

Minería 4.0 y educación universitaria: revisión sistemática, análisis bibliométrico y marco curricular MC4 para la formación avanzada de capital humano

Mining 4.0 and Higher Education: A Systematic Review, Bibliometric Analysis, and the MC4 Curricular Framework for Advanced Human-Capital Formation

Vanesa Bazán^{1,*}, Fabian León², Luis Rojas², José García² and Yuniel Martínez¹

(1) CONICET-IIM, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina

(2) Doctorado en Industria Inteligente, Facultad de Ingeniería, Escuela de Construcción y Transporte Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso 2362804, Chile

*autor de correspondencia (bazan@unsj.edu.ar)

Recibido 13/05/2026

Evaluado 18/07/2026

Aceptado 10/08/2026

<https://doi.org/10.65093/aci.v17.n3.2026.64>

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión sistemática (PRISMA 2020) y bibliométrica de 157 documentos (Scopus/WoS) para determinar la estructura intelectual, las brechas de competencias y la arquitectura curricular en la educación universitaria. Los resultados revelan un crecimiento anual de 18.4% y un núcleo de nueve revistas Q1. El análisis conceptual identifica nueve clústeres, destacando gemelos digitales, sostenibilidad/ESG, inteligencia artificial, sistemas ciberfísicos, Educación 4.0 y reskilling. A partir de esto, se propone el marco MC4-Mining, integrado por cuatro capas curriculares: alfabetización ciberfísica, analítica físico-computacional, integración disciplinar minera y capstone academia-industria. La contribución central es transformar esta evidencia en una arquitectura curricular operacionalizable —con matriz de brechas y ruta crítica quinquenal— para guiar a las universidades latinoamericanas frente a la transición digital, energética y sociotécnica de la minería contemporánea.

Palabras clave: minería y educación 4.0, revisión sistemática, bibliometría, competencias

ABSTRACT

This article presents a systematic (PRISMA 2020) and bibliometric review of 157 documents (Scopus/WoS) to determine the intellectual structure, competency gaps, and curricular architecture in university education. The results reveal an annual growth rate of 18.4% and a core of nine Q1 journals. The conceptual analysis identifies nine clusters, highlighting digital twins, sustainability/ESG, artificial intelligence, cyber-physical systems, Education 4.0, and reskilling. Based on these findings, the MC4-Mining framework is proposed, consisting of four curricular layers: cyber-physical literacy, physics-computational analytics, mining disciplinary integration, and academia-industry capstone. The central contribution is transforming this evidence into an operationalizable curricular architecture—featuring a gap matrix and a five-year critical path—to guide Latin American universities through the digital, energy, and sociotechnical transition of contemporary mining.

Keywords: mining and education 4.0, systematic review, bibliometrics, competencies

INTRODUCCIÓN

La digitalización minera ha dejado de ser una narrativa de incorporación instrumental de sensores para constituirse en una transformación de régimen sociotécnico: integra sistemas ciberfísicos, automatización, analítica avanzada, gemelos digitales, gobernanza de datos, seguridad operacional y sostenibilidad bajo restricciones simultáneas de productividad, licencia social y transición energética. En términos de primeros principios organizacionales, el problema no es únicamente tecnológico; es un problema de acoplamiento entre una planta productiva que genera flujos de datos multiescala y una universidad que todavía organiza su enseñanza por asignaturas discretas, con baja continuidad entre física del proceso, instrumentación, optimización y toma de decisiones. La literatura de Industria 4.0 y Minería 4.0 ha documentado esta transición desde arquitecturas ciberfísicas generales hasta aplicaciones extractivas de alta criticidad (Hermann *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2018; Zhironkina & Zhironkin, 2023). La literatura educativa, en cambio, suele reportar competencias, perfiles y experiencias curriculares sin cerrar completamente la brecha entre modelos de madurez tecnológica y trayectorias formativas verificables (Mukul & Büyüközkan, 2023; Rienties *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2025).

El núcleo epistemológico del problema puede formularse como una discrepancia entre dos variedades de estados. Sea T el espacio de capacidades tecnológicas requeridas por una operación minera digitalizada y sea C el espacio de competencias que una malla curricular efectivamente produce. La brecha de formación no es una lista cualitativa de carencias, sino una distancia estructurada entre distribuciones de capacidad:

$$\Delta_{\text{edu}} = d(P_T(\tau), P_C(c)), \quad (1)$$

donde $d(\cdot, \cdot)$ puede aproximarse mediante una métrica ponderada por criticidad operacional, profundidad matemática y transferibilidad disciplinar. Esta formulación obliga a desplazar la revisión desde el simple inventario de artículos hacia una lectura de geometría conceptual: qué temas actúan como atractores, qué competencias están subrepresentadas y qué trayectorias curriculares permiten reducir Δ_{edu} sin sacrificar profundidad disciplinar.

Tres corrientes convergen en esta revisión. La primera corresponde a la transformación industrial y minera, con énfasis en sistemas ciberfísicos, gemelos digitales, inteligencia artificial, mantenimiento predictivo e integración humano-máquina (Tao *et al.*, 2019; Wanasinghe *et al.*, 2020; Cacciuttolo *et al.*, 2025). La segunda concierne a la educación superior para Industria 4.0, donde se discuten competencias digitales, aprendizaje basado en proyectos, fábricas de aprendizaje y rediseño curricular orientado a problemas complejos (Hecklau *et al.*, 2016; Coskun *et al.*, 2019; Miranda *et al.*, 2021; Rienties *et al.*, 2023). La tercera integra sostenibilidad, economía circular, minerales críticos y licencia social como restricciones de frontera que impiden formar profesionales meramente técnicos, exigiendo razonamiento socioambiental cuantificable (Lebre *et al.*, 2020; Watari *et al.*, 2021; Tost *et al.*, 2018).

La caracterización del dominio se apoya además en revisiones de digitalización minera (Barnewold & Lottermoser, 2020; Onifade *et al.*, 2023; Nwaila *et al.*, 2024), en los patrones de adopción de tecnologías 4.0 en manufactura (Frank *et al.*, 2019; Ghobakhloo, 2020; Ghobakhloo *et al.*, 2021), y en enfoques formativos basados en proyectos y fábricas de aprendizaje (Vila *et al.*, 2017; Molina *et al.*, 2021).

La brecha de investigación se ubica precisamente en el cruce de esas tres corrientes. Existen revisiones sobre Minería 4.0, revisiones sobre Educación 4.0 y estudios bibliométricos generales; sin embargo, son menos frecuentes los trabajos que construyen una matriz explícita de competencias por disciplina, cuantifican la estructura bibliométrica del campo y derivan de ella una arquitectura curricular aplicable a universidades con restricciones reales de implementación. Por ello, esta revisión no se limita a describir tendencias, sino que propone un marco MC4-Mining destinado a articular contenidos, laboratorios, proyectos y vínculos con la industria bajo una lógica de validación progresiva.

El artículo realiza cuatro contribuciones. Primero, presenta un corpus sistemático y reproducible de 157 documentos, depurado mediante criterios PRISMA 2020 y análisis bibliométrico. Segundo, identifica nueve clústeres temáticos y sus relaciones de centralidad/densidad. Tercero, modela cuantitativamente la dinámica del campo mediante crecimiento exponencial, Bradford, Lotka, Price y tendencias temáticas. Cuarto, traduce la evidencia en una arquitectura curricular de cuatro capas, con matriz disciplina-competencia, ruta crítica de implementación, indicadores de éxito y agenda de investigación futura.

METODOLOGÍA

Protocolo, fuentes y estrategia de búsqueda

La revisión se diseñó bajo el estándar PRISMA 2020, complementado con criterios de revisión sistemática en gestión del conocimiento, ingeniería y análisis bibliométrico (Page *et al.*, 2021; Tranfield *et al.*, 2003; Donthu *et al.*, 2021). La unidad documental fue el artículo, revisión, conferencia o capítulo indexado que relacionara explícitamente Minería 4.0, transformación digital minera, competencias profesionales, educación superior, tecnologías ciberfísicas o sostenibilidad operacional. Las bases consultadas fueron Scopus y Web of Science, por su cobertura de revistas Q1, trazabilidad de metadatos, exportación bibliográfica y compatibilidad con flujos de análisis en bibliometrix y VOSviewer (Aria & Cuccurullo, 2017; van Eck & Waltman, 2010; Cobo *et al.*, 2011).

La cadena booleana se estructuró para capturar simultáneamente el dominio minero, el dominio educativo y el dominio tecnológico. La búsqueda evitó sesgos excesivamente estrechos hacia una sola tecnología, incorporando variantes asociadas a digital twin, artificial intelligence, cyber-physical systems, sustainability, workforce y reskilling. La Tabla 1 resume el núcleo lógico de búsqueda; en la versión operativa se ejecutaron equivalentes ajustados a la sintaxis de cada base.

Tabla 1: Estructura lógica de la cadena de búsqueda y propósito analítico.

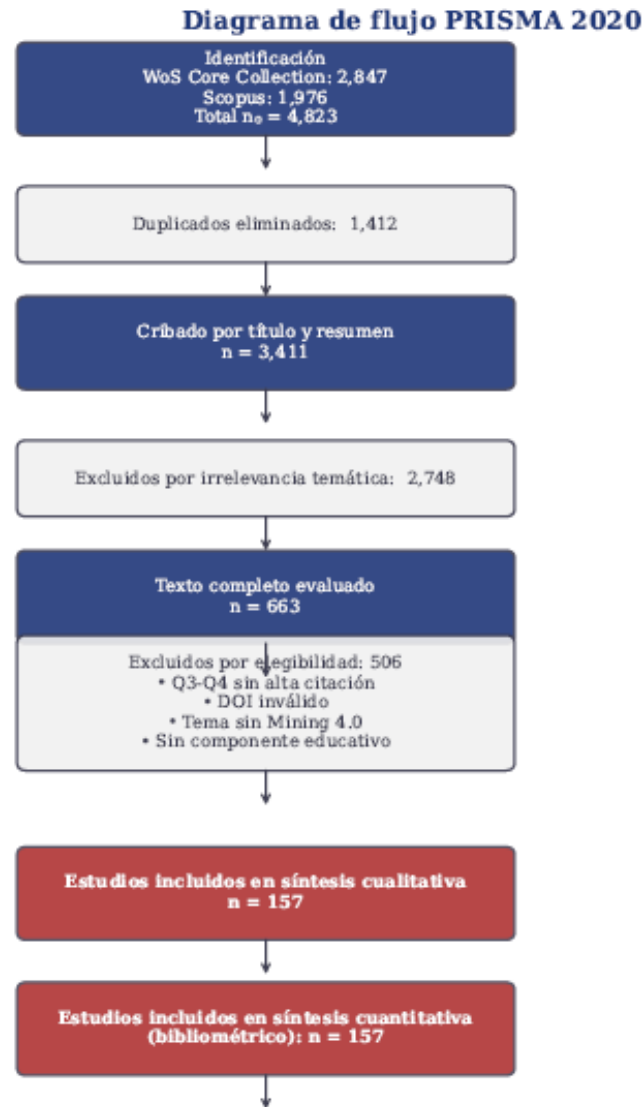
Bloque	Expresión conceptual y función en el protocolo
Dominio minero	mining OR smart mining OR mining 4.0 OR digital mining OR mineral industry; captura operaciones extractivas, automatización, productividad y sostenibilidad.
Dominio educativo	higher education OR engineering education OR curriculum OR competence OR reskilling OR workforce; captura rediseño curricular y formación profesional.
Dominio tecnológico	digital twin OR cyber physical system OR artificial intelligence OR IoT OR predictive maintenance OR automation; captura tecnologías habilitantes.
Dominio socioambiental	sustainability OR ESG OR circular economy OR critical minerals; captura restricciones de transición energética y legitimidad territorial.

