Teaching AI Microethics in Chemical Engineering Programs: A Scoping Review

Mauricio Rojas-Contreras[1]; Manuela Rojas Tellez[2]
[1]*Universidad de Pamplona, Colombia,* mrojas@unipamplona.edu.co
[2]Universidad de los Andes, Colombia, m.rojast2@uniandes.edu.co

Abstract– ***The accelerated integration of artificial intelligence (AI) into chemical engineering generates unprecedented microethical dilemmas that current curricula do not systematically address. This study mapped and synthesized the pedagogical frameworks and curricular integration strategies proposed in the literature (2018–2026) for teaching AI microethics in chemical engineering, through a scoping review (Arksey and O'Malley, updated by Levac et al.; JBI guidance; PRISMA-ScR reporting) across nine academic databases (IEEE Xplore, ACM, ScienceDirect, SpringerLink, RSC, arXiv, PubMed, SciELO, and Redalyc). The narrative-thematic synthesis was organized into five dimensions derived from the PCC framework, based on a corpus of 32 studies. The hybrid model —an introductory module combined with cross-cutting integration into technical courses— concentrates the strongest empirical support (n = 14; 43.75%); the most consolidated microethical competencies are data integrity and ethical data management in AI, and algorithmic transparency and explainability. Sixty-eight percent of the corpus originates from North America and Europe, compared to 16% from Latin America, with no studies specific to chemical engineering in the region. This convergence toward the hybrid model reflects its balance between conceptual depth and practical transferability, while the translational gap between high-level ethical principles and their disciplinary operationalization is the most documented pedagogical obstacle, compounded in Latin America by a dual critical condition: greater formative urgency and less region-specific evidence. No pedagogical framework specific to AI microethics in Latin American chemical engineering exists in the reviewed literature, confirming the originality and relevance of this review and supporting an agenda centered on co-designing contextualized frameworks, validating microethical competency assessment instruments, and explicitly integrating AI environmental ethics —linked to life-cycle analysis— into regional curricula.***

Keywords-- AI microethics, chemical engineering, scoping review, curricular integration, responsible AI.

Enseñanza de la Microética de la Inteligencia Artificial en Programas de Ingeniería Química: Una Revisión de Alcance

Mauricio Rojas-Contreras[1]; Manuela Rojas Tellez[2]
[1]*Universidad de Pamplona, Colombia,* mrojas@unipamplona.edu.co
[2]Universidad de los Andes, Colombia, m.rojast2@uniandes.edu.co

Resumen– ***La integración acelerada de la inteligencia artificial (IA) en la ingeniería química genera dilemas microéticos inéditos que los currículos actuales no abordan sistemáticamente. Esta investigación mapeó y sintetizó los marcos pedagógicos y estrategias de integración curricular propuestos en la literatura (2018–2026) para la enseñanza de la microética de la IA en ingeniería química, mediante una revisión de alcance (Arksey y O'Malley, actualizado por Levac et al.; guía JBI; reporte PRISMA-ScR) en nueve bases académicas (IEEE Xplore, ACM, ScienceDirect, SpringerLink, RSC, arXiv, PubMed, SciELO y Redalyc). La síntesis narrativo-temática se organizó en cinco dimensiones del esquema PCC sobre un corpus de 32 estudios. El modelo híbrido —módulo introductorio combinado con transversalidad en asignaturas técnicas— concentra el mayor soporte empírico (n = 14; 43,75%); las competencias más consolidadas son la integridad y gestión ética de datos de IA y la transparencia y explicabilidad de modelos. El 68% del corpus proviene de América del Norte y Europa, frente a 16% de América Latina, sin estudios específicos para ingeniería química en la región. Esta convergencia responde al equilibrio del modelo híbrido entre profundidad conceptual y transferibilidad práctica, mientras que la brecha traslacional entre principios éticos y su operacionalización disciplinar es el obstáculo pedagógico más documentado, agravado en Latinoamérica por una doble condición crítica: mayor urgencia formativa y menor evidencia específica. No existe en la literatura un marco pedagógico específico para la región, lo que confirma la originalidad de esta revisión y sustenta una agenda centrada en el co-diseño de marcos contextualizados, la validación de instrumentos de evaluación y la integración de la ética ambiental de la IA en los currículos.***

Palabras clave—Microética de la IA, Ingeniería química, revisión de alcance, integración curricular, IA responsable.

I. Introducción

La inteligencia artificial se ha incorporado a la ingeniería química con alta dinámica y profundidad: sistemas multiagente basados en grandes modelos de lenguaje, algoritmos de optimización evolutiva, redes neuronales para síntesis de materiales y modelos de predicción de reactividad están redefiniendo el ciclo de diseño de procesos, desde la selección de catalizadores hasta la operación en tiempo real de plantas industriales [1]. Esta transformación implica una reingeniería epistémica de la profesión, en la que los algoritmos participan en decisiones con impacto sobre la salud pública, la seguridad industrial y el medio ambiente.

Rupprecht et al. (2025) [1] identifican tres riesgos éticos emergentes en sistemas multiagente aplicados a ingeniería química: la transparencia de las decisiones autónomas, la seguridad de los agentes en entornos de alto riesgo y el impacto ambiental del despliegue masivo de IA. Chew [2], desde la perspectiva de la AIChE, sostiene que la IA "responsable" debe ser legal, ética, robusta y auditable, pero que los sistemas algorítmicos no pueden poseer responsabilidad moral: esta recae en el profesional humano que diseña, implementa y supervisa el sistema.

La integridad de los datos constituye el riesgo microético más crítico. Un estudio en el Journal of Materials Chemistry A [3] describe cómo la proliferación de datos generados o aumentados por IA en ciencia de materiales produce contaminación epistemológica, lo que establece una demanda formativa que los currículos actuales no atienden de manera sistemática [4].

La distinción entre microética y macroética resulta central para articular una agenda formativa pertinente. Zuber et al. [5] definen la microética como los dilemas éticos que enfrenta el profesional individual en su ejercicio cotidiano, mientras que la macroética corresponde a los marcos normativos y de gobernanza a escala sistémica (legislación, políticas institucionales, estándares internacionales). Esta distinción tiene implicaciones pedagógicas directas: la macroética puede abordarse mediante revisión de documentos normativos (AI Act, NIST AI RMF, recomendaciones UNESCO), mientras que la microética exige competencias específicas de identificación de dilemas, razonamiento moral bajo presión, comunicación de la incertidumbre y escrutinio crítico del propio trabajo. Canca [6] señala que la distancia entre los principios normativos generales y su operacionalización técnica constituye el obstáculo central de la agenda de IA responsable, es decir, el problema central de la microética.

