad forma parte del razonamiento experimental. Elegir reactivos, equipos, escalas y procedimientos implica anticipar riesgos y decidir qué controles son necesarios. Presentar la seguridad como una lista externa de reglas reduce su potencial formativo. Integrarla al diseño permite discutir probabilidad, consecuencia y responsabilidad, conceptos que luego pueden transferirse a ingeniería, salud y ambiente.

La ética experimental aparece incluso en proyectos escolares aparentemente simples. Fotografiar personas, registrar ubicaciones, recolectar datos de salud o intervenir organismos exige considerar consentimiento, privacidad y posibles daños. Introducir estas preguntas desde etapas tempranas muestra que hacer ciencia no es únicamente lograr resultados, sino asumir responsabilidad por la forma en que se obtienen.

En ese contexto, la evaluación auténtica necesita reconocer decisiones colectivas e individuales. Un proyecto grupal puede ocultar que solo una persona realizó el razonamiento central. Breves defensas individuales, diarios de decisiones o comparaciones entre versiones permiten observar apropiación personal sin desmontar el valor de la colaboración. La evaluación deja de competir con el proyecto y se integra a él.

1.4 CIENCIA, SOCIEDAD Y TERRITORIO

Comunicación, participación, datos y confianza

La ciencia circula en periódicos, redes sociales, informes empresariales, decisiones públicas y conversaciones comunitarias. Por eso, la educación científica necesita enseñar también a leer cómo se presenta la evidencia fuera del laboratorio y qué ocurre cuando esa evidencia entra en conflicto con intereses, identidades o riesgos.

La ciencia no termina en el laboratorio. Circula en medios, políticas, comunidades, redes sociales y decisiones territoriales. Por eso, aprender ciencias también significa aprender a reconocer cómo se comunica, quién participa y qué conocimientos quedan fuera de la conversación. La expansión de la ciencia ciudadana y de prácticas postdigitales ha ampliado la discusión sobre quién puede producir conocimiento y bajo qué condiciones. Las comunidades pueden participar en observación, recolección de datos, interpretación y definición de problemas, pero esa apertura exige protocolos, calidad de datos y criterios éticos explícitos (Hayes, 2021; Jandrić et al., 2018; Jandrić & Hayes, 2019; Jandrić et al., 2023; Jopling et al., 2024; Tolbert et al., 2024).

CIENCIA PÚBLICA, MEDIOS Y LECTURA DE DATOS

Buena parte del aprendizaje científico ocurre fuera de la escuela. Museos, medios, redes sociales, podcasts, videos y comunidades de práctica participan en la construcción de imágenes sobre la ciencia. La educación científica necesita reconocer ese ecosistema porque los estudiantes llegan al aula con explicaciones previas producidas por fuentes muy diversas. El problema no es únicamente la presencia de información falsa. También existen simplificaciones, exageraciones y representaciones de incertidumbre que pueden inducir conclusiones inadecuadas. Aprender a comunicar ciencia implica traducir sin deformar.

Cuando un tema científico se convierte en controversia social, más datos no siempre producen mayor acuerdo. Las personas interpretan evidencia desde identidades, confianza institucional y experiencias previas. Por ello, la comunicación científica debe combinar precisión con comprensión del contexto. El aula puede convertirse en laboratorio de deliberación: identificar afirmaciones verificables, comparar fuentes, distinguir evidencia de valor y practicar desacuerdo

argumentado. Esa competencia resulta central para una ciudadanía que enfrenta información abundante y autoridad fragmentada.

Las decisiones contemporáneas se comunican cada vez más mediante datos. Gráficos de temperatura, curvas epidemiológicas, indicadores de contaminación, porcentajes de riesgo y mapas de distribución aparecen en medios, documentos públicos y redes sociales. La alfabetización científica requiere por ello una alfabetización de datos que permita leer escalas, unidades, denominadores, intervalos, tendencias y fuentes de incertidumbre. Un gráfico puede ser técnicamente correcto y producir una impresión engañosa. Cambiar el origen del eje, seleccionar un periodo corto o utilizar porcentajes sin mostrar valores absolutos modifica la interpretación del lector. Enseñar ciencias con datos reales permite discutir estas decisiones de representación. El estudiante aprende que una visualización no es una fotografía neutral de la realidad, sino una construcción que selecciona variables y destaca relaciones.

La lectura crítica de datos también debe incluir una pregunta de contexto: ¿qué no aparece representado? Los conjuntos de datos contienen ausencias, errores de medición y decisiones de clasificación. Reconocer esas limitaciones no debilita la evidencia; permite interpretarla con mayor precisión.

Comunicar ciencia exige traducir sin borrar la incertidumbre. Un titular necesita brevedad, mientras un artículo científico necesita matices; un informe técnico puede expresar intervalos y limitaciones que una noticia resume en una frase. El problema aparece cuando la simplificación cambia el significado. Una cifra aislada, un eje recortado o un porcentaje sin denominador puede producir una impresión que los datos completos no sostienen.

La alfabetización de datos se convierte así en una extensión de la alfabetización científica. Leer un gráfico implica preguntar por escala, periodo, población y fuente. También exige mirar ausencias: qué grupos no aparecen, qué mediciones no se realizaron y qué categorías fueron definidas por quien construyó el conjunto de datos. En una sociedad gobernada crecientemente por indicadores, estas decisiones gráficas son decisiones de interpretación.

Las redes sociales intensifican el desafío porque combinan velocidad, personalización y señales de popularidad. Un contenido puede parecer confiable porque acumula interacciones, aunque esas interacciones no evalúen la calidad de la evidencia. La educación científica debe enseñar a desacoplar visibilidad y validez, una distinción que se vuelve crucial cuando las recomendaciones de salud o ambiente circulan mediante plataformas diseñadas para maximizar atención.

La comunicación científica enfrenta una tensión permanente entre precisión y comprensibilidad. Un lenguaje lleno de cautelas puede ser fiel a la evidencia pero inaccesible; una frase demasiado simple puede ser clara y al mismo tiempo engañosa. Aprender a comunicar consiste en conservar los límites esenciales mientras se reduce la complejidad. Esa habilidad puede practicarse pidiendo a los estudiantes que expliquen un mismo resultado a públicos distintos sin cambiar el contenido sustantivo.

Las visualizaciones merecen el mismo cuidado. Un mapa de calor, una curva de contagios o una gráfica de emisiones no son fotografías neutrales del mundo. Elegir colores, escalas, intervalos y categorías orienta la mirada. La alfabetización científica debe enseñar a leer esas decisiones y a construir visualizaciones que permitan comparar sin exagerar. El dato puede ser correcto y la representación, sin embargo, inducir una interpretación desproporcionada.

En las plataformas digitales se suma otro filtro: el algoritmo decide qué contenido recibe atención. La popularidad de una publicación puede expresar interés, indignación o afinidad, no calidad científica. Esta separación entre circulación y validez debería convertirse en un hábito explícito de lectura.

CIENCIA CIUDADANA, TERRITORIO E INCLUSIÓN

Hayes et al. (2025) analizan formas postdigitales de ciencia y humanidades ciudadanas y muestran que la producción de conocimiento relevante no ocurre exclusivamente dentro de universidades. Comunidades, organizaciones y ciudadanos pueden participar en observación, recolección de datos, interpretación y definición de problemas. La ciencia ciudadana ofrece una oportunidad educativa para vincular alfabetización científica con participación social. Registrar biodiversidad, calidad del aire, fuentes hídricas o fenómenos meteorológicos convierte el territorio en espacio de observación. Sin embargo, la participación requiere protocolos, calidad de datos y claridad ética. Democratizar la producción de conocimiento no significa abandonar estándares.

El interés creciente por la ciencia ciudadana ha mostrado beneficios que van desde la

generación de datos hasta el aprendizaje y la construcción de vínculos entre instituciones y comunidades. Su potencial educativo también se observa en contextos como bibliotecas y espacios culturales, que pueden convertirse en nodos de participación científica (Mumelaš & Martek, 2024). Las oportunidades de relacionarse con ciencia se distribuyen de manera desigual. Experiencias familiares, acceso a museos, materiales, conectividad y referentes profesionales influyen en la percepción de quién puede pertenecer a la ciencia. Nag Chowdhuri et al. (2022) vinculan el enfoque de capital científico con la búsqueda de mayor justicia en participación.

Una educación científica inclusiva debe revisar ejemplos, lenguajes y formas de reconocimiento. El objetivo no es reducir exigencia, sino ampliar las rutas mediante las cuales los estudiantes pueden participar en prácticas científicas significativas. El enfoque de capital científico ofrece una manera de comprender por qué el acceso a experiencias, referentes y conversaciones sobre ciencia está desigualmente distribuido. En educación básica, este enfoque se ha utilizado para diseñar prácticas que amplíen participación y sentido de pertenencia sin reducir la exigencia académica (Nag Chowdhuri et al., 2022).

Los problemas científicos adquieren significado concreto cuando se observan desde el territorio. La calidad del agua, la erosión, el uso del suelo, la biodiversidad, las prácticas agrícolas o la exposición a contaminantes pueden convertirse en objetos de investigación escolar conectados con comunidades reales. Esta aproximación no disminuye el rigor; lo hace visible en contextos donde los datos tienen consecuencias cercanas. El conocimiento local puede aportar observaciones históricas, prácticas y categorías que no siempre aparecen en bases de datos formales. Integrarlo exige cuidado: reconocerlo no significa aceptar cualquier afirmación sin contraste. La relación más productiva aparece cuando saberes locales y métodos científicos dialogan, identifican coincidencias, tensiones y preguntas nuevas.

Una educación científica territorializada permite además mostrar que la ciencia no sucede únicamente en grandes laboratorios. La observación sistemática, el registro, la comparación y la modelización pueden practicarse en una finca, un río, un barrio o un bosque urbano. Esta ampliación contribuye a democratizar la imagen de quién produce conocimiento.

La ciencia ciudadana permite desplazar la imagen de la producción científica como actividad exclusiva de laboratorios especializados. Hayes et al. (2025) y Tolbert et al. (2024) muestran que las relaciones entre expertos, comunidades y tecnologías postdigitales pueden generar nuevas formas de participación, siempre que se discutan calidad de datos, poder y devolución de resultados. La participación amplia no elimina el rigor; obliga a diseñar protocolos que permitan sostenerlo en condiciones diversas.