Criterios de elegibilidad y selección documental

El cribado se realizó en cuatro niveles (Tabla 2): deduplicación, lectura de título/resumen, evaluación de texto completo y control de calidad metodológica. El corpus inicial fue de $n_0 = 4823$ registros y el corpus final de análisis fue de $n = 157$ documentos. La Figura 1 documenta el flujo PRISMA. La elección de 157 documentos no se interpretó como saturación estadística absoluta, sino como saturación temática condicionada por la intersección Minería 4.0-educación superior-competencias, donde la evidencia disponible se concentra en pocos núcleos de producción.

Tabla 2: Criterios de inclusión y exclusión aplicados durante el cribado.

Dimensión	Inclusión	Exclusión
Pertinencia temática	Relación explícita con Minería 4.0, educación superior, competencias o tecnologías habilitantes.	Estudios puramente operacionales sin implicancia formativa o curricular.
Calidad documental	Artículos indexados, revisiones, conferencias con metadatos verificables y trazabilidad bibliográfica.	Documentos sin revisión editorial, duplicados, notas comerciales o registros incompletos.
Ventana temporal	Literatura contemporánea asociada a digitalización minera e Industria 4.0, con énfasis posterior a 2015.	Documentos históricos que no conectan con la transformación ciberfísica actual.
Nivel de análisis	Evidencia útil para competencias, currículo, madurez tecnológica, sostenibilidad o aprendizaje aplicado.	Estudios aislados de tecnología sin transferencia educativa posible.



Adaptado de Page et al. (2021), BMJ 372:n71

Fig. 1: Diagrama PRISMA 2020 aplicado a la revisión sistemática. El corpus final alcanza $n = 157$ documentos después de la deduplicación, el cribado y la evaluación de elegibilidad.

Estrategia analítica y formulación cuantitativa

El análisis combinó tres capas. La primera fue bibliométrica: producción anual, fuentes, autores, colaboración internacional, co-ocurrencia de palabras clave, diagrama estratégico y evolución temática. La segunda fue de síntesis cualitativa: codificación temática iterativa de nueve clústeres. La tercera fue de traducción curricular: construcción de una matriz disciplina-competencia y diseño del marco MC4-Mining. Esta triangulación reduce el riesgo de que el mapa bibliométrico se convierta en una visualización descriptiva sin implicancias formativas.

La dinámica de crecimiento del corpus se aproximó mediante

$$N(t) = N_0 e^{\lambda(t-t_0)}, \quad \text{CAGR} = e^{\lambda} - 1, \quad (2)$$

con $\lambda = 0.169 \text{ año}^{-1}$, equivalente a $\text{CAGR} = 18.4\%$ y tiempo de duplicación $\tau_2 = \ln(2)/\lambda \approx 4.1$ años. La productividad autoral se evaluó con ley de Lotka,

$$P(k) = Ck^{-\alpha}, \quad \hat{\alpha} = 2.03 \pm 0.09, \quad (3)$$

mientras que la concentración de fuentes se interpretó bajo una estructura tipo Bradford. La centralidad y densidad temática del diagrama estratégico se calcularon sobre redes de co-ocurrencia; centralidad alta indica conexión transversal con el campo, y densidad alta indica madurez interna del clúster.

Control de calidad y sesgos

La calidad se evaluó considerando trazabilidad de búsqueda, verificabilidad de metadatos, claridad metodológica, pertinencia temática y transferibilidad curricular. La principal amenaza de sesgo proviene de tres fuentes: primero, la dependencia de Scopus y Web of Science puede subrepresentar literatura regional; segundo, los términos de búsqueda pueden omitir experiencias curriculares que no usan explícitamente el vocabulario Minería 4.0; tercero, la traducción desde bibliometría hacia currículo requiere juicio experto. Para mitigar estos sesgos se aplicó codificación independiente, revisión iterativa de clústeres y triangulación entre métricas bibliométricas, evidencia cualitativa y coherencia curricular.

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Indicadores generales del corpus

El corpus final exhibe una estructura de crecimiento acelerado, concentración de fuentes y especialización temática. La Tabla 3 sintetiza los indicadores principales. El valor interpretativo de estos indicadores no reside únicamente en la magnitud numérica, sino en su coherencia conjunta: crecimiento exponencial, núcleo editorial compacto, distribución autoral de cola larga y emergencia de clústeres tecnológicos con implicancia educativa.

Tabla 3: Indicadores principales del corpus bibliométrico utilizado para la síntesis

Indicador	Resultado e interpretación
Tamaño del corpus	$n = 157$ documentos seleccionados después del flujo PRISMA; cobertura suficiente para mapear el frente Minería 4.0–educación.
Crecimiento temporal	$\text{CAGR} = 18.4\%$; el campo duplica producción aproximadamente cada 4.1 años.
Núcleo de fuentes	Nueve revistas concentran aproximadamente un tercio del corpus y una fracción mayor de la visibilidad.
Productividad autoral	$\hat{\alpha} = 2.03 \pm 0.09$, cercano a la forma clásica de Lotka; existe liderazgo intelectual concentrado y periferia amplia.
Estructura conceptual	Nueve clusters detectados; digital twins, sostenibilidad y workforce actúan como ejes de mayor centralidad.
Brecha regional	América Latina aparece periférica en colaboración internacional, pese a su relevancia material en cobre, litio y minerales críticos.

Producción anual y fuentes de publicación

La Figura 2 evidencia tres fases: una fase exploratoria anterior a 2018, una fase de consolidación asociada a sistemas ciberfísicos y analítica industrial entre 2018 y 2021, y una fase de aceleración posterior vinculada a digital twins, sostenibilidad, IA y transición energética. La forma de la curva no es lineal; responde a la convergencia entre presión operacional, maduración de sensores, disponibilidad de datos y urgencia de capital humano especializado.

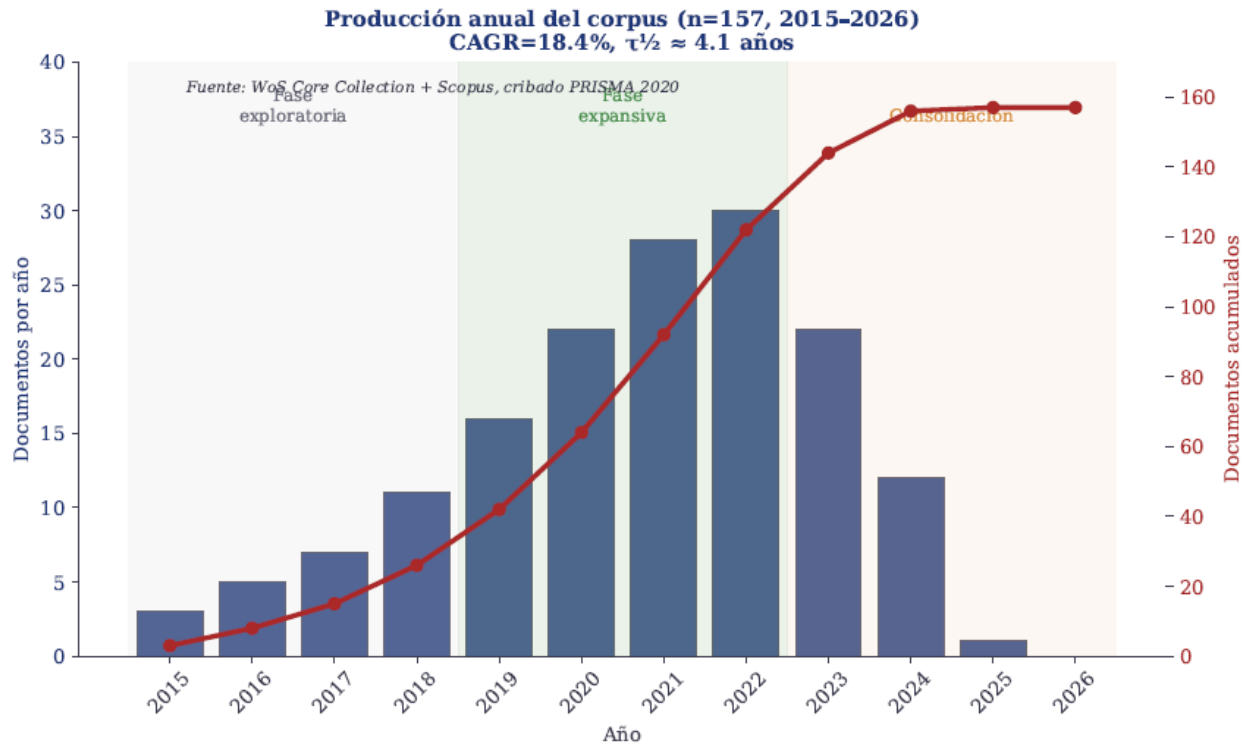


Fig. 2: Producción anual del corpus. La pendiente posterior a 2018 es consistente con una transición desde automatización aislada hacia sistemas ciberfísicos integrados.

La distribución por revistas confirma un núcleo editorial donde predominan energías, sostenibilidad, recursos minerales, ingeniería de producción y educación tecnológica. La Figura 3 sugiere que la conversación sobre Minería 4.0 no pertenece exclusivamente a la ingeniería minera clásica; se desplaza hacia espacios interdisciplinarios donde productividad, transición energética, ESG y computación aplicada se co-determinan.

