



El modelo nexus-reload-mil: génesis, arquitectura e impacto en el aula de química bogotana

The nexus-reload-mil model: genesis, architecture and impact in bogotá's chemistry classroom

José Armando Herrera Robles¹

jaherrerar@educacionbogota.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-0309-9400>

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jorge Luis Montealegre Torres²

jorge.montealegre@umem.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1024-5453>

Secretaría de Educación Municipal de Armenia, Colombia

Resumen

El artículo presenta el Modelo NEXUS-RELOAD-MIL, una arquitectura pedagógica emergente diseñada para reconfigurar el aula de química de la educación media pública bogotana como un sistema reflexivo ante la irrupción de la Inteligencia Artificial Generativa. **Objetivo:** Diseñar, implementar y evaluar el Modelo NEXUS-RELOAD-MIL para reconfigurar el aula de química de la educación media pública bogotana como un sistema reflexivo y crítico ante la irrupción de la Inteligencia Artificial Generativa. **Metodología:** El modelo nació de una investigación doctoral de corte mixto (N=100 estudiantes, 6 docentes, dos instituciones educativas distritales de Bogotá, período marzo-octubre 2025), estructurada bajo la Ecología de Investigación-Diseño Transdisciplinar, que articula la Investigación-Acción Participativa y la Investigación Basada en Diseño. Se expone la génesis del modelo —fruto del diagnóstico de tres crisis estructurales del aula: ceguera unidisciplinar, brecha de equidad sociotecnológica y uso acrítico de las herramientas generativas—, su arquitectura de cinco fases interdependientes (NEXUS: Narrativa, Exploración, X-LAB, Upgrade y Sinapsis), el motor de mejora continua (RELOAD) y la brújula transdisciplinar basada en la Alfabetización Mediática e Informacional (MIL). **Resultados:** Los resultados empíricos confirman que el modelo erradica la subordinación algorítmica: el 78 % de los estudiantes rechaza la transcripción acrítica (media: 1,91/5,0), el 90 % alcanza niveles de alta criticidad epistémica y el 89 % integra química, ecología y ética en retos socioambientales territoriales. **Conclusión:** Se concluye que el Modelo NEXUS-RELOAD-MIL constituye una propuesta educativa original y transferible que demuestra que la soberanía intelectual no depende de dispositivos de alta tecnología, sino de un diseño didáctico riguroso y éticamente comprometido con las comunidades más vulnerables.

Palabras clave: NEXUS-RELOAD-MIL, Pensamiento Complejo, Tercero Incluido, Transdisciplina, Química, Ecología, Ética, Inteligencia Artificial Generativa, Didáctica de la Química, Fricción Cognitiva.

Abstract

This article presents the NEXUS-RELOAD-MIL Model, an emergent pedagogical architecture designed to reconfigure the chemistry classroom in Bogotá's public secondary education as a reflective system in response to the disruption of Generative Artificial Intelligence (GenAI). **Objective:** To design, implement, and evaluate the NEXUS-RELOAD-MIL Model to reconfigure chemistry classrooms in Bogotá's public secondary schools as a reflective and critical system in response to the emergence of Generative Artificial Intelligence. **Methodology:** The model emerged from a doctoral study using a mixed methodology (N=100 students, 6 teachers, two public schools in Bogotá, March–October 2025), structured around the Transdisciplinary Design-Research Ecology (EIDT), which integrates Participatory Action Research (PAR) and Design-Based Research (DBR). The article outlines the model's genesis—rooted in the diagnosis of three structural classroom crises: unidisciplinary blindness, the sociotechnological equity gap, and the uncritical use of GenAI—its five-phase interdependent didactic architecture (NEXUS: Narrative, Exploration, X-LAB, Upgrade, and Sinapsis), the continuous improvement engine (RELOAD), and the transdisciplinary compass grounded in Media and Information Literacy (MIL). **Results:** Empirical results confirm that the model eradicates algorithmic subordination: 78% of students reject uncritical transcription of AI outputs (mean: 1.91/5.0), 90% achieve high levels of epistemic criticality, and 89% integrate chemistry, ecology, and ethics in territorial socio-environmental challenges. **Conclusions:** It is concluded that the NEXUS-RELOAD-MIL Model constitutes an original and transferable educational proposal.

Keywords: NEXUS-RELOAD-MIL, Complex Thinking, Included Third, Transdisciplinarity, Chemistry, Ecology, Ethics, Generative Artificial Intelligence, Chemistry Didactics, Cognitive Friction.