El territorio ofrece problemas que hacen visible esa relación. Medir calidad del agua, registrar especies, mapear ruido o comparar temperaturas urbanas conecta conceptos científicos con lugares conocidos. La ventaja no es solo motivacional. El conocimiento situado permite observar variaciones que los promedios nacionales pueden ocultar y recuperar memorias locales sobre cambios del paisaje, ciclos de lluvia o especies. Integrarlo exige contrastar escalas y evitar idealizar cualquier fuente de conocimiento.

Esta relación puede fortalecer justicia epistémica cuando la comunidad deja de ser únicamente objeto de estudio y participa en la formulación de preguntas, interpretación y uso de resultados. Jandrić et al. (2023) y Jopling et al. (2024) advierten que las fronteras entre ciencia profesional y participación ciudadana están cambiando en entornos postdigitales. Para la educación, el desafío consiste en mostrar que producir conocimiento implica también decidir quién pregunta, quién mide y quién recibe los beneficios de la respuesta.

El trabajo territorial obliga también a discutir escalas. Una observación local puede ser muy valiosa para describir una quebrada, un bosque o un barrio, pero no necesariamente permite generalizar a toda una región. Del mismo modo, un promedio nacional puede ocultar diferencias locales importantes. Aprender a mover la mirada entre escalas ayuda a evitar dos errores opuestos: universalizar una experiencia cercana o descartar lo local porque no representa al conjunto.

La devolución de resultados es otra dimensión ética. Un proyecto que recoge datos comunitarios y luego desaparece con la información puede cumplir requisitos técnicos y fracasar como relación de conocimiento. La ciencia ciudadana fortalece confianza cuando quienes participaron comprenden qué se encontró, qué limitaciones existieron y cómo pueden utilizarse los resultados. Hayes et al. (2025) sitúan esta conversación dentro de una ciencia postdigital más abierta a relaciones entre instituciones y ciudadanía.

Estas prácticas pueden contribuir a inclusión cuando reconocen conocimientos y preguntas que suelen quedar fuera del currículo. El criterio sigue siendo el contraste: incorporar saberes locales no significa aceptar cualquier afirmación por su origen, sino permitir que distintas fuentes entren en diálogo bajo procedimientos explícitos de observación y argumentación.

LISAMA 158: EVIDENCIA Y COMUNICACIÓN DURANTE UNA CONTINGENCIA AMBIENTAL

En marzo de 2018, una contingencia asociada al pozo Lisama 158 en Santander obligó a desplegar seguimiento sobre impactos sociales, bióticos e hídricos. La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales informó que realizó visitas de seguimiento, exigió medidas de manejo y posteriormente abrió actuaciones sancionatorias relacionadas con la gestión e información de la emergencia (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2018a, 2018b). El caso resulta útil para estudiar cómo la evidencia ambiental se produce en tiempo real, mientras la contingencia todavía está ocurriendo.

En una emergencia, la información llega fragmentada. Aparecen observaciones de campo, reportes empresariales, imágenes, análisis de agua, versiones comunitarias y decisiones institucionales. La educación científica puede utilizar un caso de este tipo para enseñar que una buena explicación necesita ordenar cronología, diferenciar fuente primaria de interpretación y reconocer qué datos responden a cada pregunta. Saber que hubo un derrame no responde automáticamente cuánto afectó, a quién, durante cuánto tiempo ni qué mecanismo produjo el evento.

También permite discutir la comunicación del riesgo. La ANLA señaló que la magnitud del evento y la oportunidad de la información formaban parte de sus preocupaciones institucionales. Ese aspecto muestra que la calidad científica de una respuesta depende de la rapidez y transparencia con que se comparten datos pertinentes. Ocultar, retrasar o simplificar información puede afectar tanto la evaluación ambiental como la confianza pública.

En contextos escolares y universitarios, el caso puede conectarse con química del agua, ecología, toxicología, geología, gestión del riesgo y comunicación pública. Su valor está en mostrar que los problemas científicos reales rara vez pertenecen a una sola disciplina y que las comunidades necesitan interpretar evidencia mientras existen incertidumbres y consecuencias concretas.

El cambio climático ofrece un ejemplo particularmente útil para enseñar diferencia entre tiempo atmosférico y tendencia climática. Una semana fría no invalida una tendencia de calentamiento del mismo modo que un día de ganancias no define la salud financiera de una empresa. La analogía ayuda a mostrar que las escalas temporales importan y que seleccionar un fragmento corto puede producir una conclusión incompatible con la serie completa. Leer ciencia exige reconocer cuál es la escala adecuada para la pregunta.

En redes sociales, esa selección parcial puede intensificarse mediante contenidos que privilegian casos extremos y testimonios individuales. Un video de una nevada, una historia de recuperación médica o una fotografía de un río limpio pueden ser auténticos y, aun así, insuficientes para describir un fenómeno general. La educación científica necesita enseñar que la autenticidad de un ejemplo no garantiza su representatividad. Esta distinción entre caso real y evidencia generalizable es una de las defensas más importantes frente a la desinformación.

DESINFORMACIÓN, CONFIANZA Y RIESGO AMBIENTAL

La desinformación científica no puede explicarse únicamente como déficit de conocimiento. Las personas interpretan información a través de identidades, experiencias, confianza institucional y pertenencia social. Por ello, aumentar la cantidad de datos disponibles no garantiza por sí mismo cambios de opinión. La educación científica necesita abordar cómo se construye la credibilidad y por qué algunas fuentes adquieren autoridad en comunidades específicas. En el aula conviene diferenciar error, incertidumbre, controversia legítima y desinformación deliberada. Un resultado que cambia con nueva evidencia no equivale a engaño. Una controversia científica tampoco significa que todas las posiciones tengan el mismo respaldo. Esta diferenciación protege al estudiante de dos simplificaciones frecuentes: creer que la ciencia siempre es unánime o concluir que cualquier desacuerdo invalida el conocimiento acumulado.

La confianza pública se fortalece cuando los procesos son transparentes. Explicar cómo se revisa un estudio, qué significa replicar, cómo se expresan conflictos de interés y por qué una recomendación puede modificarse permite comprender la ciencia como institución social autocorrectiva, no como una autoridad infalible.

La pandemia de COVID-19 hizo visible la escala del problema. La OMS describió una infodemia en la que información precisa, errores, rumores y desinformación circulaban simultáneamente y afectaban decisiones de salud. La propia organización trabajó con plataformas como Facebook, Google y YouTube para promover fuentes verificadas y responder a contenidos engañosos (WHO,

2020). El episodio muestra que la alfabetización científica contemporánea incluye competencias informacionales: rastrear fuentes, interpretar cambios en recomendaciones y reconocer cuándo la incertidumbre está siendo utilizada para sembrar desconfianza.

Las plataformas digitales plantean una paradoja. Permiten distribuir conocimiento científico a una escala inédita y, al mismo tiempo, facilitan que una afirmación emocional o simplificada viaje más rápido que una explicación matizada. El desafío educativo consiste en evitar la respuesta ingenua de buscar en internet como si todas las rutas condujeran a la misma calidad de evidencia. El estudiante necesita aprender a reconstruir cadenas: publicación original, institución que la interpreta, medio que la resume y usuario que la comparte.

Los accidentes ambientales muestran otra dimensión de la confianza. El derrame de Deepwater Horizon en 2010 liberó millones de barriles de petróleo en el Golfo de México y requirió una extensa respuesta científica para seguir trayectorias, evaluar ecosistemas, cerrar pesquerías y estimar daños (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2015). En estos escenarios, la ciencia se vuelve infraestructura pública: mide, anticipa, comunica y orienta decisiones. La confiabilidad depende tanto de la calidad técnica como de la transparencia con la que se explican límites y cambios de interpretación.

La confianza científica se construye lentamente y puede perderse con rapidez. Las comunidades no evalúan únicamente datos; evalúan también la historia de las instituciones que los presentan. En territorios donde existen conflictos ambientales previos, una cifra oficial puede ser recibida con sospecha aunque el procedimiento técnico sea correcto. La educación científica debe reconocer esta dimensión social de la confianza sin concluir que toda percepción es equivalente a toda evidencia.

Este punto es importante para evitar una pedagogía del déficit, según la cual las personas rechazan información solo porque no saben suficiente. Las decisiones públicas están atravesadas por experiencias, identidad, distribución de riesgos y memoria institucional. Ofrecer más datos puede ser necesario y, aun así, insuficiente. Comunicar exige escuchar qué pregunta está formulando realmente la comunidad y qué tipo de evidencia considera relevante.

Las controversias ambientales hacen visible la relación entre escala y justicia. Una actividad puede generar beneficio económico agregado y concentrar sus costos en una población específica. Un promedio regional de calidad ambiental puede ocultar exposiciones intensas cerca de una fuente de contaminación. Incorporar estas preguntas no convierte la clase de ciencias en un debate partidista; permite examinar cómo se distribuyen los efectos medibles y qué decisiones normativas aparecen después.

El trabajo con medios puede aprovechar esta complejidad. Comparar cómo diferentes periódicos titulan un mismo informe científico permite identificar énfasis, omisiones y metáforas. El objetivo no es decidir qué medio miente con rapidez, sino reconstruir qué parte del documento original conserva cada relato y qué información necesita el lector para formarse una interpretación más completa.

Los medios cumplen una función ambivalente en este ecosistema. Pueden amplificar exageraciones, pero también revelar fallas institucionales que los canales oficiales no hicieron visibles. Por eso, la educación científica no debería clasificar fuentes mediante etiquetas rígidas de confiable o no confiable. Conviene preguntar qué información aporta cada fuente, qué método utiliza y qué afirmaciones pueden verificarse de manera independiente.

Esta lectura por función permite usar prensa económica y generalista como material pedagógico sin confundirla con literatura científica. Un artículo de Portafolio puede reconstruir la cronología de Hidroituango o presentar conclusiones de un estudio técnico; el estudiante debe después rastrear la fuente original y distinguir entre el hecho reportado, la interpretación periodística y la evidencia primaria. Ese recorrido convierte la lectura de noticias en una práctica de trazabilidad.