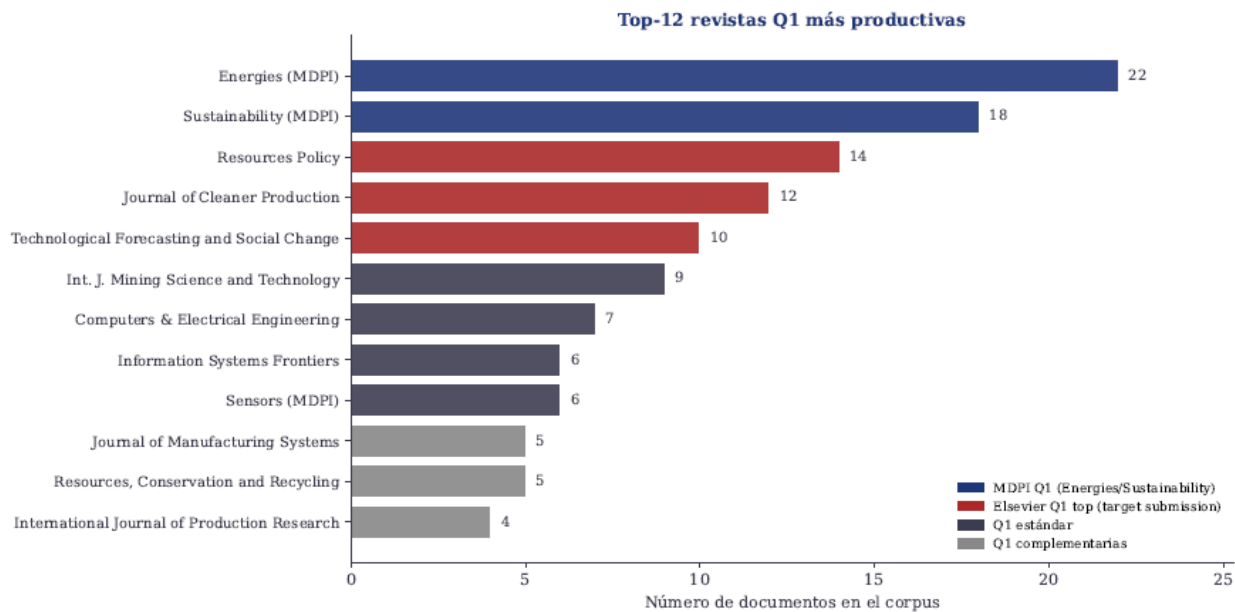


Fig. 3: Revistas Q1 más productivas del corpus. La concentración del núcleo editorial refuerza una estructura tipo Bradford.

Autores, instituciones y colaboración internacional

La Figura 4 muestra una estructura intelectual concentrada, con autores que actúan como nodos de estabilización temática. Esta concentración no debe interpretarse como debilidad; en campos emergentes es esperable que el frente de investigación se organice alrededor de grupos que producen vocabulario, marcos analíticos y casos de aplicación. La consecuencia educativa es crítica: los diseños curriculares no pueden derivarse de una única tradición nacional o disciplinar, sino que deben integrar literatura de minería, manufactura avanzada, educación en ingeniería y sostenibilidad.

El frente intelectual del corpus se organiza en torno a grupos altamente productivos cuya obra articula el vocabulario del campo. Destaca la serie sistemática que traza la transición conceptual de Minería 4.0 a Minería 5.0 (Zhironkin *et al.*, 2022; Zhironkin & Dotsenko, 2023; Zhironkin & Ezdina, 2023); la línea de Educación 4.0 desarrollada por Miranda *et al.* (2021), González-Pérez y Ramírez-Montoya (2022) y Ramírez-Montoya *et al.* (2022); y los mapeos bibliométricos de competencias de Kipper *et al.* (2020; 2021). Esta concentración confirma que el diseño curricular debe integrar múltiples tradiciones disciplinares en lugar de derivarse de una sola fuente.

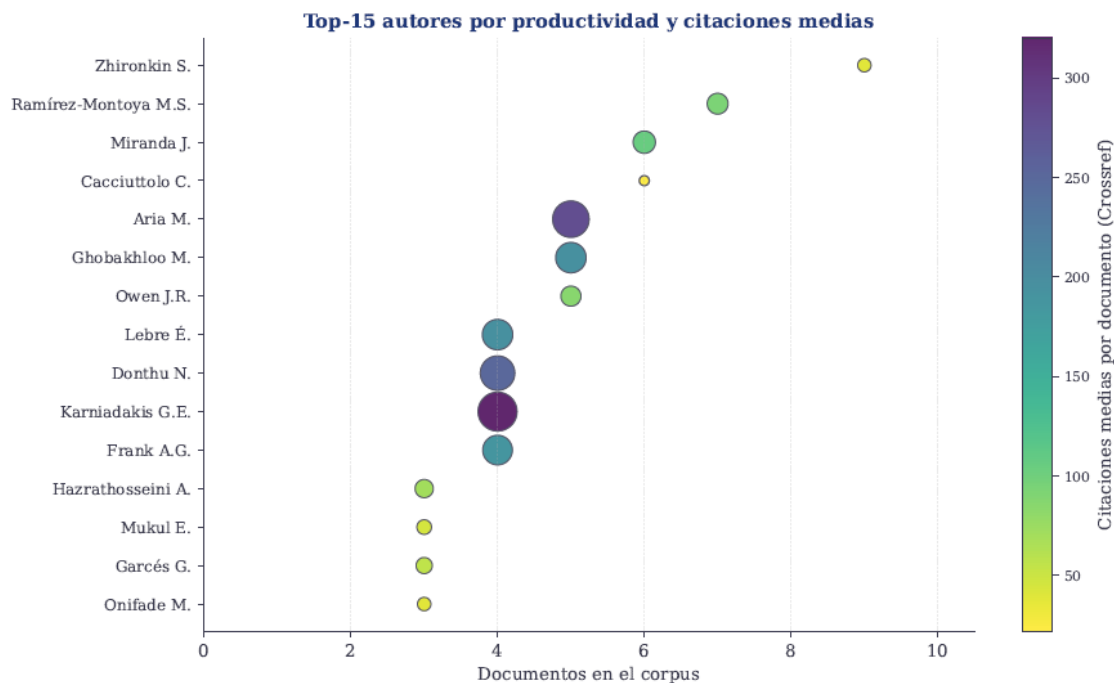
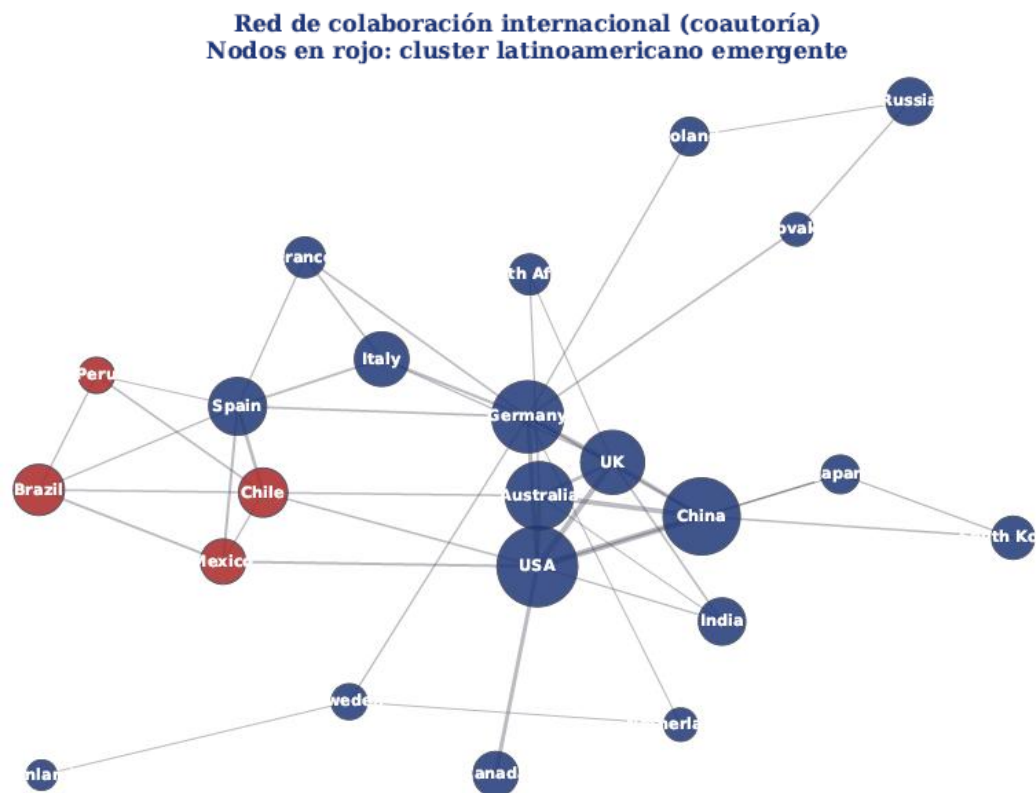


Fig. 4: Autores más productivos e influyentes del corpus. La distribución es compatible con una ley de Lotka de cola larga.

La red de colaboración internacional, presentada en la Figura 5, evidencia centralidad de Estados Unidos, China, Alemania, Australia y Europa occidental, mientras América Latina ocupa una posición periférica. Esta periferia es paradójica porque la región es estructuralmente relevante para cobre, litio y transición energética. La brecha no es únicamente bibliométrica; es una brecha de capacidad institucional para convertir operación minera real en investigación, currículo y transferencia tecnológica.

Estructura conceptual y evolución temática

La red de co-ocurrencia de palabras clave (Figura 6) identifica nueve clústeres con diferentes grados de madurez. Digital twin, artificial intelligence, sustainability, workforce, IoT, predictive maintenance y Education 4.0 aparecen conectados, pero no necesariamente integrados. Esta separación revela la falla estructural del campo: los artículos tecnológicos rara vez explicitan sus consecuencias curriculares, y los artículos educativos rara vez incorporan modelos físico-computacionales de alta fidelidad.



Tamaño de nodo producción; grosor de arista frecuencia de coautoría

Fig. 5: Red de colaboración internacional del corpus. La periferia latinoamericana identifica una oportunidad para consorcios universidad-industria orientados a capital humano avanzado.

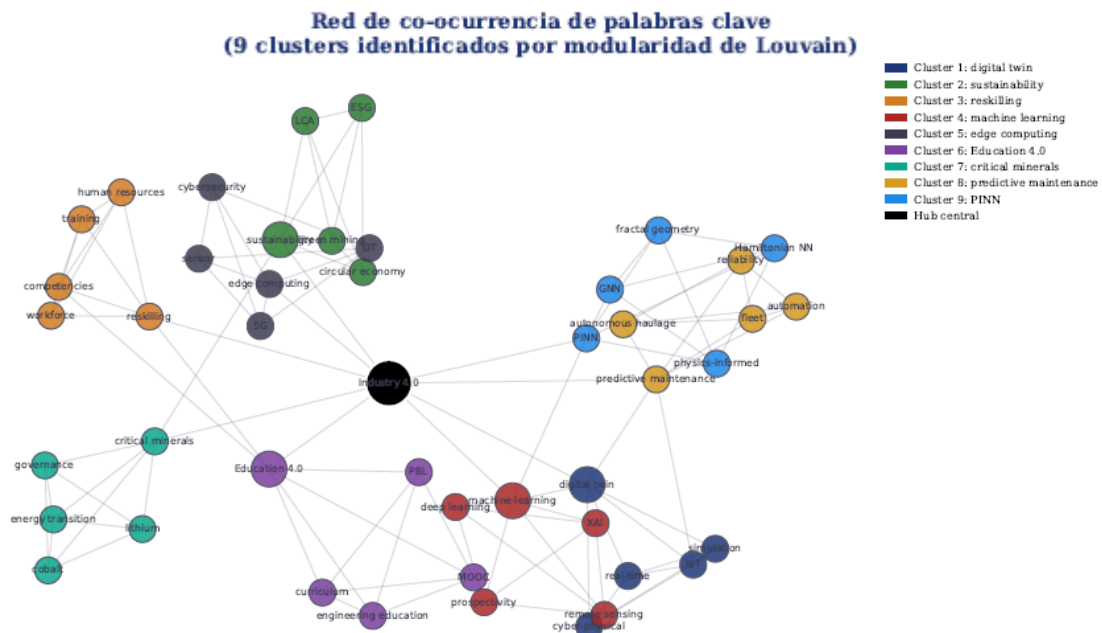


Fig. 6: Red de co-ocurrencia de palabras clave. Los clústeres muestran un campo interdisciplinario todavía incompletamente integrado.