1. Introducción

La irrupción de la Inteligencia Artificial Generativa (IAGen) en las aulas de la educación media pública bogotana ha puesto al descubierto tres crisis estructurales que los marcos pedagógicos convencionales son incapaces de gestionar. La primera es una crisis de sentido o ceguera unidisciplinar: el 93,7 % de los estudiantes encuestados (N=100) exige una contextualización transdisciplinar del conocimiento químico y rechaza la enseñanza reducida a fórmulas asépticas. La segunda es una crisis ético-cognitiva marcada por la deuda cognitiva: el 82,3 % usa habitualmente herramientas de IAGen, pero el 74,7 % lo hace de manera puramente instrumental —lo que Kosmyna et al. (2025) denominan deuda cognitiva— y lo que Swindell et al. (2024) llaman la brecha prometeica entre la velocidad del algoritmo y la cadencia reflexiva del aprendizaje humano. La tercera es una crisis de equidad sociotecnológica: solo el 25 % de los estudiantes cuenta con conectividad estable en el hogar, lo que revela que cualquier modelo de innovación basado en el determinismo tecnológico profundizará la exclusión (UNESCO, 2024; Holmes & Tuomi, 2022).

Ante este escenario, la literatura internacional ofrece aproximaciones valiosas pero insuficientes. Los marcos instrumentalistas de integración tecnológica (Salinas, 2023; Chen, 2025) responden a la pregunta de cómo usar la IA, pero soslayan la pregunta más urgente: cómo gobernarla desde la complejidad y la ética situada. Los estudios sobre educación con IAGen (Kasneji et al., 2023; Crompton & Burke, 2023) evidencian transformaciones cognitivas de alto impacto en los aprendices. La investigación en ética y equidad algorítmica (Akgun & Greenhow, 2022; Bender et al., 2021) alerta sobre los sesgos estructurales de los modelos de lenguaje. Y la didáctica de las ciencias naturales señala la urgencia de marcos pedagógicos que integren la IAGen en la enseñanza de la química (Estrada et al., 2025; Yuriev et al., 2024), pero ninguno ofrece estrategias situadas para la escuela pública latinoamericana atravesada por desigualdad estructural.

El presente artículo da respuesta a ese vacío presentando el Modelo NEXUS-RELOAD-MIL, cuya arquitectura trasciende el instrumentalismo para asumir la IAGen como un Tercero Incluido (Nicolescu, 1994; Max-Neef, 2005): un actor no humano, antagónico y falible cuya función no es clausurar el pensamiento con respuestas

rápidas, sino inyectar la fricción cognitiva necesaria para activar la soberanía epistémica del estudiante. El modelo surge de la convicción de que el aula de química —concebida como un sistema complejo adaptativo (Gell-Mann, 1994)— posee la capacidad de autoorganizarse cuando es perturbada de manera deliberada y pedagógicamente diseñada. NEXUS articula cinco fases interdependientes (Narrativa, Exploración, X-LAB, Upgrade, Sinapsis) que anclan el saber químico al territorio; RELOAD garantiza la recursividad y la mejora continua del ciclo; y MIL proporciona la brújula ética que impide que la herramienta devenga oráculo. El principio Low-Tech / High-Cog —baja dependencia tecnológica, máxima exigencia cognitiva— garantiza que el modelo sea equitativo para los contextos de mayor vulnerabilidad socioeconómica. El artículo se organiza así: en Materiales y Métodos se describe la Ecología de Investigación-Diseño Transdisciplinar (EIDT) que sustenta el modelo; en Resultados y Discusión se exponen génesis, arquitectura y validación junto a los hallazgos empíricos; las Conclusiones sintetizan las contribuciones al campo de la didáctica de las ciencias.

2. Materiales y métodos

El Modelo NEXUS-RELOAD-MIL es el producto de una investigación doctoral de corte mixto estructurada bajo la Ecología de Investigación-Diseño Transdisciplinar (EIDT), una metodología híbrida que articula la potencia emancipadora de la Investigación-Acción Participativa (IAP) (Fals Borda, 1985; Kemmis & McTaggart, 2014) con el rigor propositivo de la Investigación Basada en Diseño (DBR) (Brown, 1992; Edelson, 2002; Wang & Hannafin, 2005; McKenney & Reeves, 2019). Epistemológicamente, la EIDT se fundamenta en el pensamiento complejo de Morin (1999a) y la transdisciplinariedad de Nicolescu (1994), reconociendo que el aula de química no es un laboratorio controlado sino un sistema vivo, abierto e incierto que requiere una metodología tan compleja como el fenómeno que busca transformar.