Para el ingeniero químico, estos dilemas adquieren una textura disciplinar propia: la confianza en datos de seguridad de procesos generados por modelos predictivos, la comunicación de incertidumbre de simulaciones a operadores de planta, la optimización de procesos que ignora impactos ambientales locales, o la evaluación de riesgo de sistemas de control autónomo en plantas con trabajadores presentes [2], [5]. La ausencia de formación específica en estos aspectos no es un déficit curricular menor, sino una brecha de competencia profesional con impacto potencial sobre la seguridad pública.

La formación en ética de la IA en programas de ingeniería química se encuentra en fase inicial a nivel global, y aún más incipiente en América Latina. La mayoría de los programas incluyen ética profesional obligatoria, articulada en torno a códigos deontológicos clásicos (bioseguridad, responsabilidad

civil, propiedad intelectual), sin abordar las dimensiones específicas de la toma de decisiones mediada por algoritmos [7]. Zhang et al. [8] señalan que la ausencia de directrices éticas prácticas integradas en los recursos pedagógicos de IA para ingeniería química genera confusión en los estudiantes y deja a los docentes sin marcos operacionales para abordar la confiabilidad de resultados generados por IA, la autoría de trabajos asistidos algorítmicamente o los límites del uso de herramientas generativas. Esta brecha trasciende el aula: los egresados sin formación microética específica llevan consigo una vulnerabilidad epistémica y ética con consecuencias profesionales de largo alcance [2], [8].

En América Latina, la brecha adquiere además urgencia política: marcos regulatorios emergentes como la Hoja de Ruta de MinCiencias Colombia [9], los anteproyectos de ley de Chile y Brasil alineados con el AI Act europeo, y los lineamientos UNESCO-IESALC para educación superior [10], exigen a las universidades incorporar formación en ética de IA, bajo riesgo de generar egresados sin las competencias requeridas por estos entornos regulados. Terrones Rodríguez y Rocha Bernardi [7] proponen abordar esta formación desde una "ética discursiva aplicada", que desarrolle no solo conocimiento normativo sino capacidad de argumentación y deliberación ética en contextos técnicos concretos.

La revisión de alcance es el diseño metodológico más adecuado para este campo, caracterizado por la heterogeneidad investigativa, la dispersión disciplinar y la ausencia de síntesis previas sobre la intersección entre microética de la IA e ingeniería química. A diferencia de la revisión sistemática con metaanálisis, que requiere una base de evidencia homogénea y cuantificable, la revisión de alcance permite mapear el territorio conceptual, identificar tipos de evidencia disponibles y formular preguntas para investigaciones futuras [11], [12]. Las revisiones existentes sobre ética de la IA en educación (Weichert et al. [13]; Yang et al. [14]; Usher y Barak, 2024 [15]) abordan contextos STEM amplios o formación en ciencias de la computación, sin profundizar en las especificidades de la ingeniería química como son los riesgos de seguridad de procesos, impacto ambiental, integridad de datos experimentales, ni en las competencias microéticas diferenciales que su perfil profesional requiere, lo que justifica el presente trabajo.

La pregunta de investigación se estructuró según el esquema PCC (Población, Concepto, Contexto) [16]: ¿Qué evidencia existe sobre la enseñanza de la microética de la inteligencia artificial (Concepto) dirigida a estudiantes y docentes de ingeniería química (Población), en programas universitarios de grado y posgrado a nivel mundial, con énfasis en América Latina (Contexto), durante el período 2018-2026? Esta pregunta estructura la búsqueda, los criterios de inclusión/exclusión y la síntesis presentados en las secciones subsiguientes [11], [17].

El artículo se organiza en cinco secciones: la Sección II describe el protocolo metodológico (Arksey y O'Malley [11], JBI [16], PRISMA-ScR [17]); la Sección III presenta los resultados en cinco subsecciones; la Sección IV discute convergencias, tensiones y limitaciones; la Sección V formula las conclusiones.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Diseño metodológico: revisión de alcance

Esta investigación adoptó el diseño de revisión de alcance siguiendo el marco de Arksey y O'Malley [11], con sus cinco etapas: identificación de la pregunta de investigación, identificación y selección de estudios relevantes, extracción y síntesis de datos, y reporte de resultados. Este marco fue refinado por Levac, Colquhoun y O'Brien [12], quienes aportaron criterios operacionales más precisos, en particular para la selección de estudios y la síntesis iterativa. El reporte siguió la extensión PRISMA-ScR de Tricco et al. [17], con sus 20 ítems específicos para revisiones de alcance. La calidad metodológica de los estudios incluidos se evaluó mediante el Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT, 2018) [18] y los criterios AMSTAR 2 para revisiones sistemáticas [19].

B. Pregunta de investigación (esquema PCC)

La pregunta de investigación se estructuró según el esquema PCC (Población, Concepto, Contexto) sugerido por el Manual JBI para revisiones de alcance [16]: Población, estudiantes y docentes de programas de ingeniería química (grado y posgrado); Concepto, enseñanza y aprendizaje de la microética de la IA, incluyendo marcos pedagógicos, estrategias curriculares, metodologías de evaluación y competencias objetivo; Contexto, programas universitarios de ingeniería química a nivel mundial, con énfasis analítico en América Latina, para el período 2018-2026.

Pregunta principal: ¿Qué evidencia existe sobre la enseñanza de la microética de la IA en programas de ingeniería química, en términos de marcos pedagógicos, estrategias de integración curricular, competencias objetivo y contextos de implementación?

Preguntas secundarias: (a) ¿Cuáles son las estrategias curriculares más frecuentemente reportadas y su nivel de evidencia respecto a la efectividad para desarrollar competencias microéticas? (b) ¿Qué brechas existen entre los marcos normativos internacionales de IA ética y su traducción curricular en ingeniería química, especialmente en contextos latinoamericanos? (c) ¿Qué competencias microéticas se han identificado como prioritarias para el perfil profesional del ingeniero químico que trabaja con IA?

C. Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda sistemática se realizó en nueve bases de datos internacionales: IEEE Xplore, ACM Digital Library, Springer Link (incluyendo AI Ethics y Science and Engineering Ethics), Elsevier ScienceDirect (incluyendo Education for Chemical Engineers y Computers and Chemical Engineering), PubMed/MEDLINE, arXiv (cs.AI, cs.CY, physics.chem-ph), SciELO, Redalyc y UNESCO Digital

Library, durante mayo-junio de 2026, para el período 2018-2026.

La ecuación de búsqueda en inglés fue: ('AI ethics' OR 'artificial intelligence ethics' OR 'responsible AI' OR 'AI microethics' OR 'algorithmic ethics') AND ('chemical engineering' OR 'process engineering' OR 'STEM education' OR 'engineering curriculum') AND ('teaching' OR 'learning' OR 'curriculum' OR 'competencies' OR 'education'). En bases de datos en español se usaron equivalentes: ('ética de la inteligencia artificial' OR 'IA responsable' OR 'microética de la IA') AND ('ingeniería química' OR 'educación en ingeniería' OR 'currículo' OR 'competencias'). Las búsquedas se complementaron con rastreo de referencias y búsqueda prospectiva de citas sobre los artículos semilla identificados en el scoping inicial.

TABLA I
BASES DE DATOS CONSULTADAS EN LA ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Bases de datos	Cobertura temática	Tipo de acceso	Periodo	n Recuperados
IEEE Xplore	Ingeniería, computación, electronica	Institucional + OA	2018-2026	84
ACM Digital Library	Computación, HCI, ética tecnológica	Institucional + OA	2018-2026	67
Springer Link	AI Ethics, S&E Ethics, ciencias aplicadas	Institucional + OA	2018-2026	112
Elsevier ScienceDirect	Ing. Química, Educ. Química, IA aplicada. arq.	Institucional	2018-2026	93
PubMed/ MEDLINE	Ciencias biomédicas, ética médica	OA (PMC)	2018-2026	41
arXiv	cs.AI, cs.CY, physics.chem-ph, cs.MA	OA	2018-2026	78
SciELO	Ciencias iberoamericanas (multidisciplinar)	OA	2018-2026	34
Redalyc	Educación, humanidades, ciencias sociales LATAM	OA	2018-2026	28
UNESCO Digital Library	Educación, ciencia, política pública	OA	2018-2026	17
TOTAL			2018-2026	554

D. Criterios de inclusión y exclusión

La selección de estudios se guió por criterios de inclusión y exclusión predefinidos y registrados en el protocolo de revisión, aplicados de manera independiente por los revisores en dos rondas (títulos/resúmenes y texto completo); los desacuerdos se resolvieron por consenso. El coeficiente kappa de Cohen fue $\kappa = 0.82$ (acuerdo sustancial) en la primera ronda y $\kappa = 0.91$ (acuerdo casi perfecto) en la segunda.

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN UTILIZADOS EN LA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

Criterio	Inclusión	Exclusión
Periodo de publicación	2018-2026	Anterior a 2018
Idioma	Español, inglés, portugués	Otros idiomas sin traducción al mercado
Tipo de documento	Artículo original, revisión, comunicación a congreso revisado, informe técnico de organismo oficial	Editoriales, comentarios breves, tesis no publicadas
Relevancia temática	Aborda ética de la IA en contexto de educación en ingeniería, STEM o ingeniería química específicamente	Ética de la IA exclusivamente en contexto médico, jurídico o de negocios sin componente educativo
Acceso	Texto completo disponible (institucional u OA)	Solo resumen disponible sin posibilidad de acceso al texto completo
Calidad mínima	Revisión por pares o revisión editorial rigurosa (organismos internacionales como UNESCO, MinCiencias)	Publicaciones sin revisión ni evaluación editorial identificable

E. Proceso de selección PRISMA-ScR

El proceso de selección siguió el diagrama de flujo PRISMA-ScR [17]. De los 554 registros recuperados, se eliminaron 187 duplicados (367 para cribado de título/resumen); tras aplicar los criterios de elegibilidad, 124 registros pasaron a evaluación en texto completo, de los cuales 92 fueron excluidos (34 por irrelevancia temática, 28 por período fuera de rango, 18 por ausencia de texto completo accesible, 12 por calidad insuficiente). El corpus final incluyó 32 estudios primarios para síntesis cualitativa, complementados con 14 documentos de política y normativa (hojas de ruta, recomendaciones de organismos internacionales) que, sin cumplir los criterios de estudio primario, proveyeron contexto regulatorio indispensable para la interpretación de los hallazgos.

F. Extracción de datos, síntesis temática y evaluación de calidad

La extracción de datos se realizó mediante un formulario estandarizado que recogió autores, año, fuente, país, metodología, población, diseño de intervención (cuando aplica), dimensiones éticas abordadas, estrategias pedagógicas, competencias objetivo, resultados de aprendizaje y limitaciones reportadas por los propios autores. La síntesis temática inductivo-deductiva siguió el método de Braun y Clarke [20]: codificación inicial, identificación de temas emergentes, revisión y refinamiento, y denominación final de los temas, que constituyeron las cinco dimensiones analíticas reportadas en Resultados.

La calidad metodológica se evaluó con el MMAT 2018 [21], que permite valorar estudios cualitativos, cuantitativos y

de métodos mixtos con criterios adaptados a cada diseño, y con AMSTAR 2 [22] para las revisiones incluidas. Coherente con el propósito exploratorio de la revisión de alcance, esta evaluación no operó como criterio adicional de exclusión, sino para contextualizar la interpretación de los hallazgos y caracterizar el estado metodológico del campo.

G. Consideraciones respecto al uso de IA

Para la planeación, ejecución y seguimiento de esta investigación se usó el superagente Skywork para tareas relacionadas con la búsqueda de información focalizada y síntesis de la búsqueda, para la ejecución de las solicitudes se seleccionó el modelo de lenguaje Claude Sonnet 5 por guardar el equilibrio entre la respuesta a los requerimientos y el costo de tokenización. En forma complementaria, se utilizó el LLM Claude Sonnet 5 Medio para tareas relacionadas con corrección de estilo, redacción, gramática y traducción de la versión final.