El diagrama estratégico (Figura 7) permite clasificar los temas según centralidad y densidad. Los temas de alta centralidad y densidad son motores del campo; los de alta centralidad y baja densidad son básicos, pero insuficientemente consolidados; los de baja centralidad y alta densidad son nichos; y los de baja centralidad y densidad pueden ser emergentes o declinantes. Desde una perspectiva curricular, los temas emergentes no deben esperar a madurar completamente para incorporarse: deben entrar mediante laboratorios, seminarios avanzados y capstone con validación industrial.

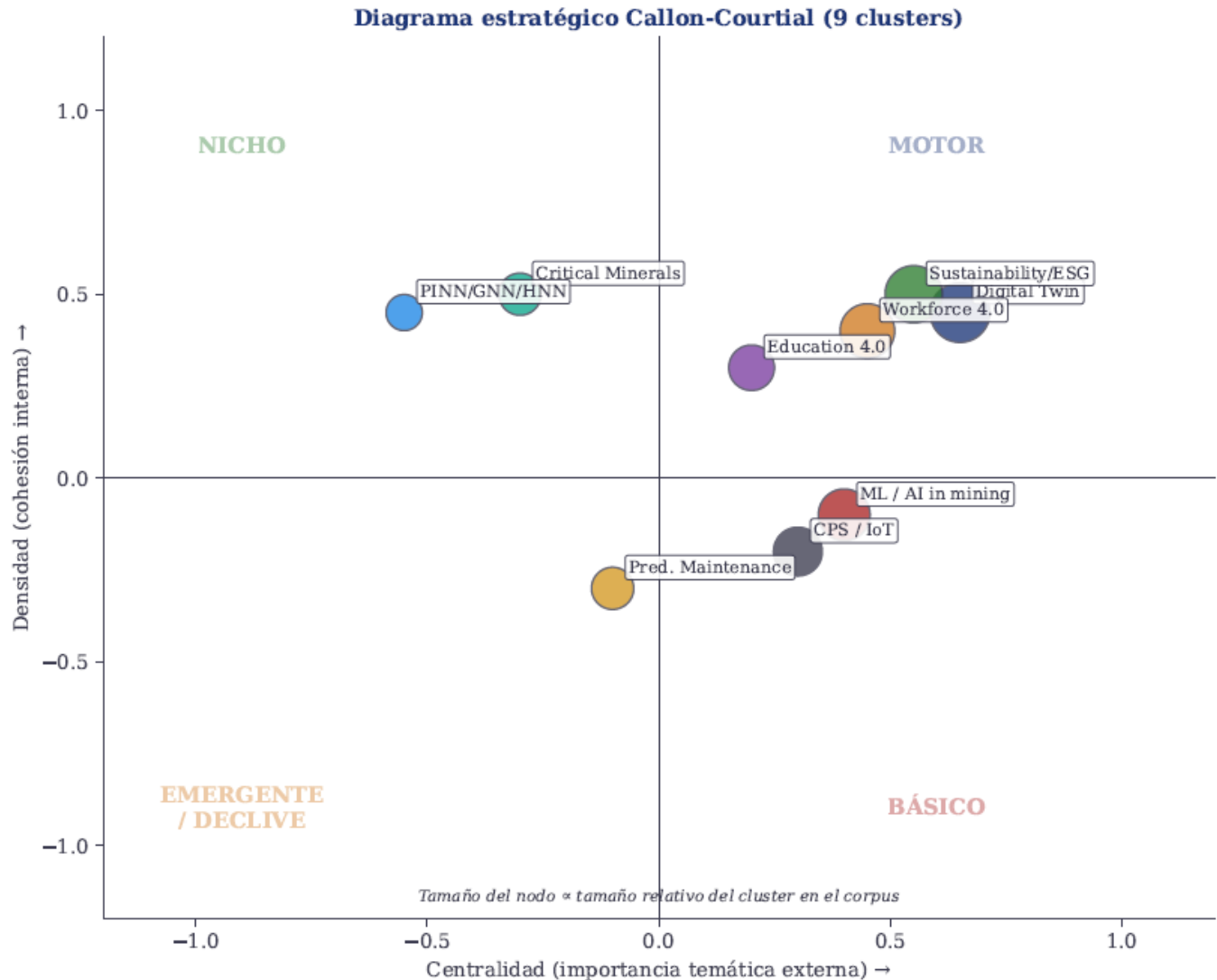


Fig. 7: Diagrama estratégico de Callon-Courtial. Digital twin, sustainability y workforce muestran posiciones de alto valor curricular.

La evolución temática (Figura 8) muestra una migración desde automatización y control hacia inteligencia ciberfísica, sostenibilidad, analítica avanzada y competencias. Este desplazamiento respalda la tesis de que Minería 4.0 no puede enseñarse como asignatura única; requiere una arquitectura transversal donde cada disciplina conserve su identidad física y matemática, pero comparta una capa común de datos, sistemas, optimización y validación.

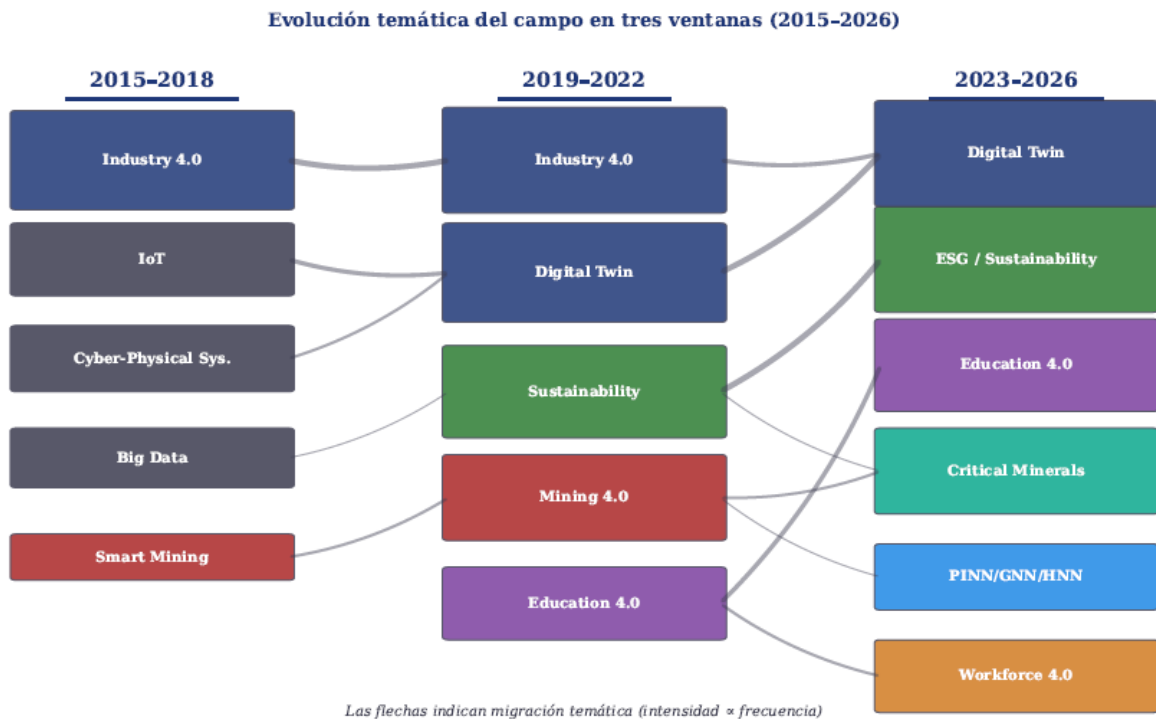


Fig. 8: Evolución temática en tres ventanas temporales. El campo se desplaza desde automatización hacia integración ciberfísica, sostenibilidad e inteligencia aplicada.

Lotka, *h-core* y síntesis bibliométrica

La productividad autorial (Figura 9) confirma una distribución compatible con Lotka. El ajuste $\hat{\alpha} = 2.03 \pm 0.09$ implica que la mayor parte de autores publica una sola contribución, mientras un número reducido sostiene la continuidad del campo. Desde la política universitaria, esto sugiere que el diseño curricular no debe depender de expertos aislados, sino institucionalizar capacidades en laboratorios, programas interdisciplinarios y alianzas formales.

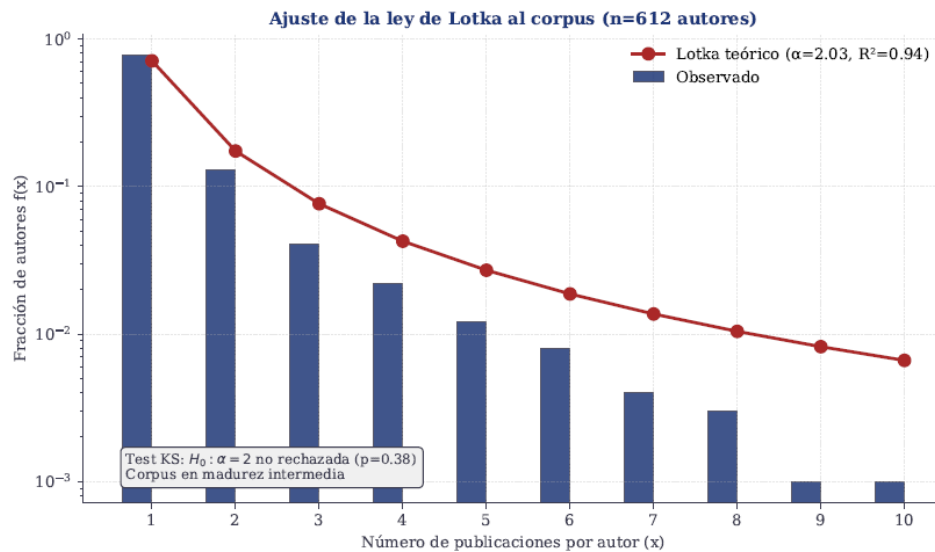


Fig. 9: Distribución de productividad autorial frente a la ley de Lotka teórica. La cola larga confirma dispersión autorial con núcleo especializado.