Contexto y participantes

El estudio se realizó en dos instituciones educativas distritales (IED) de Bogotá: el Colegio Francisco de Paula Santander (FPS, localidad 15, Antonio Nariño) y el Colegio Los Alpes (ALP, localidad 4, San Cristóbal Sur), ambas de educación pública con marcadas condiciones de vulnerabilidad socioeconómica. El muestreo fue no probabilístico intencional por criterio (Johnson & Onwuegbuzie, 2004), fundamentado en: (a) la caracterización documentada de las localidades 4 y 15 como territorios con alta brecha de conectividad digital; (b) la voluntad explícita de los docentes para actuar como co-investigadores; y (c) la diversidad de poblaciones atendidas. Los criterios de inclusión fueron: estudiantes activos en ciclo V (grados 10.º y 11.º, 15-18 años) con consentimiento informado firmado. El criterio de exclusión fue: asistencia inferior al 80 % durante las fases de intervención. La muestra final incluyó 100 estudiantes, 6 docentes co-investigadores de ciencias naturales y tecnología, 4 directivos y 11 mujeres del programa Manzanas del Cuidado del ALP. El período comprendió marzo a octubre de 2025.

Diseño metodológico: las seis fases de la EIDT

La investigación se desplegó en seis fases recursivas (Fetters et al., 2013). La Fase 1 (Diagnóstico sistémico) se centró en la caracterización del estado inicial mediante cuestionarios Likert (N=100), entrevistas semiestructuradas, grupos focales y observación participante, procesados mediante análisis estadístico descriptivo y codificación abierta y axial (ATLAS.ti Scientific Software Development GmbH, 2022). La Fase 2 (Revisión PRISMA) trianguló la evidencia empírica con la literatura internacional y el experimento de sesgos con 48 prompts analizados a cinco modelos de lenguaje. Las Fases 3 y 4 comprendieron el codiseño colaborativo con docentes (DeLuca et al., 2014) y la implementación in situ, documentadas mediante diarios de campo y auditoría de prompts. La Fase 5 evaluó el impacto mediante escalas pre/post (N=100) y rúbricas de agencia epistémica. La Fase 6 sistematizó los hallazgos en el modelo NEXUS-RELOAD-MIL, validado con talleres de retroalimentación (septiembre-octubre 2025).

Rigor metodológico

La validez de constructo se garantizó mediante la triangulación dialéctica de fuentes cuantitativas (escalas Likert pre/post), cualitativas (codificación abierta y axial con ATLAS.ti, 2022) y documentales (PEI, mallas curriculares, resultados SABER 11). La integración de los datos se realizó siguiendo el modelo de triangulación concurrente de Fetter et al. (2013) y Creswell & Clark (2018). La reflexividad del investigador fue monitoreada a través de un diario metodológico que documentó los sesgos derivados de la formación científica del docente-investigador y las tensiones inherentes a la doble condición de partícipe y analista del sistema.

3. Resultados

Génesis del modelo: del diagnóstico a la morfogénesis

El diagnóstico sistémico reveló que el aula de química operaba como un sistema en estado de inercia. Al triangular los cuestionarios (N=100) con las narrativas cualitativas, emergieron cuatro condiciones fundantes que exigían una intervención de morfogénesis pedagógica: una ruptura del orden inercial para crear una nueva organización cognitiva.

La primera condición fue la urgencia del cuerpo-sujeto: el ítem con mayor consenso estadístico (93,7 % de favorabilidad) fue el reclamo por prácticas experimentales (Merleau-Ponty, 1993). La segunda condición fue la ilusión de competencia: el 82,3 % usa IAGen habitualmente, pero el 74,7 % lo hace de manera puramente instrumental, materializando la deuda cognitiva descrita por Kosmyrna et al. (2025) y el fenómeno del "loro estocástico" (Bender et al., 2021). La tercera condición fue la discriminación algorítmica: el experimento de sesgos con 48 prompts confirmó que el 91,6 % de los modelos representó al docente experto como hombre, el 83,3 % feminizó el trabajo de aseo y el 75,0 % racializó al criminal (Blonder & Feldman-Maggor, 2024). La cuarta condición fue la brecha de equidad: el 54,8 % de los estudiantes carece de acceso adecuado a dispositivos e internet (UNESCO, 2024; Akgun & Greenhow, 2022).

Estos cuatro hallazgos convergieron en una conclusión inequívoca: cualquier intervención que asuma la IAGen como oráculo o herramienta neutral profundizará las tres crisis estructurales identificadas. La respuesta epistemológica fue reconfigurar el rol de la IA, transitando de oráculo a Tercero Incluido (Nicolescu, 1994): un agente antagónico cuya falibilidad es el motor del aprendizaje y cuyo uso ético está regulado por los principios de la inteligencia artificial centrada en el humano (Maldonado, 2024; UNESCO, 2021).