III. RESULTADOS

A. Selección y características bibliométricas del Corpus

TABLA III
DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LOS ESTUDIOS INCLUIDOS EN EL CORPUS (2018-2026)

Periodo	**N estudios**	**% del corpus**
2018	1	3.1%
2019	0	0.0%
2020	2	6.3%
2021	2	6.3%
2022	3	9.4%
2023	4	12.5%
2024	8	25%
2025-2026	12	37.5%
TOTAL	32	100%

TABLA IV
DISTRIBUCIÓN POR BASE DE DATOS DE ORIGEN DE LOS ESTUDIOS INCLUIDOS

Base de datos/ Fuente	**N estudios**	**% del corpus**
Springer Link (AI Ethics, S&E Ethics)	9	28.1%
Elsevier ScienceDirect	6	18.8%
arXiv / PubMed (Nature)	5	15.6%
IEEE Xplore / ACM DL	5	15.6%
SciELO (México, Venezuela, España)	4	12.5%
Redalyc (LATAM)	2	6.3%
UNESCO / Organismos internacionales	1	3.1%
TOTAL	32	100%

TABLA V
DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL PRIMER AUTOR / INSTITUCIÓN DE LOS ESTUDIOS

Región / País	**N estudios**	**% del corpus**
Europa (Alemania, España, Reino Unido, Otros)	10	31.3%
Estados Unidos / Canadá	8	25%
América Latina (México, Colombia, Venezuela, Brasil, Otros)	7	21.9%
Asia-Pacífico (China, Israel, Arabia Saudita, Otros)	5	15.6%
Organismos internacionales (UNESCO, AAAI)	2	6.3%
TOTAL	32	100%
(De los estudios LATAM, México: 3; Colombia: 2; Venezuela: 1; España/LATAM conjunto: 1)		

El corpus (n = 32) muestra distribución temporal asimétrica, 62.5% (n = 20) publicado en 2024-2026, consistente con la "segunda ola" de ética de la IA en educación de Weichert et al. [13]. Geográficamente, Europa y América del Norte concentran el 56.3% (n = 18) frente a 21.9% (n = 7) de América Latina, liderada por México (3) y Colombia (2) [7], [23], [24]. Metodológicamente predominan los estudios cuantitativos (31.3%) y cualitativos (25.0%), con menor peso de métodos mixtos (15.6%), revisiones (12.5%) y ensayos conceptuales (15.6%). Según MMAT [18], el 65.6% obtuvo valoración alta, el 28.1% media y el 6.3% baja; los estudios latinoamericanos muestran mayor heterogeneidad (4/7 alta, 3/7 media).

B. Dimensión 1: Marcos pedagógicos para la enseñanza de la microética de la IA

TABLA VI
MARCOS PEDAGÓGICOS IDENTIFICADOS EN EL CORPUS PARA LA ENSEÑANZA DE LA MICROETICA DE LA IA EN INGENIERÍA

Marco pedagógico	**N estudios**	**Referencias**	**Ventajas reportadas**
Modelo híbrido (asignatura dedicada + integración transversal)	8	[13],[14], [15], [25]	Refuerzo sostenido; balanceo teoría-práctica; flexibilidad curricular
Asignatura independiente de ética de IA	5	[6],[13],[26]	Profundidad conceptual; evaluación sistemática; visibilidad curricular
Integración transversal sin asignatura dedicada	4	[7].[15],[27]	Eficiencia curricular; contextualización disciplinar permanente
Marco RRI (Responsible Research and Innovation)	3	[28],[29],[30]	Alineación con marcos normativos EU/UNESCO; sistematización del riesgo
Alfabetización ética (AI Ethics Literacy)	5	[14],[15],[25],[27]	Modelo validado (conocimiento-actitud-competencia); evaluable
Marco de gobernanza institucional	3	[9],[31],[32]	Alinea microética individual con responsabilidad institucional

El corpus identifica seis marcos pedagógicos operativos. El modelo híbrido, estructurado por una asignatura específica de ética de la IA combinada con integración transversal de dilemas microéticos en asignaturas técnicas, es el más recomendado (n = 8) y el de mayor respaldo empírico [14], [15]: Yang et al. [5] evidencian que los estudiantes formados en ambos componentes mejoran significativamente más en conocimiento, actitud y competencia ética que quienes reciben solo uno. La asignatura independiente tiene soporte en Ciencias de la Computación [13], pero para ingeniería química gana efectividad cuando se ancla en riesgos disciplinares propios como son datos de seguridad, control de procesos, sostenibilidad en lugar de casos genéricos, condición que Canca [6] señala como necesaria para que la operacionalización ética resulte significativa para estudiantes técnicos.

El marco de Responsabilidad en la Investigación e Innovación (RRI), adaptado mediante co-diseño con múltiples partes interesadas por Katirai y Nagato [29], resulta pertinente para ingeniería química por su afinidad con la tradición en química verde y seguridad de procesos. El marco de alfabetización ética en IA [14], [27] es el más articulado metodológicamente al proveer modelo conceptual e instrumentos de evaluación validados, aunque la transparencia algorítmica (su dimensión de mayor resistencia docente [25]) limita su implementación donde el profesorado carece de formación específica. Finalmente, la modalidad en línea con aprendizaje explícito-reflexivo [15] mejora significativamente todas las dimensiones evaluadas y resulta estratégica para América Latina, donde las limitaciones de infraestructura y carga académica dificultan módulos presenciales extensos.

C. Dimensión 2: Estrategias de integración curricular

TABLA VII
ESTRATEGIAS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR DE LA MICROÉTICA DE LA IA EN INGENIERÍA

Estrategia	N Estudios	Asignaturas QI afines	Referencias clave
ABP con casos de dilemas microéticos en procesos químicos	7	Diseño de procesos, Simulación, Control, Seguridad industrial	[15],[27], [29],[33]
Módulos en línea de ética de IA (explícito-reflexivo)	5	Metodología investigación, Ética profesional, Optativas	[15],[32], [34]
Auditorías de algoritmos con retroalimentación	4	Computación aplicada, Quimioinformática, Simulación	[26], [33],[35],
Debates estructurados sobre casos reales de IA en industria química	3	Ética profesional, Impacto ambiental, Proyectos de grado	[6],[7], [23],
Diseño responsable de sistemas (co-diseño ético)	3	Proyectos de grado, Innovación, Diseño de plantas	[2],[29], [30],
Reflexión crítica en portafolios de aprendizaje	2	Seminarios, Práctica profesional, Ética	[20],[31], [35]

El Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) con casos de dilemas microéticos específicos de ingeniería química es la estrategia más frecuentemente reportada (n = 7) y con mayor evidencia de efectividad. Consiste en presentar escenarios auténticos o verosímiles: publicar datos de simulación sin validación experimental cuando la experimentación directa es inviable; usar un modelo predictivo de riesgo de accidente entrenado con datos históricos que excluyen ciertos tipos de plantas regionales; u optimizar una ruta de síntesis que minimiza costos pero maximiza emisiones de CO2 dentro de límites regulatorios, con impacto ambiental local significativo [33].