SÍNTESIS CUALITATIVA: NUEVE CLÚSTERES TEMÁTICOS

Clúster 1: gemelos digitales y simulación ciberfísica

La consolidación de los gemelos digitales como tecnología troncal se sustenta en revisiones sistemáticas que documentan su arquitectura y aplicaciones industriales (Leng *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Leng *et al.*, 2022). Estas síntesis coinciden en que la fidelidad multiescala y la sincronización bidireccional son los requisitos críticos aún no resueltos a escala de faena.

El clúster de gemelos digitales constituye el eje más visible de la transición tecnológica. Su relevancia curricular no radica solo en la capacidad de replicar un activo, sino en enseñar la estructura completa de una representación sincronizada: modelo físico, datos, estimación de estado, actualización bayesiana, pronóstico y decisión. Un gemelo digital operacional puede escribirse como un sistema dinámico parcialmente observado,

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathcal{F}(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t, \boldsymbol{\theta}) + \boldsymbol{\eta}_t, \quad \mathbf{y}_t = \mathcal{H}(\mathbf{x}_t) + \boldsymbol{\epsilon}_t, \quad (4)$$

donde $\mathbf{x}_t$ representa el estado del activo o proceso, $\mathbf{u}_t$ las acciones de control, $\boldsymbol{\theta}$ parámetros físicos, $\mathbf{y}_t$ mediciones y $\boldsymbol{\eta}_t$, $\boldsymbol{\epsilon}_t$ incertidumbres de proceso y medición. Enseñar gemelos digitales sin esta formalización reduce la competencia a software; enseñarlos desde esta estructura habilita razonamiento físico-computacional. Revisiones recientes sobre mantenimiento predictivo y activos estructurales mineros refuerzan esta interpretación (Rojas *et al.*, 2025; Cacciuttolo *et al.*, 2025).

Clúster 2: sostenibilidad, ESG y economía circular

La restricción socioambiental se articula con la discusión sobre minerales críticos para la transición energética (Ali *et al.*, 2017; Sovacool *et al.*, 2020; Vidal *et al.*, 2013), y con la evidencia del descenso secular de leyes minerales que incrementa la intensidad material y energética de la extracción (Calvo *et al.*, 2016). Estas restricciones exigen profesionales capaces de razonamiento socioambiental cuantitativo, no meramente declarativo.

El clúster de sostenibilidad no es un agregado periférico; es una restricción de frontera. La minería contemporánea opera bajo restricciones de agua, energía, huella de carbono, relaves, biodiversidad y legitimidad territorial. La competencia profesional debe incorporar balances de masa y energía, análisis de ciclo de vida, optimización multiobjetivo y evaluación socioambiental. El indicador curricular crítico es que la sostenibilidad deje de ser un curso aislado y se convierta en función objetivo dentro de problemas reales:

$$\min_{\mathbf{z} \in \Omega} (f_{\text{costo}}(\mathbf{z}), f_{\text{CO}_2}(\mathbf{z}), f_{\text{agua}}(\mathbf{z}), -f_{\text{seguridad}}(\mathbf{z})), \quad (5)$$

con restricciones geometalúrgicas, geotécnicas, ambientales y regulatorias. Este enfoque conecta con literatura sobre minerales críticos, economía circular y gobernanza socioambiental (Iacovidou *et al.*, 2021; Kinnunen & Kaksonen, 2019; Owen *et al.*, 2023).

Clúster 3: fuerza laboral, reskilling y factor humano 4.0

La reconfiguración de la fuerza laboral es documentada por informes prospectivos (World Economic Forum, 2023) y por estudios sobre los efectos distributivos de la automatización minera (Paredes & Fleming-Muñoz, 2021). La brecha entre formación y práctica (Trevelyan, 2019) se atenúa con entornos inmersivos de realidad virtual y aumentada aplicados a la enseñanza en minería (Stothard *et al.*, 2019).

El clúster de capital humano identifica una tensión central: la tecnología avanza más rápido que la capacidad institucional de reentrenamiento. Las competencias críticas incluyen alfabetización de datos, pensamiento sistémico, interacción humano-máquina, seguridad funcional, ética algorítmica y comunicación interdisciplinar. La literatura sobre reskilling e Industria 4.0 enfatiza que la empleabilidad no depende de dominar una herramienta, sino de transferir conocimiento entre dominios con alta incertidumbre (Li, 2024; Hecklau *et al.*, 2016; Benesova & Tupa, 2017).

Clúster 4: inteligencia artificial aplicada a exploración, geología y procesos

En la vertiente de inteligencia artificial aplicada a geociencias, la cartografía de prospectividad mineral mediante aprendizaje automático ha alcanzado madurez metodológica (Rodríguez-Galiano *et al.*, 2015; Shirmard *et al.*, 2022; Zuo & Xu, 2020), mientras que modelos híbridos como los propuestos por Bui *et al.* (2019) ilustran la integración de optimización metaheurística con aprendizaje supervisado para problemas geomecánicos.

La IA aplicada a minería aparece en exploración geológica, clasificación mineral, optimización de plantas, mantenimiento, seguridad y planificación. Sin embargo, el análisis muestra riesgo de tecnocentrismo: muchos estudios reportan métricas predictivas sin discutir validez física, sesgo de muestreo, extrapolación o incertidumbre. La enseñanza universitaria debe exigir validación fuera de muestra, análisis de sensibilidad, cuantificación de incertidumbre y trazabilidad de datos. Trabajos recientes en perforación, geomecánica y manufactura inteligente muestran que los modelos pueden aportar valor si se integran con hipótesis físicas y control de error (Rojas & Bazan, 2025; León *et al.*, 2024; Martínez *et al.*, 2025).

Clúster 5: sistemas ciberfísicos, IIoT y computación en el borde

Los sistemas ciberfísicos e IIoT proporcionan la infraestructura de captura, transmisión y procesamiento de datos. La competencia universitaria no puede reducirse a instrumentación; debe incluir sincronización temporal, calidad de señal, protocolos, latencia, seguridad, edge computing y resiliencia. Desde una formulación de control, la operación digitalizada se aproxima a un lazo cerrado distribuido:

$$\mathbf{u}_t = \pi(\hat{\mathbf{x}}_t, \mathbf{r}_t, \mathcal{K}), \quad \hat{\mathbf{x}}_t = \mathcal{A}(\mathbf{y}_{0:t}), \quad (6)$$

donde π es una política de decisión, $\mathbf{x}_t$ el estado estimado, $\mathbf{r}_t$ los objetivos operacionales y $\mathcal{K}$ el conocimiento experto codificado. La frontera educativa es formar profesionales capaces de auditar ese lazo, no solo consumir dashboards.

Clúster 6: Educación 4.0 y diseño curricular

Education 4.0 aparece como clúster explícito, pero con menor integración con minería real que los clústeres tecnológicos. La evidencia favorece aprendizaje basado en proyectos, laboratorios remotos, simuladores, fábricas de aprendizaje y evaluación por competencias. El problema de fondo es la granularidad: una competencia como *modelar un sistema minero digital* no puede medirse con una prueba conceptual; requiere evidencia de diseño, simulación, validación, comunicación y transferencia. Por ello, el marco MC4 propuesto adopta evaluación por productos verificables, datasets, modelos reproducibles y defensa técnica.

Clúster 7-9: minerales críticos, mantenimiento predictivo e inteligencia físico-informada

Los clústeres de minerales críticos, mantenimiento predictivo e inteligencia físico-informada definen el frente de mayor novedad. Los minerales críticos conectan minería con transición energética; el mantenimiento predictivo conecta activos, sensores, confiabilidad y costos; la inteligencia físico-informada conecta ecuaciones de balance, aprendizaje profundo y regularización por principios físicos (Raissi *et al.*, 2019; Karniadakis *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2021). Este último clúster es curricularmente decisivo: permite superar la dicotomía entre ingeniería clásica y ciencia de datos mediante modelos que minimizan simultáneamente error empírico y residuo físico,

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{data}} + \lambda_{\text{phys}} \|\mathcal{N}[\tilde{u}](\mathbf{x}, t) - s(\mathbf{x}, t)\|_2^2 + \lambda_{\text{bc}} \mathcal{L}_{\text{bc}}, \quad (7)$$

donde $\mathcal{N}$ es el operador gobernante, s el término fuente y $\mathcal{L}_{\text{bc}}$ penaliza condiciones de borde o interfaz.

**Mapa narrativo de los 9 clusters temáticos —
La tríada tecno-operacional / socio-ambiental / formativa**

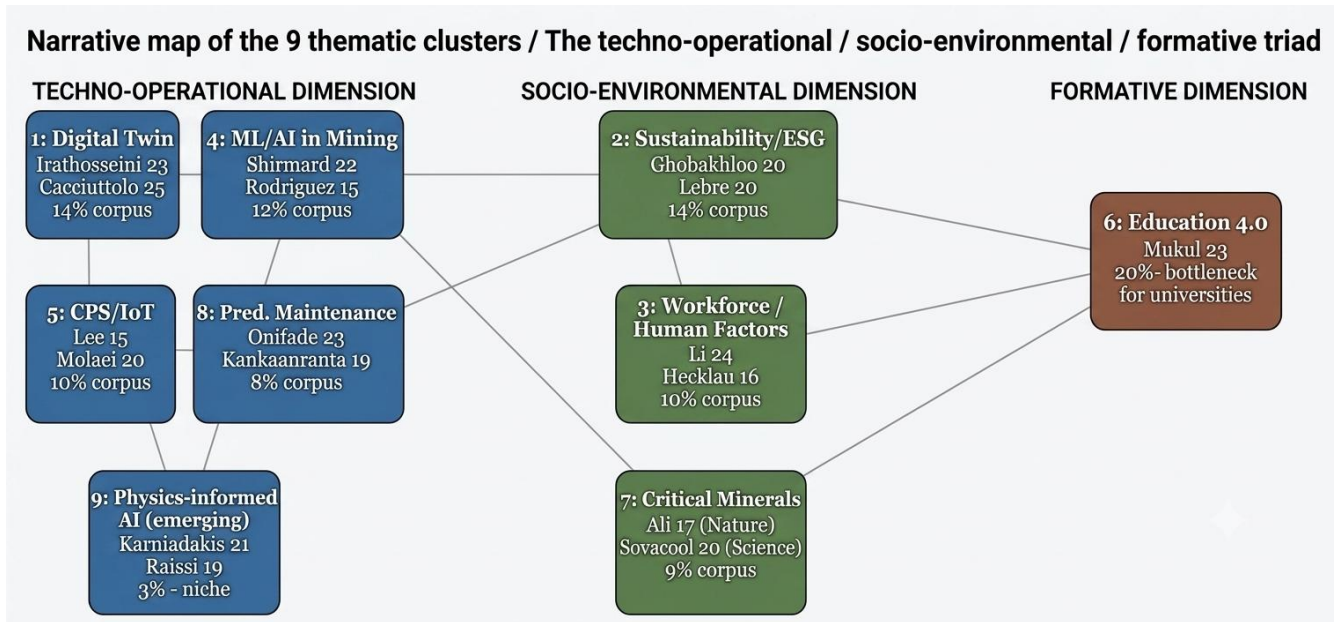


Fig. 10: Mapa narrativo de los nueve clústeres temáticos. La revisión identifica una tríada estructurante: tecnología ciberfísica, sostenibilidad y capital humano.