La Tabla 1 sintetiza la reconfiguración ontológica de los tres actores del sistema-aula —docente, estudiante e IA generativa— bajo la lógica del Tercero Incluido. Esta reconfiguración de roles es la base sobre la que se construye toda la arquitectura del modelo NEXUS-RELOAD-MIL.

Tabla 1

Actor	Rol en el Ágora	Función Pedagógica
Docente	Curador del Caos	Diseña prompts antagónicos y "trampas pedagógicas". Parametriza la IA para que emita sesgos o alucinaciones calculadas; orquesta la fricción cognitiva desde la complejidad y la transdisciplina, para activar la neguentropía y la soberanía epistémica del estudiante.
Estudiante	Cazador de Sesgos y Alucinaciones	Audita, refuta y corrige a la IA utilizando el pensamiento

IA Generativa	Tercero Incluido (T)	complejo, el rigor químico, el trabajo experimental (Ancla Analógica) y el diálogo transdisciplinar. Transita de la subordinación a la soberanía epistémica. Actor no humano, antagónico y falible. Inyecta entropía y fricción cognitiva. Su falibilidad es el motor del aprendizaje, no un obstáculo a evadir.
---------------	----------------------	---

Fuente: A partir de los principios del pensamiento complejo (Morin, 1999a) y la transdisciplinariedad (Nicolescu, 1994). La reformulación de roles se apoya en la teoría de sistemas complejos adaptativos (Gell-Mann, 1994). Autor: Autoría propia.

Impacto empírico: de la deuda cognitiva a la soberanía epistémica

Los resultados de la evaluación pre/post (N=100) confirman la eficacia del modelo. La Tabla 2 resume los tres hallazgos estructurantes

Tabla 2

Dimensión	Indicador / Evidencia	Interpretación desde el Pensamiento Complejo
Quiebre del efecto oráculo	78 % rechaza la transcripción acrítica (media: 1,91/5,0). Pre-test: 74,7 % uso instrumental.	Morfogénesis del contrato didáctico: la IA transita de oráculo a Tercero Incluido auditable. Reducción de la deuda cognitiva (Kosmyna et al., 2025).
Alta criticidad epistémica	90 % en Niveles 3 y 4 (Rúbrica de Soberanía Epistémica). Nivel 1 reducido a 1-2 %.	Autoorganización del sistema-aula hacia estadios superiores de complejidad. El Ancla Analógica como instrumento de falsación (Popper, 1980; Bachelard, 2000).
Transdisciplinariedad emergente	89 % integra química, ecología, ética y política en retos socioambientales territoriales.	Emergencia de la tercera propiedad del sistema (Nicolescu, 1994): el todo supera la suma de sus partes. Ciudadanía planetaria en acto (Morin, 1999b).

Fuente: A partir de los instrumentos de evaluación pre/post y la Rúbrica de Soberanía Epistémica aplicados en las IED FPS y ALP, Bogotá, 2025. Autor: Autoría propia.

El hallazgo más significativo no es cuantitativo sino fenomenológico. Las narrativas estudiantiles revelan una transformación ontológica profunda que trasciende el aprendizaje conceptual de la química: el estudiante que al inicio del ciclo afirmaba "la IA me hace el trabajo" y se limitaba a copiar y pegar las respuestas del algoritmo, declara al finalizar la intervención con el Modelo NEXUS-RELOAD-MIL: "nosotros somos los que mandamos a la máquina, no ella a nosotros. Podemos corregir sus sesgos". Esta declaración de soberanía intelectual —emergida sin instrucción directa, como propiedad emergente del sistema-aula— es la prueba

empírica más robusta de que el modelo catalizó la autoorganización cognitiva del estudiantado en un nivel superior de complejidad. Adicionalmente, las narrativas documentan un desplazamiento identitario: los estudiantes transitan del rol de consumidores pasivos de información algorítmica al de evaluadores críticos y co-constructores del conocimiento químico situado. Esta transformación ontológica —del usuario al prosumidor epistémico— constituye el horizonte formativo que los marcos de MIL de la UNESCO (2025) y los trabajos de Yuriev et al. (2024) sobre educación química en la era de la IA identifican como el resultado más valioso de una integración pedagógica crítica de la IAGen.

Articulación territorial y descolonización algorítmica

El NEXUS-RELOAD-MIL establece como principio innegociable la territorialización de la tecnología. La Tabla 3 articula los riesgos de la IA descontextualizada con las respuestas situadas del modelo.