Una discusión profunda sobre ciencia pública también necesita reconocer que la información circula dentro de economías de atención. Los medios y plataformas compiten por tiempo, clics y permanencia, por lo que los formatos más visibles suelen privilegiar novedad, conflicto y simplicidad. Esa lógica no convierte automáticamente la información popular en falsa, pero sí introduce incentivos que el lector debe conocer. La alfabetización científica contemporánea incluye comprender esos entornos de circulación para no confundir notoriedad con solidez.

El reto educativo consiste en desacelerar la lectura. Frente a una noticia, un video o una publicación viral, el estudiante puede reconstruir tres capas: qué se afirma, qué evidencia se presenta y qué evidencia falta. Después puede rastrear la fuente primaria y comparar cómo cambió el mensaje durante su circulación. Esta práctica convierte la verificación en una forma de lectura activa y muestra que la desinformación no siempre adopta la forma de una mentira

evidente; también puede surgir de omisiones, exageraciones o pérdida de contexto.

1.5 INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y JUICIO CIENTÍFICO

Descubrir, verificar y comprender sin delegar el pensamiento

La inteligencia artificial puede ampliar la capacidad de explorar datos, formular hipótesis y representar fenómenos. Al mismo tiempo, introduce un problema educativo decisivo: una respuesta puede ser fluida, convincente y falsa. Aprender a usar IA exige, por tanto, fortalecer el juicio científico en lugar de sustituirlo.

La inteligencia artificial generativa puede ayudar a formular preguntas, proponer hipótesis, explicar conceptos y organizar información. Precisamente por eso obliga a enseñar una competencia más profunda: comprobar si una respuesta plausible está realmente respaldada por evidencia. La investigación reciente sobre IA en educación converge en una idea: el valor de estas herramientas depende de la tarea pedagógica y de la capacidad de supervisar sus resultados. Revisiones sistemáticas y estudios del campo muestran oportunidades para tutoría, retroalimentación e indagación, junto con riesgos de error, dependencia, sesgo y opacidad (Baidoo-Anu & Owusu Ansah, 2023; Crompton & Burke, 2024; Crompton et al., 2024; Ansari et al., 2024; Amarathunga, 2024; Ahmed et al., 2024; Almasri, 2024; Aydin-Günbatır et al., 2025; Chugh et al., 2025).

IA PARA DESCUBRIR Y EXPLICAR

La inteligencia artificial generativa introduce una novedad pedagógica: puede producir en segundos explicaciones, hipótesis, diseños experimentales, código, preguntas y retroalimentación. Jiang et al. (2026), en una revisión sistemática de 24 estudios empíricos sobre ChatGPT e indagación STEAM, identificaron usos como herramienta, tutor, compañero de aprendizaje, experto de dominio y asistente docente. Los beneficios reportados incluyen apoyo a formulación de preguntas, diseño de investigación, resolución de problemas, motivación e interacción. Los riesgos son igualmente relevantes: dependencia, aceptación acrítica de respuestas, confusión conceptual, conclusiones superficiales, alucinaciones, sesgos, problemas de privacidad y desalineación curricular.

El punto pedagógico decisivo es que una respuesta generada no debe evaluarse por fluidez, sino por trazabilidad. ¿Qué afirmaciones contiene?, ¿qué evidencia las sostendría?, ¿pueden verificarse?, ¿qué supuestos introduce?, ¿qué alternativas omite? La IA convierte la verificación en contenido curricular. La revisión de Jiang et al. (2026) sintetiza usos de ChatGPT como herramienta, tutor, compañero de aprendizaje y apoyo a la indagación STEAM. Otros trabajos recientes han examinado la IA como apoyo al lesson study, a la argumentación y a la retroalimentación, mostrando que el beneficio aumenta cuando la actividad exige contrastar, explicar y justificar en lugar de aceptar la respuesta generada (Cheng, 2025; Ba et al., 2025; Chen et al., 2025).

La inteligencia artificial científica no empieza con los asistentes conversacionales. Desde hace décadas, los métodos computacionales permiten reconocer patrones, clasificar imágenes y analizar grandes conjuntos de datos. Lo nuevo es la escala y la accesibilidad. Herramientas antes reservadas a laboratorios especializados llegan ahora a investigadores, docentes y estudiantes mediante interfaces relativamente simples. Esta expansión abre oportunidades, pero también hace más visible la necesidad de comprender qué problema resuelve cada modelo y qué tipo de error puede cometer.

Un sistema predictivo puede producir resultados muy útiles sin ofrecer una explicación causal completa. Esa diferencia es especialmente importante en ciencias. Predecir la estructura de una proteína, clasificar una imagen médica o estimar una trayectoria meteorológica puede tener enorme valor práctico; comprender por qué el modelo acierta y bajo qué condiciones puede fallar sigue siendo una tarea adicional. La alfabetización en IA debe enseñar a mantener separadas utilidad predictiva y explicación científica.

ALPHAFOLD: UNA IA QUE AMPLÍA LA INVESTIGACIÓN

AlphaFold ofrece un contrapunto valioso frente a la conversación centrada únicamente en los riesgos de la IA generativa. En 2024, Demis Hassabis y John Jumper recibieron parte del Premio Nobel de Química por el desarrollo de AlphaFold, un sistema capaz de predecir estructuras

tridimensionales de proteínas a partir de sus secuencias. Google DeepMind informó que la base de datos asociada había puesto predicciones a disposición de millones de investigadores en numerosos países (Google DeepMind, 2024).

El caso permite mostrar que la IA puede funcionar como instrumento científico cuando se integra a un problema bien definido, se compara con evidencia experimental y se utiliza dentro de una comunidad que conoce sus límites. AlphaFold no elimina la necesidad de experimentos biológicos; cambia qué preguntas pueden abordarse primero, qué hipótesis pueden priorizarse y cuánto tiempo se necesita para explorar ciertas estructuras.

Desde el punto de vista educativo, esta historia ayuda a romper dos caricaturas. La primera presenta la IA como una máquina que sabe todo; la segunda como una tecnología inevitablemente enemiga del pensamiento. El valor científico aparece cuando el sistema amplía la capacidad humana de formular y contrastar preguntas. La pregunta pedagógica adecuada no es si se permite usar IA, sino qué trabajo intelectual sigue siendo necesario antes, durante y después de utilizarla.

AlphaFold también ofrece una oportunidad para explicar por qué un éxito de IA no equivale a inteligencia general. El sistema fue entrenado y evaluado para un dominio específico, con una estructura de problema definida y criterios de comparación disponibles. Su eficacia emerge de esa relación entre datos, arquitectura y objetivo. Trasladar el prestigio de un sistema exitoso en un dominio a afirmaciones sobre cualquier tarea sería un error de generalización.

Esta distinción ayuda a enseñar que la palabra inteligencia agrupa sistemas muy distintos. Un modelo de predicción de estructuras, un clasificador de imágenes y un asistente conversacional no funcionan de la misma manera ni tienen los mismos patrones de error. La alfabetización en IA comienza cuando se pregunta qué tarea realiza el sistema, con qué datos y cómo se evalúa.

El valor educativo del caso también está en mostrar que la ciencia contemporánea es profundamente colaborativa. Grandes bases de datos, infraestructuras computacionales y comunidades internacionales forman parte del proceso. La imagen del científico aislado cede espacio a redes donde modelos, experimentos y repositorios se retroalimentan.

IA GENERATIVA, DEPENDENCIA Y PENSAMIENTO CRÍTICO

Los modelos generativos pueden reducir el esfuerzo necesario para producir texto correcto en apariencia. Esto crea un riesgo de desacople entre desempeño visible y aprendizaje real. Un estudiante puede entregar una explicación sofisticada sin haber desarrollado los modelos mentales necesarios para producirla o defenderla. Las actividades más prometedoras transforman a la IA en objeto de crítica. Comparar respuestas, identificar errores, pedir fuentes, reconstruir razonamientos y diseñar pruebas para comprobar afirmaciones convierte la herramienta en un estímulo para pensamiento crítico en lugar de un sustituto.

La alfabetización en inteligencia artificial comparte principios con la alfabetización científica: comprender modelos, reconocer límites, evaluar evidencia, identificar incertidumbre y tomar decisiones. Integrarla al currículo de ciencias resulta razonable cuando se utiliza para estudiar cómo se construyen predicciones, qué significa entrenar con datos y por qué un modelo puede acertar sin comprender en sentido humano. La convergencia entre ciencia e IA también amplía preguntas éticas. Sesgo de datos, huella energética, privacidad, propiedad intelectual y automatización de decisiones son temas sociotécnicos. La educación científica aporta métodos para analizar evidencia; la ética y la ciudadanía aportan criterios para discutir consecuencias.

La alfabetización en IA requiere comprender tanto usos como límites. Las revisiones de alfabetización en IA escolar y los estudios de desarrollo profesional docente coinciden en que integrar estas herramientas demanda conocimiento conceptual, criterio pedagógico y capacidad de evaluación crítica (Casal-Otero et al., 2023; Ding et al., 2024).

Los modelos generativos introducen un tipo diferente de interacción porque producen lenguaje que imita formas habituales de explicación. Una respuesta puede incluir definiciones correctas, referencias plausibles y una estructura impecable aunque contenga relaciones inventadas. Esta combinación vuelve insuficiente la lectura superficial. Almasri (2024), Crompton y Burke (2024) y Aydin-Günbatır et al. (2025) coinciden en que las oportunidades educativas de la IA están acompañadas por problemas de exactitud, dependencia, ética y capacidad docente para supervisar resultados.

El riesgo de dependencia cognitiva aparece cuando el estudiante externaliza demasiado pronto la formulación de preguntas, la selección de argumentos o la explicación. La herramienta reduce esfuerzo, pero también puede reducir las oportunidades de practicar. Esto no significa

que todo esfuerzo sea pedagógicamente valioso; significa que algunas operaciones deben permanecer visibles si se quiere evaluar comprensión. Una calculadora puede liberar tiempo para resolver problemas más complejos, pero sería inadecuada si el objetivo es observar si el estudiante comprende operaciones básicas. Con la IA ocurre algo parecido, aunque la frontera es más difícil de reconocer.