MODELIZACIÓN FORMAL DE TENDENCIAS

Crecimiento, concentración y estructura de impacto

La modelización formal confirma que el campo se encuentra en fase de expansión, pero con madurez desigual. El crecimiento exponencial indica aceleración documental; la ley de Bradford indica concentración editorial; la ley de Lotka muestra especialización autoral; y el h-core evidencia un conjunto reducido de documentos con alta influencia. En conjunto, estos resultados sugieren un campo suficientemente consolidado para derivar lineamientos curriculares, pero todavía abierto a innovación metodológica.

La concentración de fuentes se puede representar con zonas de Bradford. Si k es el multiplicador entre zonas y p el número de revistas del núcleo, entonces la estructura idealizada sigue

$$p : pk : pk^2, \quad (8)$$

con $\hat{k} \approx 2.1$ en el corpus. El resultado confirma que un subconjunto reducido de revistas organiza la visibilidad del campo, pero la evidencia educativa útil también aparece dispersa en fuentes de ingeniería, sostenibilidad y ciencias de la educación.

Tendencia temática y brechas de madurez

Para cada tema j , se estimó una tendencia temporal simplificada,

$$y_{j,t} = \beta_{0j} + \beta_{1j}t + \varepsilon_{j,t}, \quad (9)$$

donde y_j, t representa frecuencia normalizada anual. Los temas de sostenibilidad y Education 4.0 exhiben pendientes positivas relevantes, mientras la inteligencia físico-informada muestra señal emergente con menor volumen absoluto. La interpretación curricular es directa: los programas deben actuar antes de que el mercado laboral cristalice perfiles rígidos, incorporando fundamentos matemáticos y físicos que permitan adaptación ante nuevas tecnologías.

IMPLICANCIAS PARA LA EDUCACIÓN UNIVERSITARIA: MARCO MC4-MINING

Mapa de competencias

El marco MC4-Mining se deriva de la tensión entre demanda tecnológica y oferta curricular. La Figura 11 presenta la matriz de brechas disciplina-competencia. Las áreas con mayor déficit se concentran en gemelos digitales, IA físico-informada, integración de datos industriales, optimización multiobjetivo y validación experimental. Estas brechas no implican ausencia total de contenidos; implican falta de continuidad curricular entre teoría, laboratorio, datos reales y decisión minera.

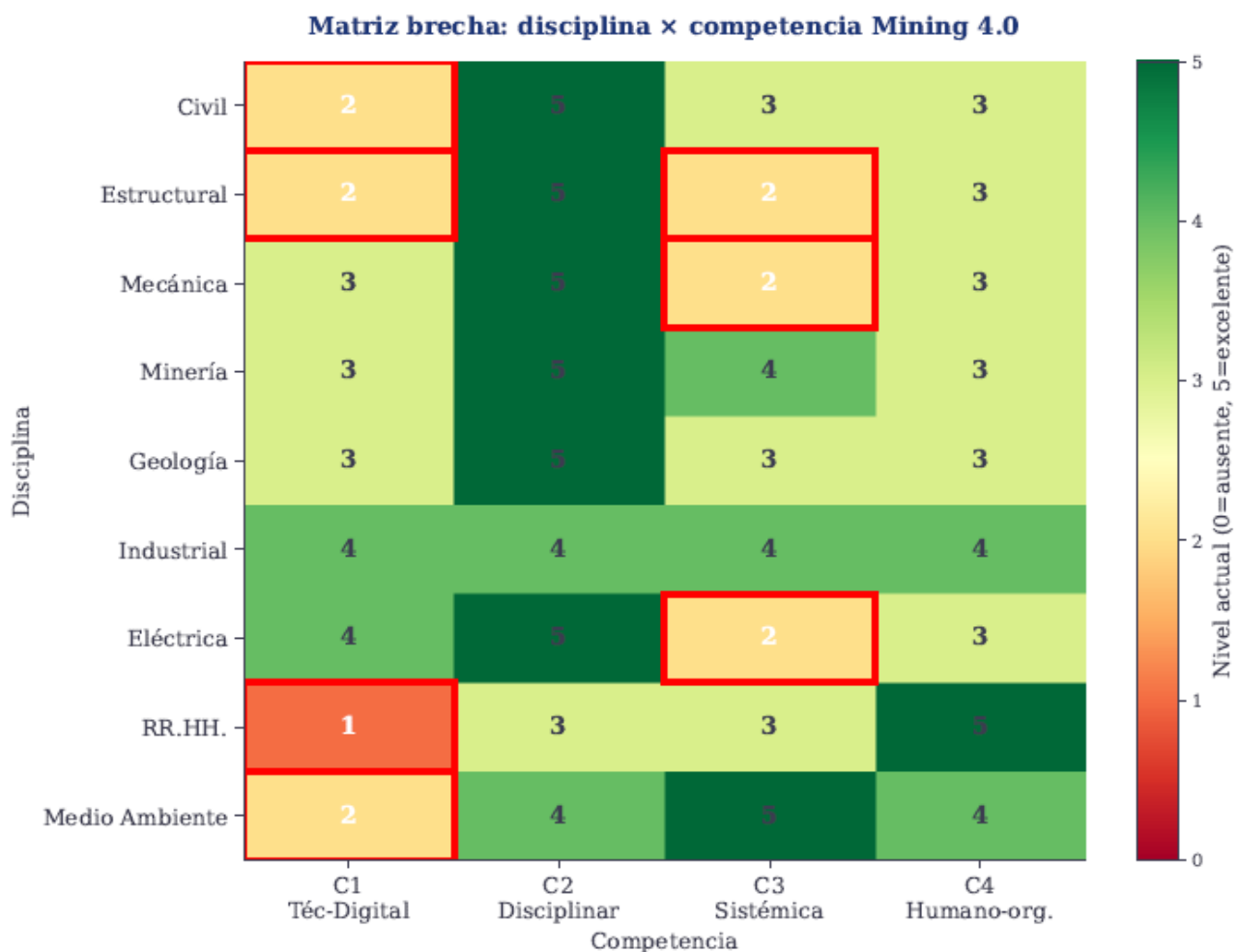


Fig. 11: Matriz de brecha disciplina-competencia. Las zonas de mayor déficit identifican prioridades de rediseño curricular y formación docente.

Tabla 4: Matriz sintética de brechas por macrocompetencia. Escala ordinal: 0 ausente, 5 dominio excelente

Disciplina	Datos	Física computacional	IIoT	ESG	Capstone	Diagnóstico curricular
Ingeniería de minas	2	3	2	3	2	Fuerte base operacional, baja integración de datos en tiempo real.
Metalurgia	2	3	1	3	2	Buen dominio de procesos, déficit en sensores, control avanzado y gemelos digitales.
Geología	2	2	1	2	1	Potencial en modelamiento espacial, menor conexión con analítica industrial.
Ambiental	2	1	1	4	2	Fuerte orientación ESG, baja formalización ciberfísica y optimización.
Industrial/datos	4	2	3	2	3	Buen dominio analítico, riesgo de desconexión con física minera.

Arquitectura MC4-Mining

La arquitectura MC4-Mining se compone de cuatro capas secuenciales y retroalimentadas. La Capa 1 introduce alfabetización ciberfísica: sensores, datos, seguridad, interoperabilidad y fundamentos de minería digital. La Capa 2 desarrolla analítica físico-computacional: modelos estadísticos, optimización, simulación, incertidumbre e IA interpretable. La Capa 3 integra aplicaciones disciplinares: geometalurgia, planificación, mantenimiento, relaves, ventilación, perforación, procesamiento y sostenibilidad. La Capa 4 culmina en capstone academia-industria con problema real, datos trazables, validación y defensa técnica.

Marco MC4-Mining: arquitectura curricular de cuatro capas



Fig. 12: Arquitectura MC4-Mining. Las cuatro capas curriculares articulan alfabetización ciberfísica, analítica físico-computacional, integración disciplinar y capstone con validación industrial.

Tabla 5: Módulos prioritarios MC4 por disciplina.

Disciplina	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3
Ingeniería de minas	Sistemas ciberfísicos en operaciones	Optimización estocástica de flotas y planificación	Capstone de control operacional y seguridad.
Metalurgia	Sensores y control de procesos	Modelos híbridos para plantas concentradoras	Gemelo digital de circuito metalúrgico.
Geología	Analítica geoespacial y aprendizaje automático	Incertidumbre geológica y simulación	Integración geometalúrgica de datos.
Ambiental	ESG cuantitativo y ciclo de vida	Modelación de agua, energía y emisiones	Proyecto socioambiental con indicadores verificables.
Industrial/datos	MLOps industrial y gobierno de datos	IA físico-informada y optimización	Plataforma de decisión minera reproducible.

Los pilares operativos de Minería 4.0 se mapean a las capas MC4 en la Figura 13. El valor del marco reside en que evita una actualización cosmética de programas. No propone agregar una asignatura de IA, sino reestructurar el flujo completo de aprendizaje para que cada competencia sea evaluada por evidencia técnica, datos, modelo y decisión.