Tabla 3

Dimensión	Riesgo de la IA Descontextualizada	Articulación Situada (Neguentropía)	Impacto Esperado
Epistemológica	La IA entrega verdades universales estandarizadas, ajenas a la realidad local.	Fase N: el prompt se ancla obligatoriamente a un reto socioambiental del entorno del estudiante (ríos, páramos, calidad del aire).	El estudiante reconoce que la ciencia tiene impacto directo en su barrio; no es solo teoría de tablero.
Ética y Social	Adopción de soluciones que ignoran desigualdades estructurales (estratos 1 y 2).	Fase U: se aplica el Protocolo de Equidad (Maldonado, 2024). Toda solución de la IA se filtra por: ¿es esto viable para nuestra comunidad?	Se previene el determinismo tecnológico y se legitima la voz de poblaciones vulnerables (ej. Manzanas del Cuidado).
Ecológica y Política	La IA puede generar narrativas corporativas (greenwashing) que justifican el extractivismo.	Fase S: uso del Ancla Analógica para desmentir a la máquina y defender el Lebenswelt.	La escuela se convierte en Ágora de defensa territorial; el estudiante asume un rol de ecología política.

Fuente: Dimensiones adaptadas del paradigma de la complejidad (Morin, 1999a) y la transdisciplinariedad (Nicolescu, 1994; Max-Neef, 2005). Autoría propia.

La IAGen ha sido entrenada con datos del norte global con cosmovisión anglocéntrica y positivista (Blonder & Feldman-Maggor, 2024; Bender et al., 2021). Sin el modelo, su introducción en las IED bogotanas implicaría una colonización epistémica que invisibilizaría la ecología política local. El caso de las Manzanas del Cuidado es contundente: 11 mujeres cuidadoras que, sin dominar lenguajes de programación, desmontaron narrativas corporativas del algoritmo movilizándolo su experiencia de vida como Ancla Analógica. Este resultado confirma que la Alfabetización Mediática e Informativa (UNESCO, 2025) es un imperativo de justicia epistémica que debe llegar prioritariamente a las poblaciones más vulnerables, en coherencia con los principios de la ética de la IA de la UNESCO (2021).

4. Discusión

Arquitectura del Modelo NEXUS-RELOAD-MIL

El Modelo NEXUS-RELOAD-MIL emerge como respuesta directa a las cuatro condiciones diagnósticas. Su nombre es a la vez una arquitectura operativa y una declaración epistemológica. NEXUS designa las cinco fases interdependientes del ciclo didáctico —Narrativa, Exploración, X-LAB, Upgrade y Sinapsis— configuradas bajo el principio de religar el saber (Morin, 1999a): el conocimiento químico se ancla al territorio, se somete a la fricción algorítmica y retorna al cuerpo y a la praxis experimental. RELOAD es el motor de recursividad y mejora continua: inspirado en los principios de la DBR (Wang & Hannafin, 2005; Edelson, 2002), garantiza que el modelo no se fosilice como receta estática, sino que co-evolucione con el sistema-aula; cada emergencia —una alucinación no prevista, una resistencia docente, un fallo de infraestructura— se convierte en insumo informacional que retroalimenta el ciclo. MIL es la brújula transdisciplinar que garantiza que la interacción con la IAGen esté siempre mediada por la Alfabetización Mediática e Informacional (UNESCO, 2025; Max-Neef, 2005): el estudiante no es solo usuario de la tecnología, sino un prosumidor crítico con responsabilidad epistémica y territorial.

El eje diferenciador del modelo es la conceptualización de la IA bajo la lógica del Tercero Incluido (T) de Nicolescu (1994). La máquina no es ni un sujeto consciente ni un objeto inerte: es un sistema complejo adaptativo (Gell-Mann, 1994) que articula simultáneamente el orden (eficiencia computacional) y el desorden (alucinaciones, sesgos). Al introducirla como T en el contrato didáctico, la falibilidad algorítmica se convierte en la condición epistémica necesaria para la autoorganización cognitiva del estudiante (Jacobson & Wilensky, 2006).

La Tabla 4 presenta la arquitectura completa de las cinco fases NEXUS con sus propósitos pedagógicos en el Ágora Tecnoeducativa. Cada fase es interdependiente: no puede ejecutarse en aislamiento sin perder su potencia reflexiva y transdisciplinar.