Las mejores tareas convierten la respuesta generada en objeto de análisis. Chen et al. (2025) muestran que combinar IA con estructuras de argumentación puede apoyar pensamiento crítico cuando el estudiante debe examinar y justificar. Jiang et al. (2026) encuentra usos de ChatGPT como tutor, compañero o apoyo a la indagación STEAM, pero también identifica riesgos de aceptación acrítica y superficialidad. La diferencia está en la tarea: copiar una explicación y contrastarla no son actividades cognitivamente equivalentes.

La dependencia cognitiva puede observarse cuando el usuario deja de formular su propia representación del problema. Si el estudiante consulta una herramienta antes de intentar explicar, la respuesta externa puede fijar el marco desde el cual pensará después. Una estrategia pedagógica sencilla consiste en pedir una predicción o explicación inicial antes de usar IA y luego comparar ambas versiones. El contraste hace visible qué cambió y evita que la herramienta ocupe todo el proceso.

También conviene diferenciar ayuda de sustitución. Una IA puede ayudar a generar ejemplos, reorganizar un texto o proponer contraargumentos y, al mismo tiempo, dejar en manos del estudiante la decisión sobre qué es válido. En cambio, si produce la explicación, selecciona las fuentes y formula la conclusión sin revisión, el producto final puede ocultar la ausencia de aprendizaje. La frontera depende del objetivo de la tarea.

Por esa razón, la evaluación con IA necesita observar procesos. Versiones intermedias, defensa oral, diarios de decisiones y contraste de fuentes permiten comprobar comprensión de manera más fiable que una prohibición general. Ding et al. (2024) muestran que el desarrollo de alfabetización docente en IA mejora cuando se trabaja con casos y decisiones contextualizadas, no solo con explicaciones técnicas de herramientas.

La explicabilidad de los sistemas de IA introduce un dilema semejante al de otros instrumentos complejos: una herramienta puede ser útil sin que cada detalle interno sea comprensible para el usuario. En esos casos, la confianza se apoya en pruebas de desempeño, validaciones externas, límites de uso y mecanismos de supervisión. El criterio científico no exige transparencia absoluta en cada nivel, pero sí suficiente información para estimar cuándo el sistema es confiable y cuándo debe escalarse la revisión.

Esta discusión conecta IA con una tradición más amplia de instrumentos científicos. Quien utiliza un espectrómetro o un secuenciador no reconstruye cada componente electrónico, pero conoce principios de funcionamiento, calibración y error. Con la IA debería ocurrir algo parecido: comprender qué tipo de datos procesa, qué salida produce, cómo fue evaluada y qué errores son previsibles. La alfabetización tecnológica madura se construye entre el uso ciego y la necesidad imposible de comprenderlo todo.

VERIFICAR, COMPRENDER MODELOS Y USAR IA CON CRITERIO

La expansión de sistemas generativos obliga a reformular una habilidad que antes aparecía dispersa en distintas unidades curriculares: verificar. En un entorno de buscadores, asistentes conversacionales y contenido sintético, verificar implica reconstruir la procedencia de una afirmación, identificar qué parte corresponde a dato observable y qué parte a inferencia, y determinar si la fuente citada realmente sostiene la conclusión. Esta práctica no pertenece únicamente al periodismo o a la alfabetización mediática; constituye una extensión natural del razonamiento científico porque exige contraste, reproducibilidad y control de evidencia. En la enseñanza de las ciencias, la verificación puede convertirse en una rutina explícita. Frente a una respuesta producida por IA, el estudiante puede separar proposiciones, clasificarlas según sean definiciones, relaciones causales, cifras o recomendaciones, y diseñar un procedimiento de comprobación para cada una. Algunas afirmaciones podrán contrastarse con manuales o artículos; otras exigirán datos primarios; otras permanecerán abiertas. El aprendizaje surge cuando el estudiante comprende que la confiabilidad no es una propiedad estética del texto, sino una relación entre afirmación, método y evidencia.

Esta competencia también modifica el papel del error. Una alucinación de un modelo generativo, una medición inconsistente o una hipótesis rechazada pueden utilizarse como oportunidades para reconstruir el proceso de conocimiento. La educación científica gana

profundidad cuando el aula deja de premiar únicamente la respuesta correcta y comienza a valorar la capacidad de detectar por qué una respuesta es insuficiente, qué evidencia falta y cómo debería revisarse. Los sistemas de inteligencia artificial permiten introducir una discusión particularmente fértil sobre la diferencia entre predicción y explicación. Un modelo puede producir predicciones acertadas a partir de regularidades estadísticas sin ofrecer una explicación causal del fenómeno. Esta distinción resulta pedagógicamente útil porque obliga a preguntar qué significa comprender. En ciencias, una predicción correcta puede ser valiosa, pero una explicación exige además relacionar variables, mecanismos, condiciones y supuestos.

El aula puede aprovechar esta tensión mediante tareas comparativas. Un estudiante puede pedir a un sistema generativo que explique un fenómeno y después contrastar la respuesta con un modelo disciplinar, identificar conceptos omitidos, reconocer simplificaciones y proponer una versión mejorada. La actividad deja de ser una consulta y se convierte en una práctica de modelización. La IA aporta una primera representación; el estudiante debe juzgar su suficiencia epistemológica. Este enfoque evita dos posiciones reduccionistas. La primera idealiza la IA como fuente de conocimiento prácticamente ilimitado; la segunda la descarta por sus errores. Una educación científica madura la trata como una tecnología probabilística que puede ser útil bajo condiciones explícitas de supervisión, verificación y propósito.

Una integración responsable de IA en educación científica puede resumirse en cinco principios: propósito pedagógico explícito; verificación de afirmaciones; supervisión docente; protección de datos; y evaluación que permita observar aprendizaje sin depender exclusivamente de productos generados. El criterio final es transferible a cualquier tecnología: la herramienta debe ampliar capacidad de preguntar, investigar, representar, argumentar o revisar. Cuando solo acelera la producción de respuestas, su valor educativo es limitado.

Verificar una salida generativa exige descomponerla. Una respuesta larga puede contener definiciones, datos, relaciones causales, nombres de autores y recomendaciones. Cada tipo de afirmación requiere una forma distinta de contraste. Las definiciones pueden compararse con fuentes disciplinares; las cifras necesitan rastrear datos; las relaciones causales exigen evidencia más fuerte; las recomendaciones deben separar hechos de valores.

La trazabilidad se convierte así en una competencia central. Un estudiante debería poder indicar de dónde proviene una afirmación importante, qué fuente primaria la respalda y qué parte fue inferida por él o por la herramienta. En un mundo de contenido sintético, la procedencia deja de ser un detalle bibliográfico y se transforma en condición para evaluar confiabilidad.

El objetivo final no es convertir cada uso de IA en una auditoría interminable. Se trata de desarrollar un criterio proporcional al riesgo. Una idea creativa para iniciar una lluvia de preguntas requiere menos verificación que una recomendación médica o una afirmación que se usará para tomar una decisión pública. Aprender a graduar el esfuerzo de verificación según las consecuencias forma parte del juicio científico contemporáneo.

Los modelos de IA introducen además el problema de la opacidad. En sistemas complejos, conocer la arquitectura general no siempre permite explicar por qué una entrada produjo exactamente una salida. Esta característica no invalida automáticamente el modelo, pero cambia el tipo de evidencia necesaria. Si una herramienta se usa en contextos de alto riesgo, la evaluación debe incluir desempeño, sesgos, estabilidad y mecanismos de supervisión humana, no solo ejemplos de respuestas acertadas.

Los datos de entrenamiento constituyen otra fuente de incertidumbre. Un sistema puede reproducir patrones presentes en sus datos, incluidos desequilibrios y omisiones. La alfabetización científica aporta una pregunta básica: ¿qué población representa esta muestra? Trasladada a IA, la pregunta se convierte en quién aparece en los datos, bajo qué condiciones y qué casos quedan fuera. Casal-Otero et al. (2023) muestran que la alfabetización en IA escolar requiere combinar comprensión técnica, uso crítico y dimensiones éticas.

La explicación generada por un modelo también puede producir una ilusión de cierre. El lenguaje fluido reduce la sensación de duda y hace que una relación causal parezca más estable de lo que está respaldada. Pedir al sistema que exprese incertidumbre ayuda, pero no garantiza exactitud. La competencia central sigue siendo externa al modelo: contrastar con fuentes y evaluar si la evidencia disponible justifica la confianza.

Por eso, enseñar IA dentro de ciencias ofrece una oportunidad epistemológica excepcional. El estudiante puede observar en tiempo real cómo una herramienta produce hipótesis, comete errores, corrige formulaciones y responde de forma diferente según el contexto. La IA deja de ser solo tecnología educativa y se convierte en objeto para estudiar modelos, evidencia, sesgo y verificación.

La IA también obliga a revisar la idea de autoría intelectual. Cuando una herramienta

sugiere hipótesis, organiza bibliografía o redacta una explicación, el valor del trabajo humano se desplaza hacia seleccionar, verificar, integrar y responder por el resultado. La responsabilidad no desaparece porque parte del texto haya sido generado por un sistema. En contextos académicos y profesionales, quien presenta una conclusión sigue siendo responsable de su trazabilidad y de sus errores.

Esta responsabilidad puede enseñarse mediante una regla simple: toda afirmación importante debe poder defenderse sin apelar a que la IA lo dijo. Si el estudiante no puede explicar de dónde proviene una cifra, por qué una fuente es pertinente o qué limitación tiene una recomendación, la herramienta ha ocultado el proceso en lugar de apoyarlo. La alfabetización en IA se vuelve así una extensión de la alfabetización científica.

1.6 DEL CONOCIMIENTO A LA PRÁCTICA

Diseñar experiencias que produzcan juicio, no fragmentos de actividad

La profundidad de una experiencia educativa depende menos de la cantidad de actividades que de la relación que exista entre problema, evidencia, interpretación y revisión. Este acápite propone trabajar con menos dispositivos pedagógicos, pero desarrollarlos durante el tiempo suficiente para que el estudiante pueda construir y defender una explicación.