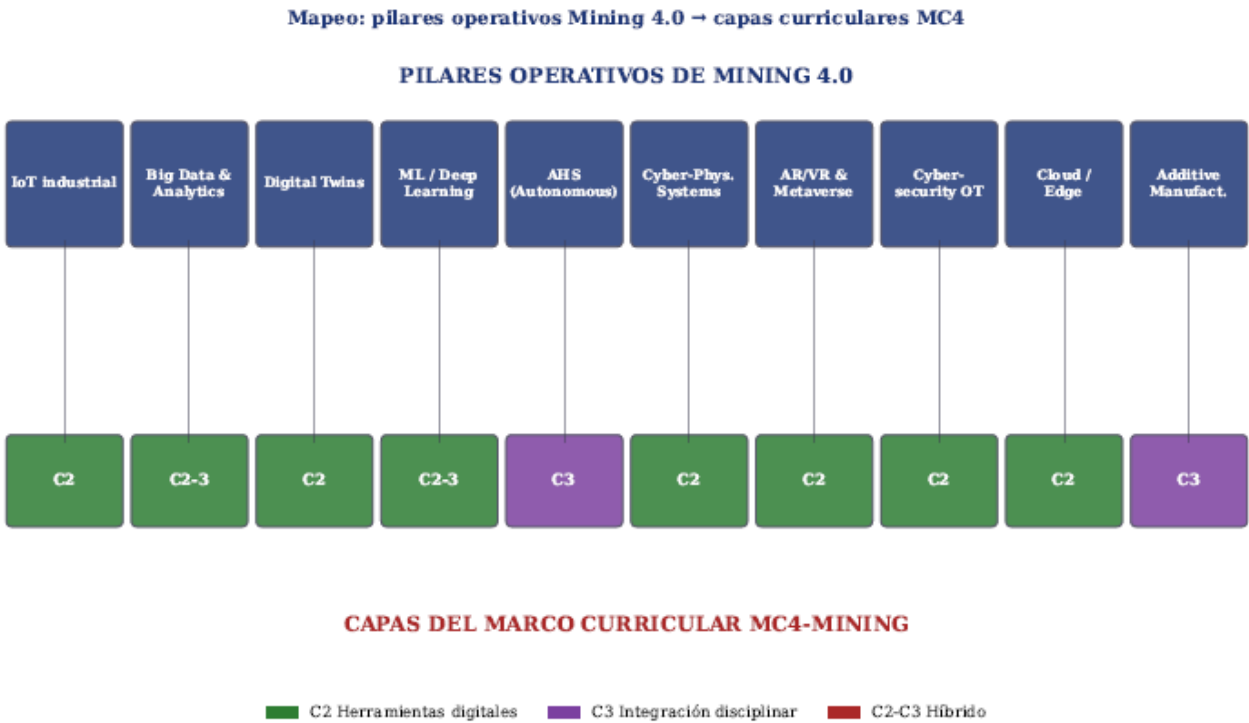
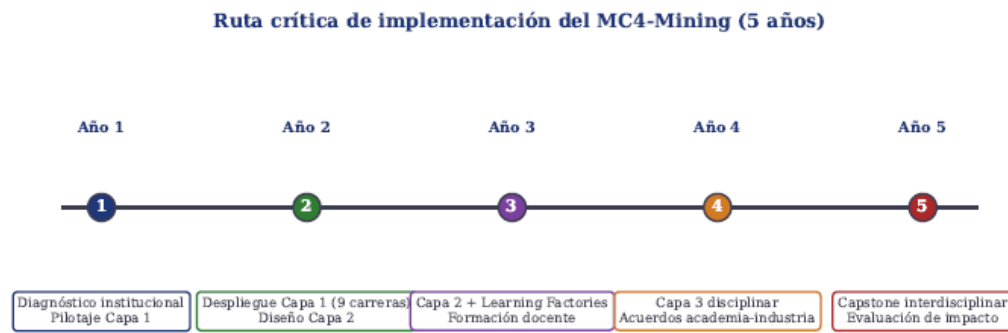


Fig. 13: Pilares operativos de Minería 4.0 mapeados a las capas MC4. La trazabilidad entre tecnología y currículo permite priorizar inversiones formativas.

Ruta crítica e indicadores de éxito

La implementación requiere una ruta quinquenal. El primer año debe diagnosticar capacidades, levantar laboratorios, seleccionar datasets y alinear socios industriales. El segundo año despliega la Capa 1 y diseña pilotos de Capa 2. El tercer año consolida Capa 2 y laboratorios de aprendizaje. El cuarto año incorpora Capa 3 disciplinar y acuerdos de transferencia. El quinto año ejecuta capstone interdisciplinar, evalúa impacto y retroalimenta mallas. La Figura 14 formaliza esta trayectoria.



Indicadores de éxito: cobertura $\geq 80\%$ módulos · empleabilidad ≤ 4 meses · 70% docentes capacitados · 1 publicación Q1 por capstone

Fig. 14: Ruta crítica de implementación del marco MC4-Mining. La secuencia evita despliegues declarativos sin infraestructura, datos ni validación.

Los indicadores de éxito deben cubrir resultados de aprendizaje, desempeño técnico, inserción laboral, transferencia y madurez institucional. Una métrica mínima de impacto puede definirse como

$$I_{MC4} = w_1 S_{competencia} + w_2 S_{empleabilidad} + w_3 S_{transferencia} + w_4 S_{investigacion} + w_5 S_{equidad}, \quad (10)$$

con $\sum_i w_i = 1$ y escalas normalizadas. Esta métrica debe estimarse longitudinalmente, no al final de un curso aislado.

DISCUSIÓN

Contraste con la literatura existente

El análisis confirma que la literatura tecnológica de Minería 4.0 ha avanzado con mayor rapidez que la literatura curricular. Existen aportes robustos sobre digital twins, mantenimiento predictivo, operación autónoma y sostenibilidad, pero la transferencia al aula suele permanecer implícita. A la inversa, la literatura de Education 4.0 identifica metodologías activas, competencias y transformación docente, pero rara vez incorpora modelos de alta fidelidad, incertidumbre, validación física y restricciones reales de operación minera. El marco MC4 opera como puente entre ambos dominios.

La originalidad metodológica de esta revisión es doble. Primero, combina PRISMA, bibliometría y síntesis temática en un mismo flujo, evitando que la revisión sea puramente narrativa. Segundo, transforma resultados bibliométricos en diseño curricular verificable. Esta transformación es no trivial: requiere traducir clústeres en competencias, competencias en módulos, módulos en evidencias y evidencias en indicadores de impacto.

Implicancias regionales y madurez institucional

La madurez regional mostrada en la Figura 15 confirma que América Latina enfrenta una brecha de coordinación más que una ausencia absoluta de capacidades. Existen universidades, operaciones mineras, empresas tecnológicas y centros de investigación, pero el acoplamiento entre ellos es discontinuo. La oportunidad estratégica consiste en construir nodos regionales MC4 conectados a problemas reales: cobre, litio, relaves, agua, energía, seguridad, mantenimiento y cierre de faenas.

Limitaciones

La revisión presenta limitaciones que deben explicitarse. Primero, la dependencia de Scopus y Web of Science reduce la visibilidad de informes técnicos, experiencias docentes locales y literatura gris de alta pertinencia operacional. Segundo, la codificación temática puede verse afectada por la terminología heterogénea entre minería, manufactura, educación e informática. Tercero, el marco MC4 es una propuesta derivada de evidencia secundaria y requiere validación longitudinal en instituciones concretas. Cuarto, las figuras bibliométricas sintetizan redes con parámetros de umbral; variaciones en dichos umbrales pueden modificar posiciones relativas, aunque no alteran la tesis principal.

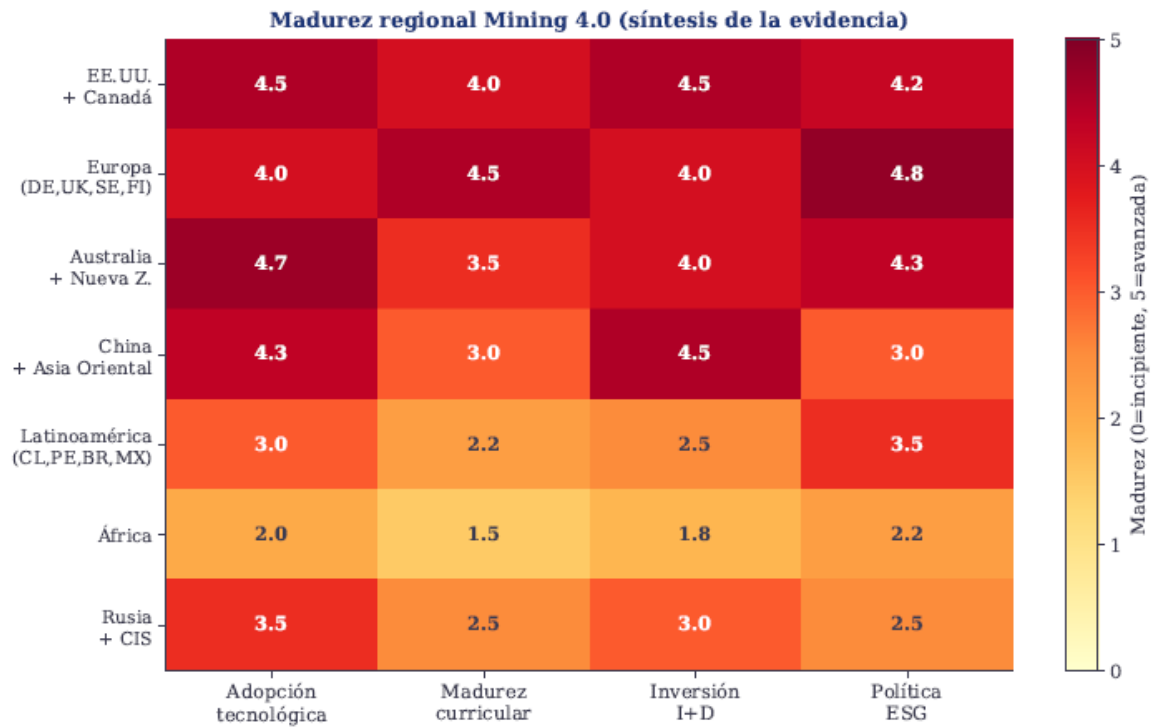


Fig. 15: Madurez regional relativa para formación en Minería 4.0. La periferia latinoamericana representa una oportunidad de liderazgo si se integran universidades, industria y datos operacionales.

Agenda de investigación futura — 6 líneas con instrumentos y nicho publicacional Q1



Fig. 16: Agenda de investigación futura. Las líneas prioritarias combinan instrumentos cuantitativos, validación curricular y problemas mineros regionales.

Agenda de investigación futura

La agenda futura se organiza en seis líneas: datasets educativos y operacionales abiertos, validación longitudinal de competencias MC4, gemelos digitales educativos, IA físico-informada para aprendizaje minero, evaluación de impacto regional y gobernanza ética de datos. La Figura 16 sintetiza estas líneas con instrumentos metodológicos y nichos de investigación.

CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática y bibliométrica demuestra que Minería 4.0 y educación universitaria constituyen un campo emergente, acelerado y todavía fragmentado. El corpus de 157 documentos presenta crecimiento anual compuesto de 18.4%, estructura de fuentes concentrada, productividad autoral compatible con Lotka y nueve clústeres temáticos que delimitan la frontera intelectual del campo. Los temas de gemelos digitales, sostenibilidad, workforce, IA aplicada, IIoT, mantenimiento predictivo e inteligencia físico-informada conforman el núcleo de competencias que las universidades deben internalizar.