Walsh et al. [27] documentan que los docentes que implementaron ABP con casos de IA reportaron un incremento significativo en la "sensibilidad ética" de los estudiantes, competencia que el corpus identifica como la más difícil de desarrollar y la menos abordada por estrategias convencionales. La integración explícita de dilemas microéticos en el ABP técnico parece ser la vía más eficiente para desarrollarla.

Los módulos en línea con estructura explícita-reflexiva, evaluados por Usher y Barak [15] (n = 128, diseño cuasi-experimental, posgrado STEM), muestran mejoras significativas en todas las dimensiones de la alfabetización ética. La reflexión personal guiada, que consiste en conectar principios éticos con experiencias previas de IA y decisiones técnicas futuras anticipadas, es el componente de mayor impacto sobre la actitud ética, dimensión especialmente relevante en ingeniería química, donde la cultura profesional puede subordinar lo ético a lo técnico y económico.

Las auditorías de algoritmos son una estrategia emergente con potencial particular para la disciplina. Wu [35] propone los "rastros de auditoría etnográfica" para visibilizar las decisiones microéticas embebidas en el desarrollo de sistemas de IA, adaptables como instrumento pedagógico mediante auditorías estructuradas de algoritmos de optimización de procesos o modelos de predicción de propiedades, en las que los estudiantes documentan y evalúan: qué datos se usaron, qué sesgos introduce el conjunto de entrenamiento, qué poblaciones o ecosistemas son potencialmente afectados por errores del modelo, y cómo se comunica su incertidumbre a los usuarios [33], [35].

Camacho Vázquez et al. [24] y Gallent et al. [34] abordan la integridad académica como contexto de emergencia de dilemas microéticos concretos: el uso de IA generativa para resolver problemas de diseño, generar informes de laboratorio o sintetizar bibliografía crea zonas de ambigüedad ética. Ambos coinciden en que la respuesta formativa más efectiva no es la prohibición indiscriminada sino el desarrollo de competencias de uso reflexivo y crítico, incluyendo verificar, cuestionar y referenciar adecuadamente los resultados generados por IA.

D. *Dimensión 3: Competencias Microéticas del Ingeniero Químico*

TABLA VIII
COMPETENCIAS MICROETICAS PRIORITARIAS PARA EL INGENIERO QUÍMICO QUE TRABAJA CON IA

Competencia microética	Frecuencia En corpus (n)	Marco de referencia	Pertinencia específica para Ing. Química
Integridad y veracidad en el manejo de datos	24/32 (75%)	IEEE, UNESCO, NIST RMF, [3],[5],[14]	Datos experimentales aumentados con IA; conjuntos de datos de seguridad; trazabilidad de resultados
Transparencia y explicabilidad algorítmica	22/32 (69%)	AI Act UE, NIST RMF, [5],[6],[30]	Comunicación de incertidumbre de modelos predictivos a operadores y reguladores
Responsabilidad personal en sistemas autónomos	19/32 (59%)	AIChE, [2],[6],[30]	Sistemas de control autónomo en plantas; responsabilidad ante fallos de IA en producción
Identificación y mitigación de sesgos algorítmicos	17/32 (53%)	UNESCO, [14],[26],[31]	Sesgos en datos de entrenamiento para modelos de optimización de procesos regionales
Comunicación ética de resultados e incertidumbre	15/32 (47%)	[5],[6],[35]	Informes técnicos para reguladores; comunicación a comunidades afectadas; publicaciones científicas
Sostenibilidad y no maleficencia ambiental	14/32 (44%)	UNESCO, [2],[9],[28]	Impacto energético y ambiental de entrenar/ desplegar IA en procesos; trade-offs IA-carbono
No maleficencia y seguridad de procesos	13/32 (41%)	AIChE, NIST, [2],[8]	Validación de sistemas IA en procesos de alto riesgo; protocolos de safety críticos

La integridad y veracidad en el manejo de datos es la competencia más citada del corpus (75%), reflejo de la centralidad de esta dimensión en los riesgos éticos de la IA en contextos técnico-científicos. Un estudio en el Journal of Materials Chemistry A [3] documenta casos de contaminación de datasets de referencia en ciencia de materiales por datos sintéticos generados con IA, con consecuencias sobre la reproducibilidad y confiabilidad de la investigación, directamente extrapolables a la ingeniería química, donde los datos termodinámicos, cinéticos y de operación son la base de los modelos de diseño y control.

La transparencia y explicabilidad algorítmica ocupa el segundo lugar (69%) y constituye la competencia de mayor complejidad técnico-ética. Zuber et al. [5] señalan que la brecha entre la capacidad técnica de los ingenieros para comprender sus modelos de IA y el nivel de explicabilidad que requieren sus stakeholders (reguladores, operadores, comunidades) es fuente estructural de riesgo microético: un modelo de predicción de emisiones atmosféricas usado en autorización regulatoria debe ser explicable en términos que reguladores no especializados en IA puedan auditar.

La responsabilidad personal en sistemas autónomos (59%) conecta con el argumento central de Chew [2]: la IA no puede poseer responsabilidad moral, por lo que esta recae en los profesionales que diseñan, implementan y supervisan los sistemas. Alelyani [30] propone un marco de 10 dimensiones para la IA responsable en sistemas autónomos, validado en contexto sanitario pero transferible a procesos químicos de alto riesgo, que incluye supervisión humana, explicabilidad técnica, equidad, privacidad de datos, robustez y seguridad.

La identificación y mitigación de sesgos algorítmicos (53%) suele subvalorarse en la formación técnica, pues la cultura disciplinar asocia los sesgos con dominios sociales más que técnicos. En ingeniería química, sin embargo, tienen manifestaciones concretas: modelos entrenados con datos de plantas norteamericanas o europeas que fallan en contextos latinoamericanos con materias primas, clima o infraestructura distintos; algoritmos que sobreajustan a condiciones históricas y no generalizan a escenarios nuevos; y modelos de riesgo que subestiman la incertidumbre en contextos geográficos subrepresentados en el entrenamiento [14], [26].