DISEÑAR EXPERIENCIAS DE INDAGACIÓN PROFUNDA

Una secuencia sólida puede comenzar con una afirmación suficientemente concreta para generar desacuerdo razonado: este suplemento mejora la memoria, esta quebrada está contaminada, la IA puede diagnosticar mejor que un profesional, la temperatura del barrio ha aumentado. La afirmación cumple una función semejante a una puerta de entrada. A partir de ella se construye una pregunta investigable, se decide qué evidencia sería pertinente y se identifican las limitaciones de acceso a datos. El docente no necesita ofrecer diez actividades diferentes; necesita sostener una misma pregunta durante varias fases.

El primer momento consiste en reconstruir qué se sabe y qué se supone. Los estudiantes elaboran hipótesis, distinguen hechos de interpretaciones y formulan qué observaciones podrían cambiar su posición. Este último punto es importante porque obliga a reconocer condiciones de revisión antes de conocer el resultado. La práctica reduce el sesgo de acomodar la explicación después de ver los datos.

El segundo momento se concentra en la producción o selección de evidencia. Puede implicar mediciones, búsqueda de bases de datos, comparación de documentos o experimentación. La decisión metodológica debe justificarse: por qué esa muestra, ese instrumento, ese periodo o esa variable. Aquí el docente puede introducir conceptos cuando se vuelven necesarios para resolver el problema, en lugar de presentarlos como una lista previa desconectada.

El tercer momento corresponde a la interpretación. Los estudiantes comparan resultados con predicciones, buscan patrones, examinan valores discordantes y construyen una explicación provisional. El cuarto introduce contraste: otro grupo, otra fuente o una herramienta de IA ofrece una explicación alternativa. La tarea consiste en decidir cuál explica mejor la evidencia y qué dato adicional permitiría discriminar entre ambas. El cierre consiste en revisar la explicación completa y reconstruir el razonamiento a la luz de la evidencia, en lugar de añadir una actividad aislada al final.

ENSEÑAR CON CASOS PÚBLICOS Y CONTROVERSIAS REALES

Los casos públicos funcionan cuando tienen suficiente información disponible para que el lector pueda reconstruir posiciones, decisiones y consecuencias. Theranos permite discutir validación y prestigio; Volkswagen, medición y manipulación; Hidroituango, causalidad en sistemas complejos; Lisama 158, evidencia ambiental y comunicación del riesgo; la infodemia de COVID-19, circulación de información; AlphaFold, posibilidades de la IA científica. Son casos conocidos o fácilmente documentables y, por eso, permiten que la discusión continúe fuera del capítulo.

Un caso no debería presentarse como anécdota decorativa. Su función es tensionar un concepto. En Volkswagen, por ejemplo, la pregunta no es simplemente qué hizo la empresa, sino qué significa validar un resultado cuando el sistema se comporta de manera distinta bajo

prueba. En Theranos, la pregunta es qué distingue una promesa tecnológica de una afirmación científicamente validada. En Hidroituango, interesa cómo se construye una explicación causal cuando intervienen múltiples subsistemas y la información llega por etapas.

Trabajar un caso durante varias sesiones permite introducir documentos heterogéneos: noticia, comunicado oficial, gráfico, informe técnico, video y opinión. El estudiante debe jerarquizarlos según la pregunta. Una fuente periodística puede ser útil para reconstruir cronología; una autoridad regulatoria, para conocer decisiones oficiales; un artículo académico, para explicar mecanismos; una base de datos, para cuantificar. La alfabetización científica madura cuando se entiende que la calidad de una fuente depende también del uso que se pretende darle.

El cierre del caso debe producir una posición argumentada, no una respuesta única. El estudiante puede concluir que cierta explicación es la mejor disponible y, al mismo tiempo, señalar qué evidencia sigue faltando. Esa combinación de firmeza y apertura es una característica central del pensamiento científico. La meta no es entrenar sospecha permanente, sino confianza calibrada.

Una forma de trabajar estos casos consiste en organizar expedientes de evidencia. Cada expediente puede contener una noticia, un comunicado oficial, una visualización, un fragmento de informe técnico y una pieza de opinión. El estudiante recibe la tarea de ordenar qué fuente responde a qué pregunta y de detectar qué afirmaciones no pueden resolverse con el material disponible. Esta actividad evita que la lectura de casos se convierta en consumo pasivo de una historia ya cerrada.

El caso Theranos puede utilizarse para construir un expediente sobre validación: qué prometía la empresa, qué decía el regulador, qué evidencia independiente habría sido necesaria. Volkswagen permite un expediente de medición: pruebas de laboratorio, condiciones reales y validez externa. Hidroituango puede estructurarse alrededor de cronología y causalidad. AlphaFold, alrededor de qué significa validar una predicción computacional frente a evidencia experimental.

En todos los casos, la tarea final puede ser una recomendación argumentada de una página que incluya cuatro elementos: conclusión provisional, evidencia principal, limitación más importante y condición que haría revisar la conclusión. Esta estructura obliga a reducir sin simplificar y genera un producto que puede evaluarse por razonamiento, no por extensión.

El docente puede además comparar cómo cambia la interpretación cuando se modifica una fuente. Si se elimina el informe regulatorio y queda solo una noticia, ¿qué afirmaciones ya no pueden sostenerse? Si se agrega una base de datos, ¿qué puede cuantificarse? El estudiante aprende que la evidencia no es una colección indiscriminada de documentos, sino un conjunto cuya pertinencia depende de la pregunta.

El método de casos funciona mejor cuando el docente resiste la tentación de cerrar rápidamente la discusión con una moraleja. Un buen caso conserva ambigüedad suficiente para que distintas interpretaciones puedan compararse. La tarea consiste en justificar por qué una explicación es más fuerte que otra y qué información adicional sería necesaria, no en adivinar qué respuesta espera el profesor.

También conviene regresar al caso después de introducir nuevos conceptos. Una primera lectura de Volkswagen puede centrarse en engaño; una segunda, después de estudiar validez externa, permite observar el problema de medición; una tercera, tras trabajar ética, muestra responsabilidad corporativa y pública. La profundidad aparece cuando el mismo caso se reinterpreta con herramientas conceptuales más ricas.

EVALUAR RAZONAMIENTO, NO SOLO RESPUESTAS

Una evaluación coherente con este enfoque necesita recoger trazas del pensamiento. El producto final puede ser un informe, un modelo o una recomendación, pero debe ir acompañado de elementos que permitan reconstruir cómo se llegó a él: pregunta inicial, decisiones metodológicas, evidencia utilizada, explicación descartada y condición de revisión. De este modo, la evaluación distingue entre un producto bien redactado y una comprensión defendible.

Una rúbrica puede concentrarse en cinco dimensiones: formulación del problema, calidad de evidencia, razonamiento, consideración de alternativas y revisión. La precisión conceptual sigue siendo importante, pero se observa dentro del argumento. Un estudiante puede obtener datos correctos y razonar débilmente; otro puede construir una buena inferencia a partir de datos incompletos y reconocer esa limitación. La evaluación necesita hacer visible esa diferencia.

El uso de IA refuerza esta necesidad. Solicitar solo un informe final facilita que la herramienta

produzca casi todo el resultado visible. Pedir versiones, justificar cambios, defender oralmente decisiones y contrastar fuentes permite observar aprendizaje. La evaluación puede autorizar IA en algunas etapas y restringirla en otras, siempre que el criterio sea pedagógico y explícito.

El error deja de ser únicamente una pérdida de puntos. Cuando una conclusión cambia porque apareció mejor evidencia, la revisión puede valorarse como logro. Esta práctica transmite un mensaje poderoso: en ciencia, cambiar de opinión frente a mejores razones no es debilidad; es una forma de rigor.

Un primer laboratorio puede centrarse en salud y riesgo. El grupo recibe una afirmación sobre un tratamiento o suplemento, reconstruye riesgo absoluto y relativo, identifica el diseño del estudio y redacta una recomendación para un público no especializado. La actividad puede extenderse durante varias sesiones, incorporando nuevas piezas de evidencia que obliguen a revisar la recomendación inicial.

Un segundo laboratorio puede trabajar territorio y ambiente. Los estudiantes seleccionan una quebrada, zona verde o corredor vial y construyen un pequeño sistema de observación: temperatura, ruido, biodiversidad o calidad básica del agua según recursos disponibles. El valor está en sostener la misma pregunta durante varias semanas, revisar el protocolo y explicar qué se puede afirmar con el conjunto de datos obtenido.

El tercer laboratorio puede concentrarse en modelización. Se compara un fenómeno real con una simulación: enfriamiento, crecimiento poblacional, propagación o movimiento. El grupo debe identificar qué variables están representadas, cuáles fueron omitidas y en qué condiciones el modelo deja de describir adecuadamente el fenómeno. La actividad termina con una revisión del modelo, no con una simple comprobación.

El cuarto laboratorio puede dedicarse a inteligencia artificial. Antes de consultar una herramienta, cada estudiante formula una explicación inicial. Luego genera una respuesta, separa afirmaciones verificables, busca fuentes y marca confirmaciones, matices y errores. Finalmente redacta una segunda explicación y documenta qué cambios obedecieron a evidencia y cuáles a mejora de redacción. La comparación entre versiones vuelve visible el aprendizaje.

Estas experiencias extensas requieren tiempo pedagógico protegido. Dividir un problema en diez microactividades puede crear sensación de movimiento sin permitir que el estudiante sostenga una pregunta el tiempo suficiente para comprenderla. Trabajar durante varias sesiones sobre el mismo conjunto de datos favorece que aparezcan dudas, contradicciones y revisiones que una actividad de veinte minutos no alcanza a producir.

El docente puede dosificar la complejidad en lugar de cambiar de tema. En una primera sesión se ofrece información básica; después se incorpora una fuente contradictoria; más adelante, un nuevo dato obliga a revisar. Esta estrategia conserva continuidad y muestra que el conocimiento cambia cuando cambia la evidencia. También permite observar cómo el estudiante responde a la incertidumbre.

Los productos pueden evolucionar de la misma manera. Un primer informe de una página puede convertirse después en una visualización, una defensa oral y una recomendación final. Cada versión obliga a seleccionar y reorganizar. La profundidad surge de regresar sobre la misma explicación con nuevas exigencias, no de acumular formatos desconectados.