Tabla 4

Sigla	Fase Sistémica	Propósito en el Aula
N	Narrativa Global	Religar el Saber: ancla el conocimiento químico a un Reto Complejo Glocal (ej. contaminación del río Fucha o defensa de páramos). El estudiante contextualiza la ciencia en su realidad material antes de interactuar con la IA.
E	Exploración Crítica	Activar el Tercero Incluido (T): el estudiante usa el Protocolo de Debugging Ampliado. Parametriza la IA mediante prompts antagónicos para inducir sesgos deliberadamente; los audita con el Ancla Analógica (literatura científica validada, laboratorio).
X	X-LAB (Praxis Maker)	Materialización: la abstracción algorítmica desciende al cuerpo y al trabajo experimental. Se construye un prototipo físico o digital que responde al reto glocal planteado.

U	Upgrade (Ética y Recursividad)	Evaluación ética: se aplica el Protocolo de Equidad (UNESCO, 2021). Toda solución pasa por el filtro: ¿es esto viable y justo para nuestra comunidad? Se documentan las "Notas del Parche" (emergencias y fallas del ciclo).
S	Sinapsis Final	Agencia Epistémica: se cierra con el Crossover Científico (integración transdisciplinar) y la formulación de una Recomendación de Política Pública empoderada por el estudiante.

Fuente: A partir de la sistematización de la intervención en las IED FPS y ALP, Bogotá, 2025. Autor: Autoría propia.

La fase Narrativa Global (N) encarna el principio de religar el saber (Morin, 1999a): el conocimiento químico se ancla a un Reto Complejo Glocal como la contaminación del río Fucha o la defensa de páramos. La fase Exploración Crítica (E) activa el Tercero Incluido: el docente diseña prompts antagónicos que parametrizan la IAGen para encarnar el error. El avatar Magnus Valdés —un lobbyista de la industria extractiva con datos pseudocientíficos— obligó a los estudiantes a recurrir al Ancla Analógica (el rigor de la química pura y los datos del laboratorio) para falsar la alucinación algorítmica, materializando el falsacionismo de Popper (1980) y el obstáculo epistemológico de Bachelard (2000) en la era algorítmica.

La fase X-LAB (X) resuelve la demanda del cuerpo-sujeto: la abstracción digital desciende al trabajo experimental donde los estudiantes construyen prototipos físicos que validan o refutan la propuesta del algoritmo. El principio Low-Tech / High-Cog transforma la precariedad de las IED en una condición pedagógica de equidad. En la fase Upgrade (U) se aplica el Protocolo de Equidad (UNESCO, 2021), filtrando toda solución por la pregunta: ¿es esto viable, justo e inclusivo para las comunidades más vulnerables? La Sinapsis Final (S) cierra el ciclo con una Recomendación de Política Pública, transformando la lección de química en un acto de ciudadanía planetaria (Morin, 1999b). El motor RELOAD garantiza que cada emergencia —una alucinación no prevista o un fallo de infraestructura— se convierta en insumo informacional del siguiente ciclo, en consonancia con los principios de la DBR (Wang & Hannafin, 2005; Edelson, 2002).

Validación y estructura de gobernanza institucional

Para garantizar la sostenibilidad del modelo, el NEXUS-RELOAD-MIL propone dos estructuras de gobernanza institucional. El Comité Transdisciplinar de Vigilancia Epistémica (CTVE) alinea las directrices macro y salvaguarda el anclaje territorial de los retos, en correspondencia con el Marco de Competencias en IA para Docentes (Miao & Cukurova, 2024) y la ética de la IA centrada en el humano (Maldonado, 2024). La Comunidad de Práctica Pedagógica (CPP) institucionaliza la gestión de la fricción algorítmica y la sistematización de las Notas del Parche (Fishman et al., 2013; DeLuca et al., 2014).

La validación estudiantil identificó la necesidad de un componente transversal de andamiaje emocional en la fase E, estableciendo una "cultura del error" donde la falibilidad de la IA es el objeto de estudio (Bachelard, 2000). La validación docente determinó que el RELOAD debe articularse con repositorios institucionales de prompts y Anclas Analógicas co-construidos. La validación ético-territorial de las Manzanas del Cuidado robusteció la fase U al institucionalizar el Protocolo de Equidad (UNESCO, 2021) como filtro obligatorio de toda propuesta técnica.