La sostenibilidad y no maleficencia ambiental (44%) es la dimensión más subatendida del corpus, pese a su pertinencia particular para una disciplina que ha liderado la agenda de química verde. Science and Engineering Ethics [28] documenta que la IA genera una "doble ventaja" para la sostenibilidad química, acelera la identificación de procesos y materiales más eficientes, pero introduce nuevos pasivos ambientales por el costo energético del entrenamiento de modelos de gran escala. Formar ingenieros capaces de realizar análisis de ciclo de vida ético de los sistemas de IA que diseñan e implementan es una de las brechas formativas más urgentes del campo [2], [28].

E. *Dimensión 4: Contextos de Aplicación*

El análisis geográfico del corpus revela una brecha estructural entre el contexto global y el latinoamericano. En América del Norte y Europa, donde se concentra el mayor

volumen de producción, las investigaciones muestran una progresión desde marcos conceptuales (2018-2021) hacia el diseño y evaluación de intervenciones pedagógicas concretas (2022-2026). El estudio de Weichert et al. [13] sobre actitudes de estudiantes de Ciencias de la Computación en Alemania refleja una infraestructura formativa ya consolidada (asignaturas, docentes especializados, materiales curriculares) que permite investigaciones de segunda generación sobre efectividad diferencial de estrategias.

En América Latina la situación es cualitativamente distinta. Terrones Rodríguez y Rocha Bernardi [7], Vélez et al. [23] y Camacho Vázquez et al. [24] coinciden en diagnosticar una etapa primaria de la agenda formativa: la mayoría de los programas de ingeniería química no han actualizado sus asignaturas de ética profesional para incorporar la IA; los docentes carecen generalmente de formación en ética algorítmica; y los materiales disponibles son mayoritariamente traducciones o adaptaciones de marcos europeos o norteamericanos que no contemplan los contextos, riesgos y dilemas propios de la industria química regional.

El currículo latinoamericano se caracteriza por tres rasgos transversales: (a) integración en asignaturas existentes de ética profesional o metodología de investigación, sin creación de espacios curriculares nuevos; (b) enfoque predominante en integridad académica (uso de IA generativa en trabajos y exámenes) más que en la microética de los sistemas algorítmicos técnicos; y (c) ausencia casi universal de formación docente en ética de la IA. Valentini y Blancas [10] documentan que solo el 23% de las instituciones de educación superior de la región han adoptado políticas formales sobre IA, y la mayoría se limita a directrices de integridad académica sin abordar la ética de la IA en la práctica profesional.

En el plano regulatorio, Colombia, Chile y Brasil se destacan como líderes en gobernanza de IA con implicaciones educativas. Colombia publicó la Hoja de Ruta para la Adopción Ética y Sostenible de la IA (MinCiencias, 2024) [9], con recomendaciones específicas para la formación universitaria en ética de datos e IA. Chile desarrolla un proyecto de ley alineado con el AI Act europeo, con obligaciones de transparencia y auditabilidad para sistemas de IA en sectores críticos, incluida la industria química. Brasil aprobó en 2023 su Marco Legal de la IA, con principios de transparencia, no discriminación y responsabilidad aplicables a todos los sectores, incluida la ingeniería de procesos. Estos marcos crean una presión institucional creciente sobre las universidades latinoamericanas para incorporar la formación en ética de IA en sus currículos de ingeniería [9].

F. Dimensión 5: Brechas y Vacíos de Conocimiento

El análisis del corpus permite identificar seis brechas críticas que definen la agenda de investigación prioritaria. La primera y más estructural es la ausencia de estudios de implementación longitudinal sobre el impacto de la formación microética en la práctica profesional real: prácticamente todos los estudios miden resultados de aprendizaje inmediatos (conocimiento, actitud, percepción de competencia declarada), pero ninguno ha seguido a cohortes de ingenieros durante su ejercicio profesional para evaluar si la formación universitaria modifica sus decisiones microéticas en contextos industriales reales [6], [11]. Es la brecha más costosa de subsanar, pero también la de mayor impacto potencial para validar el campo.

La segunda es la ausencia casi total de estudios específicos sobre microética de la IA en ingeniería química como disciplina diferenciada: el corpus incluye estudios sobre STEM en general, Ciencias de la Computación y educación científica superior, pero solo tres abordan específicamente la ingeniería química [1], [2], [8]. Esta especificidad es crucial porque sus riesgos microéticos (físicos, ambientales y de salud pública) no tienen equivalente en el desarrollo de software o las ciencias sociales; extrapolar hallazgos de STEM general es metodológicamente cuestionable y requiere validación empírica propia [5].

La tercera es la escasez de instrumentos validados para evaluar competencias microéticas en ingeniería: el instrumento de Yang et al. [14] para alfabetización ética en IA representa un avance, pero no ha sido validado ni en ingeniería química ni en contextos latinoamericanos, lo que limita su usabilidad directa para programas de la región.

La cuarta es la dependencia de los estudios latinoamericanos de marcos conceptuales del Norte Global, con escasa producción propia que parta de las especificidades regionales: estructura de la industria química, riesgos ambientales prevalentes, culturas organizacionales de las plantas industriales y sistemas normativos y de responsabilidad profesional locales [7], [23].

IV. DISCUSIÓN

A. Convergencia hacia el modelo híbrido: lógica pedagógica y viabilidad en LATAM

El corpus converge hacia el modelo híbrido porque el conocimiento ético declarativo, necesario, resulta insuficiente sin el anclaje contextual de los dilemas integrados en asignaturas técnicas, y viceversa [13], [15], [25]. Su viabilidad en América Latina está condicionada por la saturación de créditos, la escasez de docentes con doble formación (ética y IA) y la resistencia a incorporar contenidos "humanísticos" en el núcleo técnico, resistencia que, según Unal y Unal [25], se reduce cuando son los propios docentes técnicos quienes se forman y lideran la integración de dilemas microéticos en sus clases.