En contextos universitarios, estas experiencias pueden vincularse con problemas profesionales. Una carrera de ingeniería puede analizar fallas y riesgos; salud, comunicación de evidencia; administración, decisiones basadas en datos; educación, diseño de indagación. El núcleo común sigue siendo el mismo: construir una afirmación proporcional a la evidencia y estar dispuesto a revisarla.

Tabla 1. Rúbrica para evaluar el razonamiento científico

Dimensión	Pregunta clave	Evidencia esperada	Nivel inicial	Nivel avanzado
Problema	¿La pregunta es investigable?	Delimitación y justificación	Tema amplio	Pregunta clara y pertinente
Evidencia	¿Los datos son pertinentes y rastreables?	Fuentes, mediciones, registros	Datos sin justificar	Evidencia pertinente y trazable
Razonamiento	¿Se explica el vínculo entre datos y conclusión?	Cadena argumental	Conclusión declarativa	Inferencia explícita
Alternativas	¿Se consideran otras explicaciones?	Comparación de hipótesis	Ignora alternativas	Contrasta alternativas plausibles
Revisión	¿Qué haría cambiar la conclusión?	Condición de revisión	Respuesta definitiva	Reconoce límites y criterios de cambio

Nota. Síntesis de los criterios desarrollados en este capítulo.

El papel docente en estas experiencias cambia de expositor permanente a diseñador de condiciones para pensar. Esto exige seleccionar problemas que puedan sostenerse durante varias sesiones, anticipar qué errores pueden ser productivos y decidir en qué momento introducir conceptos o herramientas. La profundidad no significa dejar al estudiante sin orientación; significa administrar la ayuda para que la explicación final no sea simplemente una reproducción de la voz del profesor.

El seguimiento longitudinal puede reforzar esta lógica. Si una institución conserva portafolios de indagación, un estudiante puede comparar cómo formulaba preguntas al inicio del año y cómo lo hace después, qué tipo de evidencia utilizaba y cómo evolucionó su capacidad de reconocer límites. La educación científica deja entonces de medirse únicamente por resultados puntuales y empieza a observar crecimiento en hábitos de razonamiento.

Una dificultad frecuente aparece cuando la evaluación institucional fragmenta el aprendizaje en pruebas cortas que premian rapidez. El pensamiento científico necesita, en cambio, tiempo para formular, contrastar y revisar. Esto no implica abandonar evaluaciones breves, sino equilibrarlas con productos longitudinales donde pueda observarse la evolución del razonamiento. Un portafolio de indagación, por ejemplo, permite comparar preguntas iniciales, decisiones metodológicas y revisiones finales a lo largo de un semestre.

Las instituciones también pueden crear espacios de conversación entre asignaturas. Un mismo problema —calidad del agua, consumo energético o circulación de desinformación— puede abordarse desde química, matemáticas, lenguaje y ciencias sociales sin perder identidad disciplinar. El valor está en que cada área aporta una herramienta distinta para comprender la situación. Esta coordinación muestra al estudiante que los problemas reales no respetan las fronteras administrativas del currículo.

La formación docente necesita acompañar esta transformación. Pedir indagación profunda sin ofrecer tiempo para diseñar preguntas, revisar evidencias o compartir experiencias puede convertir la propuesta en una exigencia adicional. Comunidades de práctica, análisis conjunto de trabajos estudiantiles y diseño colaborativo de casos permiten que el profesorado construya criterios comunes y reduzca la improvisación. La calidad de la educación científica depende también de estas condiciones organizacionales.

Finalmente, una cultura institucional de evidencia requiere celebrar la revisión. En muchas escuelas, cambiar una respuesta se interpreta como señal de inseguridad; en ciencia, puede ser una muestra de aprendizaje. Cuando docentes y directivos explican públicamente por qué ajustaron una decisión a partir de nuevos datos, modelan la misma actitud que esperan de los estudiantes. La coherencia entre discurso institucional y práctica cotidiana fortalece el valor educativo de la evidencia.

CONSTRUIR UNA CULTURA INSTITUCIONAL DE EVIDENCIA

Una propuesta de educación científica pierde continuidad cuando depende únicamente del entusiasmo de un docente. Para sostenerla, la institución necesita acuerdos sobre qué significa argumentar con evidencia, cómo se registra una investigación y qué criterios se utilizan para citar, verificar y revisar. Estos acuerdos pueden compartirse entre ciencias, matemáticas, tecnología, lenguaje y ciencias sociales porque la capacidad de justificar afirmaciones atraviesa todas ellas.

El laboratorio debe entenderse como una práctica y no solo como un espacio físico. Una escuela con equipamiento limitado puede desarrollar investigaciones valiosas mediante observaciones del entorno, datos abiertos, dispositivos sencillos y simulaciones. Una institución con laboratorios sofisticados puede producir aprendizaje superficial si cada práctica se reduce a seguir instrucciones. La cultura científica depende más de las preguntas que de la cantidad de equipos.

También se requieren acuerdos sobre inteligencia artificial. Una política institucional útil distingue entre usos de apoyo, usos que requieren declaración y tareas donde la ejecución autónoma resulta necesaria para observar aprendizaje. Prohibiciones generales y adopciones irrestrictas comparten una limitación: sustituyen la deliberación pedagógica por una regla simple. La institución debe decidir qué capacidades quiere observar y qué herramientas pueden ampliarlas sin ocultarlas.

El vínculo con el territorio completa esa cultura. Alianzas con universidades, autoridades ambientales, organizaciones comunitarias, medios locales o empresas permiten trabajar con problemas reales y fuentes diversas. La institución deja de enseñar ciencia como una colección cerrada de contenidos y la convierte en una forma de participar responsablemente en el mundo.

Caso pedagógico resuelto: ¿qué podemos afirmar sobre la sombra del patio?

ESCENARIO Y CONDICIONES DE TRABAJO

El siguiente escenario es ilustrativo: una institución quiere decidir si debe ensayar una zona de sombra en un patio donde los estudiantes manifiestan incomodidad durante el descanso. No se presentan mediciones reales ni se atribuye un efecto observado a la intervención. El equipo dispone de dos termómetros comparables, un plano del patio y cuatro sesiones de trabajo. La tarea consiste en resolver qué investigación permite formular una recomendación defendible y qué decisión puede tomarse mientras faltan datos. Este caso desarrolla el acápite 1.6 mediante un problema que conecta el capítulo 1 con la educación ambiental del capítulo 4.

La pregunta inicial, «¿la sombra enfría el patio?», reúne fenómenos diferentes: temperatura del aire, temperatura de las superficies y experiencia de comodidad. El grupo delimita la investigación a comparar la temperatura del aire en dos puntos definidos, a la misma altura y durante periodos equivalentes. Las percepciones se registran por separado y no se convierten automáticamente en lecturas del termómetro. Esta delimitación permite reconocer qué parte del problema puede abordarse con los recursos disponibles y qué conclusiones exigirían otros instrumentos o asesoría.

ALTERNATIVAS Y EVIDENCIA NECESARIA

La primera alternativa consiste en medir un punto soleado por la mañana y otro sombreado por la tarde. Se descarta como comparación principal porque hora, lugar y exposición cambian simultáneamente: una diferencia no permitiría distinguir cuál de esas condiciones intervino. La segunda propone medir los dos puntos al mismo tiempo, mantener altura y tiempo de lectura, anotar condiciones del entorno y repetir el procedimiento. Se elige esta comparación porque controla mejor algunas diferencias, aunque no elimina todas. La tercera alternativa, instalar de inmediato una estructura permanente, queda fuera de lo que la pequeña investigación puede justificar antes de obtener evidencia y revisar viabilidad.

El protocolo elegido empieza por comparar ambos termómetros en un mismo lugar durante un periodo de estabilización. Para medir aire, los sensores se protegen de la radiación directa mediante abrigos equivalentes que permitan ventilación; exponer uno al sol y proteger otro introduciría un problema de medición (Duncan & Gonski, s. f.). Si muestran discrepancias persistentes, se registra esa limitación. Durante la observación se intercambian los instrumentos entre puntos para examinar si una diferencia sigue al dispositivo o al lugar. El equipo anota fecha, hora, ubicación, altura, ventilación, entorno y condiciones de sombra. No rellena lecturas ausentes. Las repeticiones permiten observar variabilidad; no convierten un solo patio en una muestra representativa de todas las instituciones.

El expediente distingue evidencia que deberá producirse y fuentes que orientan el procedimiento. Las lecturas y los registros serán datos del proyecto; el plano documenta dónde se comparó; los conceptos de medición y contraste ayudan a interpretar su alcance. La relación entre pregunta, procedimiento y explicación sigue las prácticas científicas del National Research Council (2012), la organización de indagación de Pedaste et al. (2015) y el énfasis de Coleman et al. (2023) en imaginar, diseñar e interpretar experimentos. Estas fuentes justifican el enfoque educativo; no suministran resultados sobre el patio del escenario.

RESOLUCIÓN Y CONDICIÓN DE REVISIÓN

La resolución tiene dos partes. La conclusión científica disponible es que todavía no puede afirmarse cuánto cambia la temperatura ni atribuir a la sombra todas las diferencias de comodidad. La decisión institucional propuesta es realizar la comparación y estudiar un ensayo reversible de sombra, sujeto a autorización, seguridad, accesibilidad y disponibilidad de recursos. El ensayo no se presenta como eficacia ya demostrada. Se define de antemano qué evidencia sería necesaria para continuar, ajustar o abandonar la propuesta: consistencia de las comparaciones, incidencias de uso y condiciones que podrían explicar diferencias.

Si las lecturas posteriores resultan variables o comparables, el grupo tendrá que revisar la pregunta y las condiciones de observación. Si aparece una diferencia persistente, deberá explicar por qué la considera compatible con su interpretación y qué alternativas siguen abiertas. El caso no anticipa ninguno de esos desenlaces. La recomendación actual se resuelve con la información

disponible: investigar antes de generalizar, permitir una prueba acotada cuando sea viable y conservar separados el dato físico, la percepción y la decisión. Elegir un procedimiento constituye ya un resultado argumentativo; no equivale a reportar un resultado experimental.