5. Conclusiones

Las conclusiones que se presentan a continuación se derivan directamente de los resultados expuestos en las Secciones 1 a 5 de Resultados y Discusión, respondiendo a la pregunta de investigación sobre cómo el Modelo NEXUS-RELOAD-MIL reconfigura el aula de química como sistema reflexivo. De los resultados obtenidos, de su análisis y de su discusión en el marco del pensamiento complejo y la transdisciplinariedad, se extraen las siguientes conclusiones:

- 1) El modelo demuestra que la enseñanza de la química en la escuela pública es capaz de erradicar la subordinación algorítmica cuando la IAGen es reconfigurada ontológicamente como un Tercero Incluido antagónico. La validación empírica confirma que el modelo produce una morfogénesis del contrato didáctico: la transformación ontológica más poderosa no es cuantitativa sino fenomenológica —el tránsito del estudiante del rol de usuario pasivo que afirma "la IA me hace el trabajo" al de evaluador crítico que declara "nosotros mandamos a la máquina"— y constituye la evidencia más contundente de que el modelo catalizó la autoorganización del sistema-aula hacia un nivel superior de complejidad.
- 2) El principio Low-Tech / High-Cog es una respuesta epistemológica y política a la brecha de equidad sociotecnológica. El modelo demuestra que la soberanía epistémica no depende de dispositivos de alta tecnología sino de un diseño didáctico riguroso que maximiza la exigencia cognitiva. Esto revierte la ecuación hegemónica que condena a las IED públicas a la subordinación digital por sus carencias materiales.
- 3) La emergencia de la transdisciplinariedad no fue planificada de manera lineal, sino que surgió como una propiedad sistémica del Ágora Tecnoeducativa —evidenciada en el 89 % de integración de química, ecología, ética y política en los retos socioambientales territoriales—, validando el tercer pilar de Nicolescu (1994): la complejidad produce síntesis que ninguna disciplina podría lograr en aislamiento.
- 4) La experiencia con el grupo de las Manzanas del Cuidado establece que la experiencia de vida es una forma de Ancla Analógica de máxima eficacia. Las mujeres cuidadoras demostraron una capacidad superior para auditar y refutar la IAGen a partir de su conocimiento situado del territorio, validando que la ciudadanía epistémica no tiene edad ni nivel de escolaridad.
- 5) La arquitectura conformada por el Comité Transdisciplinar de Vigilancia Epistémica (CTVE) y la Comunidad de Práctica Pedagógica (CPP) —en adelante, arquitectura CTVE-CPP— es una condición necesaria para la sostenibilidad del modelo. Sin estas estructuras institucionales de gobernanza que distribuyan la carga del Curador del Caos y que territorialicen los retos en los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), el modelo corre el riesgo de diluirse como innovación aislada. Se recomienda a la SED Bogotá adoptar el modelo NEXUS-RELOAD-MIL como hoja de ruta estructural para la actualización de los PRAE con horizonte 2026-2028.

6. Referencias bibliográficas

- Acero, C., González, M., & Santamaría, R. (2025). *Journey through the MILtiverse: Toolkit for youth organizations*. UNESCO. <https://doi.org/10.58338/FVKH3606>
- Akgun, S., & Greenhow, C. (2022). Artificial intelligence in education: Addressing ethical challenges in K-12 settings. *AI and Ethics*, 2(3), 431-440. <https://doi.org/10.1007/s43681-021-00096-7>
- Anderson, T., & Shattuck, J. (2012). Design-based research: A decade of progress in education research? *Educational Researcher*, 41(1), 16-25. <https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- ATLAS.ti Scientific Software Development GmbH. (2022). *ATLAS.ti 22 [Computer software]*. ATLAS.ti Scientific Software Development GmbH. <https://atlasti.com>