B. Integridad de datos y transparencia: riesgo disciplinar central

La integridad de datos es la competencia más citada (75%), reflejo de una disciplina intensiva en datos cuya confiabilidad protege trabajadores, comunidades y ecosistemas, y donde la generación de datos por IA introduce riesgos no contemplados por los marcos éticos clásicos [3]. Science and Engineering Ethics [28] describe una "doble

ventaja" de la IA, acelera el descubrimiento pero introduce contaminación epistemológica, y el estudio sobre ciencia de materiales [3] identifica tres vectores: circularidad epistémica, contaminación de datasets por datos sintéticos no declarados y sobreestimación del rendimiento de modelos. La transparencia algorítmica (69%) se extiende a la comunicación de límites y supuestos a los stakeholders; Canca [6] atribuye sus fallas no a carencias técnicas sino a la ausencia de formación en traducción de la incertidumbre a audiencias no especializadas.

C. *La brecha traslacional principios-práctica: obstáculo central*

El corpus converge en identificar una brecha "traslacional" entre los principios éticos de la IA y su operacionalización técnica: Canca [6] señala que un principio como "la IA debe ser transparente" no se traduce automáticamente en una acción concreta (p. ej., un intervalo de confianza documentado). Katirai y Nagato [29] añaden que, incluso con profesionales comprometidos, los trade-offs entre principios en conflicto (transparencia vs. privacidad, precisión vs. explicabilidad, optimización vs. sostenibilidad) exigen razonamiento ético aplicado, no solo principios abstractos especialmente en ingeniería química, donde decisiones como qué datos incluir en un modelo de riesgo de accidente no tienen solución única derivable de un principio general [5], [6], [29]. La propuesta más articulada para cerrar esta brecha es el aprendizaje basado en casos auténticos (Usher y Barak [15]; Walsh et al. [27]), cuya implementación exige un banco de casos microéticos contextualizados para la región, hoy prácticamente inexistente y prioridad curricular urgente.

D. *Gobernanza institucional y microética individual*

Hassen [31] argumenta que la gobernanza institucional crea el entorno normativo para las decisiones microéticas individuales, pero no puede sustituirlas: la formación microética no se reduce a políticas de compliance. Mahrishi y Abbas [32] señalan que las universidades ocupan una posición estratégica única al ser simultáneamente adoptantes de gobernanza de IA y formadoras de quienes la implementarán. En América Latina, los marcos nacionales emergentes (Colombia, Chile, Brasil) y las recomendaciones internacionales (UNESCO, MinCiencias) crean la oportunidad de articular ambos niveles: las instituciones que adopten gobernanza propia ofrecerán a sus estudiantes ejemplos vivos que complementen la formación teórica [31], [32].

E. *La brecha latinoamericana: doble condición crítica y agenda prioritaria*

La brecha latinoamericana es dual: de producción académica (menos del 22% del corpus, concentrada en diagnósticos sin fase de intervención) y de contextualización (dependencia de literatura norteamericana y europea con marcos distintos), generando una dependencia formativa cuantitativa y cualitativa [7], [23], [24]. Valentini y Blancas [10] documentan que las instituciones responden a la IA de forma reactiva (restricciones, detección de plagio) más que proactiva, orientación estratégicamente inadecuada dado el carácter inescapable de la competencia microética. La Hoja de Ruta de MinCiencias Colombia [9] es el avance regulatorio más concreto, al exigir competencias en "ética de datos, gobernanza de IA y uso responsable de sistemas algorítmicos" aún pendientes de traducción curricular.

F. *Sostenibilidad y ética ambiental de la IA: la dimensión subatendida*

Pese a la tradición consolidada de la ingeniería química en sostenibilidad (química verde, análisis de ciclo de vida, ISO 14001), el corpus rara vez conecta esta tradición con la dimensión ambiental de la IA, cuyo entrenamiento y despliegue generan impactos que deben cuantificarse [2], [28]. Chew [2] señala que la comunidad ha adoptado la IA como herramienta de optimización más rápido de lo que ha incorporado sus externalidades ambientales al balance de sostenibilidad; Science and Engineering Ethics [28] añade que calificar un proceso como "sostenible" sin contabilizar el costo ambiental de entrenar y operar el modelo constituye una imprecisión con consecuencias microéticas. La Hoja de Ruta de MinCiencias Colombia [9] refuerza esta articulación al definirse como de adopción "ética y sostenible", lo que exige un currículo que integre explícitamente ética y sostenibilidad ambiental mediante casos, herramientas y competencias evaluables.

V. CONCLUSIONES

A partir de un corpus de 32 estudios primarios (2018-2026, nueve bases de datos), esta revisión de alcance permite concluir:

[1] El campo está en constitución acelerada (62.5% de la producción en 2024-2026), impulsado por la masificación de la IA generativa, marcos regulatorios emergentes y el reconocimiento de la ética de la IA como inescapable en el ejercicio profesional [1], [2], [14].

[2] El modelo híbrido, asignatura dedicada más integración en cursos técnicos, es el marco con mayor respaldo empírico, pese a requerir formación docente y coordinación curricular [13], [15], [25].

[3] Las competencias prioritarias son integridad de datos (75%), transparencia algorítmica (69%) y responsabilidad en sistemas autónomos (59%) [3], [5], [6].

[4] La brecha traslacional entre principios y práctica es el obstáculo central; superarla exige casos auténticos, no principios abstractos, y un banco de casos regional es la prioridad curricular más urgente [5], [6], [29].

[5] América Latina enfrenta doble brecha, de producción (menos del 22% del corpus) y de contextualización (dependencia de marcos foráneos), que exige investigación, materiales y redes regionales [7], [10], [23], [24].

[6] Marcos regulatorios emergentes (Colombia [9], Chile, Brasil) crean obligación y oportunidad para que las universidades lideren esta formación.

[7] La sostenibilidad ambiental de la IA es la dimensión más subatendida pese a su alta pertinencia disciplinar; el análisis de ciclo de vida ético de sistemas de IA es una frontera formativa urgente [2], [9], [28].

[8] La agenda futura prioriza estudios longitudinales, instrumentos de evaluación validados, bancos de casos regionales y estudios comparativos de efectividad pedagógica [11], [12], [15].

En síntesis, la microética de la IA en ingeniería química es condición para el ejercicio responsable de una profesión con consecuencias directas sobre seguridad, salud y ambiente; su calidad determinará el impacto social neto de la disciplina.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad de Pamplona y a la vicerectoría de investigaciones por el apoyo para la ejecución de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

[1] S. Rupprecht, Q. Gao, T. Karla & A.M. Schmeidtmann, "Multi-agent systems for chemical engineering: A review and perspective," arXiv:2508.07880, 2025.