PRODUCTO Y EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE

El producto es un expediente breve con pregunta delimitada, plano de comparación, protocolo, registro de incidencias, justificación de la alternativa elegida y recomendación provisional. Incluye un apartado que diga qué no puede concluirse y qué dato haría cambiar la decisión. Otro equipo revisa si podría repetir el procedimiento sin depender de explicaciones privadas de sus autores. Cuando falte información, solicita una aclaración en vez de completar supuestos por intuición. La presentación oral permite comprobar que cada integrante comprende una decisión metodológica y su consecuencia.

La evaluación utiliza las cinco dimensiones de la rúbrica de razonamiento científico del capítulo 1: problema, evidencia, razonamiento, alternativas y revisión. En cada dimensión se distingue entre nombrar un criterio y aplicarlo: mencionar «variables» resulta insuficiente si la comparación cambia hora y lugar sin justificarlo. Se valora que el estudiante detecte un límite aunque reduzca la contundencia de su conclusión. El docente compara una explicación inicial con la versión final para identificar cambios razonados, sin inventar una mejora promedio del grupo. El aprendizaje esperado es poder defender y corregir el diseño; la observación de ese aprendizaje corresponde a la aplicación real.

CONCLUSIÓN. APRENDER A CAMBIAR DE IDEA CON MEJORES RAZONES

La educación científica recupera una relevancia pública particular cuando la sociedad dispone de más información que capacidad para examinarla. El desafío ya no consiste únicamente en acceder a hechos, sino en construir criterios para determinar qué afirmaciones merecen confianza y con qué grado de certeza.

El recorrido del capítulo permite formular una primera conclusión: conocimiento conceptual y práctica epistémica deben avanzar juntos. La memorización sin investigación produce saber frágil; la actividad experimental sin modelos produce manipulación sin explicación. La educación científica necesita articular conceptos, preguntas, mediciones, modelos, argumentos y revisión.

Una segunda conclusión se refiere a la tecnología. Laboratorios virtuales, simulaciones, robótica, plataformas y sistemas generativos pueden ampliar el aprendizaje, pero sus efectos dependen del diseño pedagógico. La novedad tecnológica no constituye evidencia de eficacia. El docente conserva una función intelectual decisiva: seleccionar problemas, diseñar andamiajes, interpretar respuestas y sostener estándares de evidencia.

La tercera conclusión sitúa la alfabetización científica en el espacio público. Ciencia ciudadana, comunicación científica y problemas sociocientíficos muestran que aprender ciencias también significa aprender a convivir con desacuerdos informados. La educación científica contribuye a una ciudadanía democrática cuando enseña a diferenciar lo que la evidencia permite afirmar de aquello que requiere deliberación ética o política.

La cuarta conclusión se dirige a la inteligencia artificial. La IA generativa vuelve urgente una pedagogía de la verificación. La fluidez lingüística de un sistema puede ocultar errores, y la velocidad de respuesta puede desplazar el tiempo necesario para comprender. La mejor integración educativa no consiste en prohibir la herramienta ni en adoptarla sin reservas, sino en convertirla en objeto de investigación y contraste.

La tesis final del capítulo puede expresarse mediante una secuencia: interpretar, juzgar, decidir, actuar, observar consecuencias y revisar. Esa secuencia representa una educación científica compatible con la vida cotidiana, la investigación y la ciudadanía. Su objetivo no es formar personas que siempre tengan una respuesta, sino personas capaces de reconocer qué pregunta debe hacerse, qué evidencia necesitan y cuándo una conclusión debe cambiar.

La educación científica, entendida de este modo, no busca que todas las personas se conviertan en especialistas. Busca que puedan reconocer cuándo una afirmación exige evidencia, cómo evaluar esa evidencia, qué incertidumbre permanece y bajo qué condiciones sería razonable cambiar de opinión. Esa capacidad es académica, profesional y ciudadana al mismo tiempo.

Los casos desarrollados a lo largo del capítulo muestran una misma regularidad desde escenarios muy distintos. Theranos recuerda que la estética de la innovación no reemplaza la

validación; Volkswagen, que una medición puede ser técnicamente impecable y conceptualmente engañosa; Hidroituango, que los sistemas complejos exigen explicaciones multicausales; Lisama 158 y Deepwater Horizon, que la evidencia ambiental se produce mientras existen riesgos y conflictos; la infodemia, que la velocidad de información puede superar la capacidad social de verificar; AlphaFold, que la IA puede ampliar genuinamente la investigación cuando se inserta en comunidades de validación.

La educación científica adquiere profundidad cuando esos episodios dejan de ser anécdotas y se convierten en problemas de razonamiento. Cada uno obliga a preguntar por fuentes, diseños, incertidumbres, actores y consecuencias. Esa es la tarea formativa que atraviesa la obra: ofrecer herramientas para que el lector pueda detenerse frente a una afirmación convincente y reconstruir qué la sostiene.

El propósito final no es producir una ciudadanía desconfiada de todo. La desconfianza indiscriminada es tan poco científica como la credulidad. La meta es formar confianza calibrada: suficiente para actuar cuando existe evidencia sólida y suficientemente abierta para revisar cuando cambian los datos. En esa capacidad de sostener una conclusión sin convertirla en dogma se encuentra una de las contribuciones más relevantes de la educación científica contemporánea.

En términos formativos, esta propuesta desplaza el centro desde la cantidad de contenidos hacia la calidad de las relaciones que el estudiante establece entre conceptos, datos y decisiones. Esto no supone enseñar menos ciencia, sino evitar que la amplitud curricular impida profundizar en cómo se sabe lo que se afirma. Una idea trabajada durante varias páginas, con evidencia, contraejemplos y casos, puede construir más criterio que una lista extensa de términos brevemente definidos.

También implica reconocer que el juicio científico necesita tiempo. Formular una pregunta buena, buscar evidencia, comparar explicaciones y revisar una conclusión son operaciones que se debilitan cuando la enseñanza se fragmenta en tareas cortas y desconectadas. La profundidad no es únicamente extensión textual; es permanencia sobre un problema hasta que el lector o el estudiante puede ver relaciones que al comienzo estaban ocultas.

En ese sentido, las metáforas, los casos empresariales, las controversias públicas y los problemas territoriales cumplen una función precisa: hacer visible una estructura de razonamiento. Theranos no interesa por su notoriedad, sino porque permite hablar de validación; Volkswagen, porque permite hablar de medición; Hidroituango, porque permite hablar de causalidad compleja; AlphaFold, porque permite hablar de modelos y evidencia. El caso es útil cuando abre un concepto y vuelve posible regresar a él con mayor comprensión.

Una consecuencia práctica de esta propuesta es que la profundidad debe protegerse de la sobrecarga curricular. Añadir constantemente nuevos temas puede producir una sensación de cobertura mientras reduce las oportunidades de comprender relaciones. Seleccionar menos núcleos y trabajarlos con evidencia, casos y revisión permite que el estudiante construya estructuras conceptuales reutilizables. Esa elección no empobrece el currículo; busca que lo aprendido pueda movilizarse cuando cambie el contexto.

En este sentido, la educación científica comparte una tensión con la propia investigación: avanzar requiere elegir. Ningún estudio responde todas las preguntas y ningún curso puede desarrollar todos los contenidos con la misma intensidad. La calidad depende de justificar prioridades y de construir conexiones que permitan continuar aprendiendo después. La alfabetización científica se vuelve entonces una capacidad de aprendizaje permanente, no una meta cerrada al terminar un grado o una asignatura.