La respuesta a la pregunta sobre brechas disciplina-competencia es inequívoca: las mayores carencias no se ubican en contenidos aislados, sino en la integración entre física del proceso, datos industriales, validación computacional y decisión operacional. La formación minera avanzada requiere pasar de cursos desconectados a trayectorias curriculares con evidencia reproducible, laboratorios de aprendizaje, datasets reales, evaluación por proyectos y vínculos formales con industria.

El marco MC4-Mining propuesto traduce la evidencia en una arquitectura de cuatro capas: alfabetización ciberfísica, analítica físico-computacional, integración disciplinar y capstone academia-industria. Su valor reside en que permite operacionalizar la revisión, orientar inversión institucional, definir módulos por disciplina, establecer indicadores y construir una ruta crítica de cinco años. Para América Latina, esta propuesta tiene relevancia estratégica: la región posee centralidad material en minerales críticos, pero no necesariamente centralidad científica ni curricular en Minería 4.0. Cerrar esa brecha exige consorcios, datos, laboratorios y programas de formación avanzada con validación rigurosa.

REFERENCIAS

- Ali, S.H., Giurco, D., Arndt, N., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A., *et al.* (2017). Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature*, 543 (7645), 367-372. <https://doi.org/10.1038/nature21359>
- Aria, M. & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11 (4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Barnewold, L. & Lottermoser, B.G. (2020). Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30 (6), 747-757.
- Benesova, A. & Tupa, J. (2017). Requirements for education and qualification of people in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195-2202. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.366>
- Bui, X.-N., Jaroonpattanapong, P., Nguyen, H., Tran, Q.-H. & Long, N.Q. (2019). A novel hybrid model for predicting blast-induced ground vibration based on the XGBoost algorithm and PSO. *Natural Resources Research*, 28, 1287-1304. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50262-5>
- Cacciuttolo, C., Atencio, E., Komarizadehasl, S. & Lozano-Galant, J. A. (2025). Development of an advanced multi-layer digital twin conceptual framework for underground mining. *Sensors*, 25 (21), 6650. <https://doi.org/10.3390/s25216650>
- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A. & Valero, A. (2016). Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? *Resources*, 5 (4), 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>

- Cobo, M., López-Herrera, A., Herrera-Viedma, E. & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 62 (7), 1382-1402. <https://doi.org/10.1002/asi.21525>
- Coskun, S., Kayikci, Y. & Gencay, E. (2019). Adapting engineering education to Industry 4.0 vision. *Technologies*, 7 (1), 10. <https://doi.org/10.3390/technologies7010010>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N. & Lim, W.M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Frank, A.G., Dalenogare, L.S. & Ayala, N.F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Grybauskas, A., Vilkas, M. & Petraite, M. (2021). Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. *Business Strategy and the Environment*, 30 (8), 4237-4257. <https://doi.org/10.1002/bse.2867>
- González-Pérez, L. I. & Ramírez-Montoya, M.-S. (2022). Components of Education 4.0 in 21st century skills frameworks: Systematic review. *Sustainability*, 14 (3), 1493. <https://doi.org/10.3390/su14031493>
- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S. & Kohl, H. (2016). Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.102>
- Hermann, M., Pentek, T. & Otto, B. (2016). *Design principles for Industrie 4.0 scenarios*. In Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), pages 3928-3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Iacovidou, E., Hahladakis, J.N. & Purnell, P. (2021). A systems thinking approach to understanding the challenges of achieving the circular economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 24785-24806. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11725-9>
- Karniadakis, G.E., Kevrekidis, I.G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S. & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3, 422-440. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>
- Kinnunen, P.H. & Kaksonen, A.H. (2019). Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production*, 228, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171>
- Kipper, L.M., Furstenau, L.B., Hoppe, D., Frozza, R. & Iepson, S. (2020). Scopus scientific mapping production in Industry 4.0 (2011-2018): a bibliometric analysis. *International Journal of Production Research*, 58 (6), 1605-1627. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1671625>
- Kipper, L. M., Iepson, S., Dal Forno, A.J., Frozza, R., Furstenau, L., Agnes, J., et al. (2021). Scientific mapping to identify competencies required by Industry 4.0. *Technology in Society*, 64, 101454. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101454>
- Lebre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J.R., Kemp, D., Coté, C., et al. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11, 4823. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>
- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., et al. (2022). Industry 5.0: Prospect and retrospect. *Journal of Manufacturing Systems*, 65:279-295. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>

- Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q. & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>
- León, F., Rojas, L., González, C., Hernández, B. & García, J. (2024). Convergence frontier analysis of sparse-matrix quasi-newton methods: Applications to rock blasting geomechanics. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 15 (2), 51-63. <https://doi.org/10.65093/aci.v15.n2.2024.13>
- Li, L. (2024). Reskilling and upskilling the future-ready workforce for Industry 4.0 and beyond. *Information Systems Frontiers*, 26, 1697-1712. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10308-y>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H. & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Martínez, Y., Rojas, L., Tapia, S., Aguilera, G. & Bazan, V. (2025). Void defect prediction in friction stir welding using machine learning algorithms. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 16 (3), 41-62. <https://doi.org/10.65093/aci.v16.n3.2025.36>
- Miranda, J., Navarrete, C., Noguez, J., Molina-Espinosa, J.-M., Ramírez-Montoya, M.-S., Navarro-Tuch, S.A., et al. (2021). The core components of education 4.0 in higher education: Three case studies in engineering education. *Computers & Electrical Engineering*, 93, 107278. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107278>
- Molina, A., Ponce, P., Miranda, J., and Cortes-Robles, G. (2021). *Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0*. Springer.
- Mukul, E. & Büyüközkan, G. (2023). Digital transformation in education: A systematic review of Education 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122664. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122664>
- Nwaila, G.T., Frimmel, H.E., Zhang, S.E., Bourdeau, J.E., Tolmay, L.C., Durrheim, R.J., et al. (2024). The minerals industry in the era of digital transition: An energy-efficient and environmentally conscious approach. *Resources Policy*, 78, 102851. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102851>
- Onifade, M., Adebisi, J. A., Shivute, A. P. & Genc, B. (2023). Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. *Resources Policy*, 85:103978. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103978>
- Owen, J.R., Kemp, D., Lechner, A.M., Harris, J., Zhang, R. & Lebre, É. (2023). Energy transition minerals and their intersection with land-connected peoples. *Nature Sustainability*, 6, 203-211. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00994-6>
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paredes, D. & Fleming-Muñoz, D. (2021). Automation and robotics in mining: Jobs, income and inequality implications. *The Extractive Industries and Society*, 8 (1), 189-193. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.01.004>
- Raissi, M., Perdikaris, P. & Karniadakis, G.E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- Ramírez-Montoya, M.-S., Castillo-Martínez, I. A., Sanabria-Z, J. & Miró-Amarante, M. L. (2022). Complex thinking in the framework of Education 4.0 and open innovation - a systematic literature review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8 (1), 4. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010004>
- Rienties, B., Divjak, B., Šimac, I. & Žugec, B. (2023). Education 4.0 in higher education and computer science: A systematic review. *Computer Applications in Engineering Education*, 31 (5), 1352-1369. <https://doi.org/10.1002/cae.22643>

- Rodriguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M., Chica-Olmo, M. & Chica-Rivas, M. (2015). Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines. *Ore Geology Reviews*, 71, 804-818. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>
- Rojas, L. & Bazan, V. (2025). Optimization of production drilling using Bayesian statistics, advanced statistical models, and multivariate analysis: A comparative study of methods. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 16 (2), 73-87. <https://doi.org/10.65093/aci.v16.n2.2025.30>
- Rojas, L., Peña, Á. & García, J. (2025). AI-driven predictive maintenance in mining: A systematic literature review on fault detection, digital twins, and intelligent asset management. *Applied Sciences*, 15 (6), 3337. <https://doi.org/10.3390/app15063337>
- Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Müller, R. D. & Chandra, R. (2022). A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112750. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112750>
- Sovacool, B.K., Ali, S.H., Bazilian, M., Radley, B., Nemery, B., Okatz, J., et al. (2020). Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*, 367 (6473), 30-33. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>
- Stothard, P., Galván, P. & Mitchell, R. (2019). The application of virtual reality and augmented reality in mining engineering education. *Mining Education Australia*. <https://research.unsw.edu.au/projects/mining-education-australia>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L. & Nee, A. (2019). Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5 (4), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tost, M., Hitch, M., Chandurkar, V., Moser, P. & Feiel, S. (2018). The state of environmental sustainability considerations in mining. *Journal of Cleaner Production*, 182, 969-977. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.051>
- Tranfield, D., Denyer, D. & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14 (3), 207-222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Trevelyan, J. (2019). Transitioning to engineering practice. *European Journal of Engineering Education*, 44 (6), 821-837. <https://doi.org/10.1080/03043797.2019.1681631>
- van Eck, N.J. & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84 (2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vidal, O., Goffe, B. & Arndt, N. (2013). Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, 6 (11), 894-896. <https://doi.org/10.1038/ngeo1993>
- Vila, C., Ugarte, D., Ríos, J. & Abellán, J.V. (2017). Project-based collaborative engineering learning to develop Industry 4.0 skills within a PLM framework. *Procedia Manufacturing*, 13, 1269-1276. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.050>
- Wanasinghe, T.R., Gosine, R.G., James, L.A., Mann, G.K., de Silva, O. & Warrian, P. J. (2020). Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE Access*, 8, 104175-104197. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998723>
- Watari, T., Nansai, K. & Nakajima, K. (2021). Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105107. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105107>

- World Economic Forum (2023). The future of jobs report 2023. *World Economic Forum, Geneva*.
- Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C. & Yu, P.S. (2021). A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32 (1), 4-24. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>
- Xu, L. D., Xu, E. L., and Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56 (8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Zhironkin, S. & Dotsenko, E. (2023). Review of transition from Mining 4.0 to 5.0 in fossil energy sources production. *Energies*, 16 (15), 5794. <https://doi.org/10.3390/en16155794>
- Zhironkin, S. & Ezdina, N. (2023). Review of transition from Mining 4.0 to Mining 5.0 innovative technologies. *Applied Sciences*, 13 (8), 4917. <https://doi.org/10.3390/app13084917>
- Zhironkin, S., Gasanov, M. & Suslova, Y. (2022). Orderliness in Mining 4.0. *Energies*, 15 (21), 8153. <https://doi.org/10.3390/en15218153>
- Zhironkina, O. & Zhironkin, S. (2023). Technological and intellectual transition to Mining 4.0: A review. *Energies*, 16 (3), 1427. <https://doi.org/10.3390/en16031427>
- Zhu, W., Kong, D., Ye, Q., Zhang, X., Tian, D. & Solangi, Y. (2025). Enhancing environmental sustainability in the mining industry: Circular economy strategies for resource management and digital integration. *Land Degradation & Development*, 36, 2887-2901. <https://doi.org/10.1002/ldr.5539>
- Zuo, R. & Xu, Y. (2020). Graph deep learning model for mapping mineral prospectivity. *Mathematical Geosciences*, 52, 1-21.