[2] J. W. Chew, R. Andersson, T. Bierweiller, P. Ryttestal & T. Wik "AI in chemical engineering: From promise to practice," AIChE J., 2026.

[3] N. Reeves-McLaren, S. Moth-Lund, "Data integrity in materials science in the era of AI," J. Mater. Chem. A, RSC, 2026. DOI: 10.1039/D5TA05512A

[4] E. Hermann, G. Hermann & J.C. Tremblay, Ethical Artificial Intelligence in Chemical Research and Development: A Dual Advantage for Sustainability. Sci Eng Ethics 27, 45 (2021). https://doi.org/10.1007/s11948-021-00325-6

[5] N. Zuber, N. Prodanova & J. Vila, "Navigating IT ethics: micro and macro perspectives," IEEE Comput., Soc., 2022. DOI: 10.1109/MC.2022.3148261

[6] C. Canca, "Operationalizing AI ethics principles," Commun. ACM, vol. 63, no. 12, pp. 18–21, 2020. DOI: 10.1145/3432929

[7] A. L. Terrones Rodríguez & M. Rocha Bernardi, "El valor de la ética aplicada en los estudios de ingeniería en un horizonte de inteligencia artificial confiable" Sophia: Col. Filos. Educ., vol. 36, pp. 221–245, 2024.

[8] F. Yu, J. Lv, H. Han, Y.J. Zhang & J. Zhang, "Application of AI teaching assistant to college education of principles of chemical engineering". Education for Chemical Engineers, 2025.

[9] MinCiencias Colombia, "Hoja de Ruta Adopción Ética y Sostenible de IA en Colombia," 2024.

[10] A. Valentini & A. Blancas, "Los desafíos de la IA en la educación superior," UNESCO IESALC Doc. Trabajo 12, 2025.

[11] H. Arksey & L. O'Malley, "Scoping studies: towards a methodological framework," Int. J. Soc. Res. Methodol., vol. 8, no. 1, pp. 19–32, 2005.

[12] D. Levac, H. Colquhoun, & K. K. O'Brien, "Scoping studies: advancing the methodology," Implement. Sci., vol. 5, art. 69, 2010.

[13] J. Weichert et al., "Assessing CS student attitudes towards AI ethics," AI Ethics, vol. 5, no. 3, pp. 1021–1038, 2025. DOI: 10.1007/s43681-025-00817-2

[14] J. Yang et al., "A framework for AI ethics literacy: development, validation, and its role in fostering students' self-rated learning competence," Sci. Rep., vol. 15, art. 38030, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-21977-5

[15] M. Usher and M. Barak, "Unpacking the role of AI ethics online education for STEM students," Int. J. STEM Educ., vol. 11, art. 49, 2024. DOI: 10.1186/s40594-024-00493-4

[16] M. D. J. Peters et al., "Chapter 11: Scoping reviews," in JBI Manual for Evidence Synthesis. Adelaide: JBI, 2020.

[17] A. C. Tricco et al., "PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR)," Ann. Intern. Med., vol. 169, no. 7, pp. 467–473, 2018.

[18] M.-P. Hong et al., "The MMAT version 2018" Educ. Inf., vol. 34, pp. 285–291, 2018.

[19] B. J. Shea et al., "AMSTAR 2: critical appraisal tool for systematic reviews" BMJ, vol. 358, art. j4008, 2017.

[20] V. Braun and V. Clarke, "Using thematic analysis in psychology," Qual. Res. Psychol., vol. 3, no. 2, pp. 77–101, 2006.

[21] M.-P. Hong et al., "The MMAT version 2018," Educ. Inf., vol. 34, pp. 285–291, 2018.

[22] B. J. Shea et al., "AMSTAR 2: critical appraisal tool for systematic reviews," BMJ, vol. 358, art. j4008, 2017.

[23] M. Vélez et al., "Dimensiones éticas de la IA en educación," Invest. y Postgrado (SciELO Venezuela), vol. 40, no. 1, pp. 27–45, 2025.

[24] M. R. Camacho Vázquez et al., "Implicaciones éticas del uso de IA en educación superior," Innovación Educativa (SciELO México), vol. 25, no. 97, pp. 122–138, 2025.

[25] A. Unal & Z. Unal, "K-12 teachers' preferences in using AI tools," AI Ethics, vol. 5, no. 2, pp. 563–580, 2025. DOI: 10.1007/s43681-025-00833-2

[26] A. Pant, R. Hoda, S.V. Spiegler, C. Tantithamthavorn & B. Turhan, "Ethics in the age of AI: AI practitioners' awareness," in Proc. ACM CHI, 2024. DOI: 10.1145/3635715

[27] B. Walsh et al., "Literacy and STEM teachers adapt AI ethics curriculum," in Proc. AAAI, vol. 37, no. 13, pp. 15803–15810, 2023.

[28] J. Schön et al., "Ethical AI in chemical R&D: dual advantage for sustainability," Sci. Eng. Ethics, vol. 27, no. 4, art. 48, 2021. DOI: 10.1007/s11948-021-00325-6

[29] A. Katirai and Y. Nagato, "Addressing trade-offs in co-designing principles for ethical AI," AI Ethics, vol. 4, no. 3, pp. 891–907, 2024. DOI: 10.1007/s43681-024-00477-8

[30] T. Alelyani, "A validated framework for responsible AI in healthcare autonomous systems," Sci. Rep., vol. 15, art. 8472, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-25266-z

[31] M. Z. Hassen, "Beyond the algorithm: AI governance and societal change," AI Ethics, vol. 5, no. 1, pp. 211–225, 2025. DOI: 10.1007/s43681-025-00781-x

[32] M. Mahrishi and S. Abbas, "Global initiatives towards regulatory frameworks for AI in education," ACM Digit. Libr., 2024. DOI: 10.1145/3672462

[33] N.A. Zaki, S. Hashib & U.K. Ibrahim, "Redefining assessment in chemical engineering education through AI," ResearchGate preprint, 2025.

[34] C. Gallent et al., "El impacto de la IA generativa en educación superior: ética e integridad académica," RELIEVE, vol. 29, no. 2, 2023. DOI: 10.30827/relieve.v29i2.29134

[35] Y. Wu, "Capturing the unobservable in AI development with ethnographic audit trails," AI Ethics, vol. 4, no. 4, pp. 1245–1261, 2024. DOI: 10.1007/s43681-024-00535-1