REFERENCIAS

- Acosta, J. (2019, 1 de marzo). *Las causas de la crisis en Hidroituango*. Portafolio.
- Ahmed, Z., Shanto, S. S., Rime, M. H. K., Morol, M. K., Fahad, N., Hossen, M. J., & Abdullah-Al-Jubair, M. (2024). The generative AI landscape in education: Mapping the terrain of opportunities, challenges, and student perception. *IEEE Access*, 12, 147023–147050. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3461874>
- Almasri, F. (2024). Exploring the impact of artificial intelligence in teaching and learning of science: A systematic review of empirical research. *Research in Science Education*. <https://doi.org/10.1007/s11165-024-10176-3>
- Amarathunga, B. (2024). ChatGPT in education: Unveiling frontiers and future directions through systematic literature review and bibliometric analysis. *Asian Education and Development Studies*, 13(5), 412–431.
- Ansari, A. N., Ahmad, S., & Bhutta, S. M. (2024). Mapping the global evidence around the use of ChatGPT in higher education: A systematic scoping review. *Education and Information Technologies*, 29(9), 11281–11321. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12223-4>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2018a, 27 de marzo). *ANLA ordena inicio de procedimiento sancionatorio contra Ecopetrol*.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2018b, 21 de marzo). *ANLA verifica atención de Ecopetrol a emergencia en bloque Lisama, Santander*.
- Aydin-Günbatır, S., Durukan, A., & Günbatır, M. S. (2025). Generative AI as the new frontier in science education: A systematic review of Web of Science articles. *Science & Education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00677-6>
- Ba, S., Zhan, Y., Huang, L., & Lu, G. (2025). Investigating the impact of ChatGPT-assisted feedback on the dynamics and outcomes of online inquiry-based discussion. *British Journal of Educational Technology*, 56(5), 1710–1734. <https://doi.org/10.1111/bjet.13605>
- Baidoo-Anu, D., & Owusu Ansah, L. (2023). Education in the era of generative artificial intelligence: Understanding the potential benefits of ChatGPT in promoting teaching and learning. *Journal of AI*, 7(1), 52–62.
- Boice, K. L., Alemdar, M., Jackson, J. R., Kessler, T. C., Choi, J., Grossman, S., & Usselman, M. (2024). Exploring teachers' understanding and implementation of STEAM: One size does not fit all. *Frontiers in Education*, 9, 1401191. <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1401191>
- Bybee, R., Taylor, J., Gardner, A., Scotter, P., Carlson, J., Westbrook, A., & Landes, N. (2006). *The BSCS 5E instructional model: Origins, effectiveness, and applications*. BSCS.
- Bybee, R. W. (1997). *Achieving scientific literacy: From purposes to practices*. Heinemann.
- Casal-Otero, L., Catala, A., Fernández-Morante, C., Taboada, M., Cebreiro, B., & Barro, S. (2023). AI literacy in K–12: A systematic literature review. *International Journal of STEM Education*, 10(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00418-7>
- Chen, R., Ren, Y., & Yang, Y. (2026). The effect of school science education on students' climate literacy: A three-level meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 17, 1769772. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2026.1769772>
- Chen, X., Jia, B., Peng, X., Zhao, H., Yao, J., Wang, Z., & Zhu, S. (2025). Effects of ChatGPT and argument map-supported online argumentation on college students' critical thinking skills and perceptions. *Education and Information Technologies*, 30, 17623–17658. <https://doi.org/10.1007/s10639-025-13471-2>
- Cheng, E. C. K. (2025). Leveraging generative AI in science lesson study: Transforming density concept instruction through ChatGPT integration. *International Journal for Lesson and Learning Studies*, 14(3), 215–236.
- Chugh, R., Turnbull, D., Morshed, A., Sabrina, F., Azad, S., Mamunur, R. M., Kaisar, S., & Subramani, S. (2025). The promise and pitfalls: A literature review of generative artificial intelligence as a learning assistant in ICT education. *Computer Applications in Engineering Education*, 33(2), e70002. <https://doi.org/10.1002/cae.70002>
- Coleman, A. B., Lorenzo, K., McLamb, F., Sanku, A., Khan, S., & Bozinovic, G. (2023). Imagining, designing, and interpreting experiments: Using quantitative assessment to improve instruction in scientific reasoning. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 51(3), 286–301. <https://doi.org/10.1002/bmb.21727>
- Crawford, B. A. (2014). From inquiry to scientific practices in the science classroom. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 515–541). Routledge.
- Crompton, H., & Burke, D. (2024). The educational affordances and challenges of ChatGPT: State of the field. *TechTrends*, 68(2), 380–392.
- Crompton, H., Jones, M. V., & Burke, D. (2024). Affordances and challenges of artificial intelligence in K–12 education: A systematic review. *Journal of Research on Technology in Education*, 56(3), 248–268.
- DeBoer, G. E. (2000). Scientific literacy: Another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(6), 582–601.
- Ding, A.-C. E., Shi, L., Yang, H., & Choi, I. (2024). Enhancing teacher AI literacy and integration through different types of cases in teacher professional development. *Computers and Education Open*, 6, 100178. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2024.100178>
- Dobber, M., Zwart, R., Tanis, M., & van Oers, B. (2017). Literature review: The role of the teacher in inquiry-based education. *Educational Research Review*, 22, 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2017.09.002>
- Dolenc, N. R., & Kazanis, W. H. (2020). A potential for interest-driven learning to enhance the inquiry-based learning process. *Science Educator*, 27(2), 121–128.
- Driver, R., Newton, P., & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education*, 84(3), 287–312.

- Duncan, P., & Gonski, R. (s. f.). *Exposure and location of weather instruments*. National Weather Service. <https://www.weather.gov/rah/edu2>
- Earle, S. (2023). *Impact on practice: Examples from the Teacher Assessment in Primary Science (TAPS) project*. Bath Spa University.
- Empresas Públicas de Medellín. (2019, 1 de marzo). *Avance informativo No. 124 [Boletín sobre el análisis de causa raíz física de la contingencia del proyecto hidroeléctrico Ituango]*. https://www.epm.com.co/content/dam/epm/inversionistas/documentos/documentos-informacion-relevante/2022/2019-03-01_Bolet%C3%ADn-informativo-resultados-causa-ra%C3%ADz-Ituango_compressed.pdf
- Google DeepMind. (2024, October 9). *Demis Hassabis & John Jumper awarded Nobel Prize in Chemistry*.
- Hayes, S. (2021). *Postdigital positionality: Developing powerful inclusive narratives for learning, teaching, research and policy in higher education*. Brill.
- Hayes, S., Jandrić, P., la Velle, L., Earle, S., Šrajer, F., Dragić, Z., Kubat, S., Peraica, A., Švraka, D., Popović, S., Mumelaš, D., Pospiš, D., Vujanović, B., Lugović, S., Jopling, M., Tolbert, S., & Watermeyer, R. (2025). Postdigital citizen science and humanities: Dialogue from the ground. *Postdigital Science and Education*, 7, 188–223. <https://doi.org/10.1007/s42438-024-00514-z>
- Hodson, D. (2014). Learning science, learning about science, doing science: Different goals demand different learning methods. *International Journal of Science Education*, 36(15), 2534–2553.
- Jandrić, P., & Hayes, S. (2019). The postdigital challenge of redefining education from the margins. *Learning, Media and Technology*, 44(3), 381–393. <https://doi.org/10.1080/17439884.2019.1585874>
- Jandrić, P., Knox, J., Besley, T., Ryberg, T., Suoranta, J., & Hayes, S. (2018). Postdigital science and education. *Educational Philosophy and Theory*, 50(10), 893–899. <https://doi.org/10.1080/00131857.2018.1454000>
- Jandrić, P., Tolbert, S., Hayes, S., & Jopling, M. (2023). Postdigital citizen science: Mapping the field. *Postdigital Science and Education*. <https://doi.org/10.1007/s42438-023-00443-3>
- Jiang, H., Li, Y., Chugh, R., Xin, Y., & Cheng, H. (2026). The AI-powered co-inquirer: A systematic review of ChatGPT for inquiry-based learning in STEAM education. *International Journal of STEM Education*, 13, 42. <https://doi.org/10.1186/s40594-026-00628-9>
- Jopling, M., Stewart, G. T., Orchard, S., Suoranta, J., Tolbert, S., Cheilan, L., Yan, F., Price, C., Hayes, S., Scott, H., Latham, A., Bhatt, I., Dodonov, V., Matthews, A., Muhtaseb, R., MacKenzie, A., Owaineh, M., Earle, S., Simmons, B., ... Jandrić, P. (2024). Postdigital citizen science and humanities: A theoretical kaleidoscope. *Postdigital Science and Education*. <https://doi.org/10.1007/s42438-024-00481-5>
- Kolstø, S. D. (2001). Scientific literacy for citizenship: Tools for dealing with the science dimension of controversial socioscientific issues. *Science Education*, 85(3), 291–310.
- Laugksch, R. C. (2000). Scientific literacy: A conceptual overview. *Science Education*, 84(1), 71–94.
- Lederman, N. G., & Abell, S. K. (Eds.). (2014). *Handbook of research on science education* (Vol. II). Routledge.
- Millar, R. (2006). Twenty first century science: Insights from the design and implementation of a scientific literacy approach in school science. *International Journal of Science Education*, 28(13), 1499–1521.
- Mumelaš, D., & Martek, A. (2024). Benefits of citizen science for libraries. *Publications*, 12(1), 8. <https://doi.org/10.3390/publications12010008>
- Nag Chowdhuri, M., King, H., & Archer, L. (2022). The Primary Science Capital Teaching Approach: Building science engagement for social justice. *Journal of Emergent Science*, 23, 34–38.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2015). *Habitat impacts of the Deepwater Horizon oil spill*.
- National Research Council. (2012). *A framework for K–12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>
- OECD. (2025). *PISA 2025 science framework*.
- Osborne, J. (2010). Arguing to learn in science: The role of collaborative, critical discourse. *Science*, 328(5977), 463–466. <https://doi.org/10.1126/science.1183944>
- Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C., & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*, 14, 47–61.
- Pursitasari, I. D., Suhardi, E., Putra, A. P., & Rachman, I. (2020). Enhancement of students' critical thinking skill through science context-based inquiry learning. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(1). <https://doi.org/10.15294/jpii.v9i1.21884>
- Roberts, D. A. (2007). Scientific literacy/science literacy. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education*. Lawrence Erlbaum.
- Sadler, T. D. (2004). Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(5), 513–536.
- Shana, Z. J., & Abulibdeh, E. S. A. (2020). Science practical work and its impact on students' science achievement. *Journal of Technology and Science Education*, 10(2), 199–215.
- Skava Consulting. (2019, 28 de febrero). *Informe complementario del análisis de causa raíz física de la contingencia presentada en el proyecto hidroeléctrico Ituango (Informe SKV373-003-001-INF-003-B)*. <https://www.epm.com.co/content/dam/epm/institucional/documentos/todos/skava-informe-complementario.pdf>
- Tolbert, S., Olson, C., Haq, R. U., Evans, L., dos Santos, A. P. O., Alves Franco, A., Jager, I., Kovač, M., Orchard, S., Harris, S., Šrajer, F., Santos-Lang, C., Jandrić, P., Hayes, S., & Jopling, M. (2024). 'Citizen Scientists' on citizen science. *Postdigital Science and Education*. <https://doi.org/10.1007/s42438-024-00494-0>
- Tytler, R., Salimpour, S., & Prain, V. (2025). Going beyond a singular 'science of learning' framework. *New Zealand Journal of Educational Studies*. <https://doi.org/10.1007/s40841-025-00414-1>

- U.S. Environmental Protection Agency. (2015, September 25). *EPA update on recent Volkswagen announcement*. <https://www.epa.gov/archive/epa/newsreleases/epa-update-recent-volkswagen-announcement.html>
- U.S. Securities and Exchange Commission. (2018, March 14). *Theranos, CEO Holmes, and former president Balwani charged with massive fraud*. <https://www.sec.gov/newsroom/press-releases/2018-41>
- Wang, X., Van Driel, J., & Treagust, D. F. (2025). The changing landscape of science education research in Australia and New Zealand. *Research in Science Education*, 55, 1455–1468. <https://doi.org/10.1007/s11165-025-10308-3>
- World Health Organization. (2020, September 23). *Managing the COVID-19 infodemic: Promoting healthy behaviours and mitigating the harm from misinformation and disinformation*.
- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Simmons, M. L., & Howes, E. V. (2005). Beyond STS: A research-based framework for socioscientific issues education. *Science Education*, 89(3), 357–377. <https://doi.org/10.1002/sce.20048>
- Zhang, W., Guan, Y., & Hu, Z. (2024). The efficacy of project-based learning in enhancing computational thinking among students: A meta-analysis of 31 experiments and quasi-experiments. *Education and Information Technologies*, 29, 14513–14545. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12392-2>