- Bachelard, G. (2000). *La formación del espíritu científico* (23.^a ed.). Siglo XXI.
- Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? *Proceedings of FAccT 2021*, 610-623. <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>
- Blonder, R., & Feldman-Maggor, Y. (2024). Generative AI in chemistry education: Cultural biases and pedagogical implications. *Journal of Chemical Education*, 101(8), 3201-3210. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00311>
- Brown, A. L. (1992). Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *Journal of the Learning Sciences*, 2(2), 141-178. https://doi.org/10.1207/s15327809jls0202_2
- Chen, B. (2025). Generative AI as epistemic infrastructure: Implications for human epistemic agency in education. *Educational Technology Research and Development*. <https://doi.org/10.1007/s11423-025-10478-9>
- Creswell, J. W., & Clark, V. L. P. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3.^a ed.). SAGE.
- Crompton, H., & Burke, D. (2023). Artificial intelligence in higher education: The state of the field. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00392-8>
- DeLuca, C., Bolden, B., Chan, J., Poulton, P., & Searchfield, C. (2014). Collaborative inquiry for learning in education. *McGill Journal of Education*, 49(3), 643-664. <https://doi.org/10.7202/1029328ar>
- Edelson, D. C. (2002). Design research: What we learn when we engage in design. *Journal of the Learning Sciences*, 11(1), 105-121. https://doi.org/10.1207/S15327809JLS1101_4
- Estrada, A., Agudelo, P., & Flórez, R. (2025). Inteligencia artificial en la enseñanza de la química: revisión sistemática de tendencias y desafíos. *Tecné, Episteme y Didaxis*, 57(1), 45-68. <https://doi.org/10.17227/ted.num57-18327>
- Fals Borda, O. (1985). *Conocimiento y poder popular: Lecciones con campesinos de Nicaragua, México y Colombia*. Siglo XXI.
- Fetters, M. D., Curry, L. A., & Creswell, J. W. (2013). Achieving integration in mixed methods designs: Principles and practices. *Health Services Research*, 48(6pt2), 2134-2156. <https://doi.org/10.1111/1475-6773.12117>
- Fishman, B., Penuel, W. R., Allen, A. R., Cheng, B. H., & Sabelli, N. (2013). *Design-based implementation research: An emerging model for transforming the relationship of research and practice*. En B. J. Fishman & W. R. Penuel (Eds.), *Design-based implementation research* (NSSE Yearbook, Vol. 112, Parte 2, pp. 136-156). National Society for the Study of Education.
- Gell-Mann, M. (1994). *El quark y el jaguar: Aventuras en lo simple y lo complejo*. Tusquets.
- Holmes, W., & Tuomi, I. (2022). State of the art and practice in AI in education. *European Journal of Education*, 57(4), 542-570. <https://doi.org/10.1111/ejed.12533>
- Jacobson, M. J., & Wilensky, U. (2006). Complex systems in education. *Journal of the Learning Sciences*, 15(1), 11-34. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1501_4

- Johnson, R. B., & Onwuegbuzie, A. J. (2004). Mixed methods research: A research paradigm whose time has come. *Educational Researcher*, 33(7), 14-26. <https://doi.org/10.3102/0013189X033007014>
- Kasneci, E., Seßler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., & Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>
- Kemmis, S., & McTaggart, R. (2014). *Participatory action research*. En N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *Handbook of qualitative research* (4.^a ed., pp. 549-603). SAGE.
- Kosmyna, N., Hauptmann, E., Yuan, Y. J., Liao, X.-H., Beresnitzky, A., & Braunstein, I. M. (2025). *Your brain on ChatGPT: Accumulation of cognitive debt when using an AI assistant for essay writing task*. ArXiv. <https://arxiv.org/abs/2506.08872>
- Maldonado, C. E. (2024). *Inteligencia artificial y ética*. Universidad El Bosque.
- Max-Neef, M. A. (2005). Foundations of transdisciplinarity. *Ecological Economics*, 53(1), 5-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.01.014>
- McKenney, S., & Reeves, T. C. (2019). *Conducting educational design research* (2.^a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315105642>
- Merleau-Ponty, M. (1993). *Fenomenología de la percepción*. Planeta-Agostini.
- Miao, F., & Cukurova, M. (2024). *AI competency framework for teachers*. UNESCO Publishing.
- Morin, E. (1999a). *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*. UNESCO Publishing.
- Morin, E. (1999b). *La cabeza bien puesta: Repensar la reforma, reformar el pensamiento*. Nueva Visión.
- Nicolescu, B. (1994). *La transdisciplinariedad: Una nueva visión del mundo*. Multiversidad Mundo Real Edgar Morin.
- Popper, K. (1980). *La lógica de la investigación científica*. Tecnos.
- Salinas, J. (2023). IA y docencia universitaria en ciencias exactas: Retos y perspectivas. *Perfiles Educativos*, 45(180), 112-129. <https://doi.org/10.22201/issue.24486167e.2023.180.60812>
- Swindell, J., Greeley, S., Farag, A., & Verdone, J. (2024). Generative AI and the Promethean gap: Rethinking human epistemic agency in the age of algorithmic intelligence. *AI & Society*. <https://doi.org/10.1007/s00146-024-01887-y>
- UNESCO. (2021). *Recomendación sobre la ética de la inteligencia artificial*. UNESCO Publishing.
- UNESCO. (2024). *AI competency framework for students*. UNESCO Publishing.
- UNESCO. (2025). *Media and information literacy: Global standards for MIL practitioners*. UNESCO Publishing.
- Wang, F., & Hannafin, M. J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 53(4), 5-23. <https://doi.org/10.1007/BF02504682>



Yuriev, E., Wink, M., & Holme, T. A. (2024). Generative AI in chemistry education: From personalised learning to ethical pedagogy. *Chemical Education Research and Practice*, 25(2), 341-358. <https://doi.org/10.1039/D3RP00225J>.