

Industria 4.0 y automatización avanzada en las organizaciones: Mapeo científico y perspectivas de investigación

Industry 4.0 and advanced automation in organizations: Scientific mapping and research perspectives



DOI: <https://doi.org/10.17981/econcuc.Org.6431>

Artículo de Revisión

Fecha de recepción: 06/05/2025

Fecha de devolución: 17/06/2025

Fecha de aceptación: 25/06/2025

Fecha de publicación: 29/06/2025

Gabriel Antonio Moyano-Londoño 

Universidad Católica Luis Amigó
Manizales, Caldas (Colombia)

gabriel.moyanolo@amigo.edu.co 

Valentina Cardona-Granada 

Universidad Católica Luis Amigó
Manizales, Caldas (Colombia)

valentina.cardonagr@amigo.edu.co

Para citar este artículo:

Moyano-Londoño, G. A., & Cardona-Granada, V. (2025). Industria 4.0 y automatización avanzada en las organizaciones: Mapeo científico y perspectivas de investigación. *Económicas CUC*, 46(1), e256431. <https://doi.org/10.17981/econcuc.Org.6431>

JEL: C80, D24, L00, L23, M15, O14, O33.

Resumen

La Industria 4.0 y la automatización avanzada ofrecen a las organizaciones nuevas palancas para aumentar su eficiencia, productividad y la calidad de sus operaciones, al tiempo que contribuyen a la reducción de costes, la eliminación de errores, la optimización de procesos y la creación de nuevos productos. Desde una perspectiva económica centrada en la competitividad, el rendimiento organizativo y el desarrollo sostenible en un contexto regional y nacional, este estudio tiene como objetivo contribuir a la comprensión de la evolución de las tecnologías de la Industria 4.0 y la automatización avanzada e identificar sus implicaciones para la gestión y la economía. Con este fin, presenta una revisión sistemática de la literatura que, siguiendo la declaración PRISMA 2020, empleó herramientas como RStudio Cloud, Tree of Science, Bibliometrix y Gephi para el procesamiento de 2442 registros bibliográficos que fueron abstraídos de Web of Science y Scopus. La utilización de estas herramientas posibilitó esclarecer la evolución, relevancia e importancia del campo de estudio a partir de un mapeo científico, a la vez que facilitó la identificación y análisis de tres perspectivas de investigación: la primera, sobre los aportes de la Industria 4.0; la segunda, acerca de los problemas y desafíos de seguridad; y la tercera, en torno a la automatización industrial y las tecnologías 4.0. Finalmente, se destaca la necesidad de realizar investigaciones que profundicen sobre el impacto de las tecnologías de la industria 4.0 en sectores no manufactureros, así como el estudio de las tensiones entre la automatización y el empleo desde un enfoque ético y organizacional.

Palabras clave: Transformación digital industrial; tecnologías emergentes; productividad organizacional; seguridad en sistemas ciberfísicos; automatización inteligente; revisión sistemática de literatura.

Abstract

Industry 4.0 and advanced automation offer organizations new levers to increase their efficiency, productivity, and the quality of their operations, while contributing to cost reduction, error elimination, process optimization, and the creation of new products. From an economic perspective focused on competitiveness, organizational performance, and sustainable development in a regional and national context, this study aims to contribute to the understanding of the evolution of Industry 4.0 technologies and advanced automation and identify their implications for management and the economy. To this end, it presents a systematic review of the literature which, following the PRISMA 2020 statement, used tools such as RStudio Cloud, Tree of Science, Bibliometrix, and Gephi to process 2,442 bibliographic records that were abstracted from Web of Science and Scopus. The use of these tools made it possible to clarify the evolution, relevance, and importance of the field of study based on scientific mapping, while facilitating the identification and analysis of three research perspectives: the first on the contributions of Industry 4.0; the second on security issues and challenges; and the third on industrial automation and 4.0 technologies. Finally, the need for research that delves deeper into the impact of Industry 4.0 technologies on non-manufacturing sectors is highlighted, as well as the study of the tensions between automation and employment from an ethical and organizational perspective.

Keywords: Industrial digital transformation; emerging technologies; organizational productivity; security in cyber-physical systems; intelligent automation; systematic literature review.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la Industria 4.0 y la automatización avanzada se sitúan en el centro de la transformación empresarial. En un entorno cada vez más globalizado, la integración de tecnologías, metodologías y herramientas como la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IoT), el internet de los servicios (IoS), los sistemas ciberfísicos (CPS), la computación en la nube (CC), el aprendizaje automático (ML), la cadena de bloques (BC), la robótica industrial (IR), la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR) se ha convertido en un aspecto esencial para fortalecer la competitividad y garantizar la perdurabilidad empresarial (Belman-Lopez et al., 2020; Rossi et al., 2022; Marinagi et al., 2023; Mim et al., 2024; Qureshi et al., 2024).

La incorporación de estas tendencias tecnológicas se ha reflejado, en materia empresarial, en la optimización de procesos, la reducción de costos y en la capacidad adaptativa a las dinámicas del mercado (Lee et al., 2023; Elnadi & Abdallah, 2024), lo cual ha provocado, a su vez, un incremento del interés académico e investigativo, manifestado en el creciente número de estudios que se han publicado, en los últimos años, en plataformas bibliográficas como Web of Science (WoS) y Scopus.

Si bien lo anterior resulta fructífero para el fortalecimiento de cualquier área del conocimiento, su crecimiento exponencial también plantea diversos desafíos, relacionados principalmente con la curación, sistematización y análisis de las investigaciones publicadas. En respuesta a esta coyuntura, las revisiones sistemáticas de la literatura han cobrado gran relevancia, debido a las ventajas que ofrecen al examinar grandes volúmenes de información, identificar el estado del arte de un campo de estudio y facilitar la identificación de tendencias de investigación (Velásquez, 2014; Moyano-Londoño & Marín-Cardona, 2024).

En tal sentido, este estudio tiene como objetivo contribuir a la comprensión de la evolución de las tecnologías de la Industria 4.0 y la automatización avanzada e identificar sus implicaciones para la gestión y la economía, para lo cual se desarrolló un mapeo científico, se construyó el Árbol de la Ciencia y se identificaron las principales perspectivas de investigación en el área. Para el cumplimiento de este propósito, se recopiló y curó material bibliográfico de WoS y Scopus, posteriormente procesado con la ayuda de softwares y herramientas como RStudio, Bibliometrix, Tree of Science (ToS) y Gephi. Todo el proceso se adelantó con base en lo establecido en la declaración PRISMA 2020, guía de rigurosidad académica para este tipo de investigaciones (Haddaway et al., 2022). Las preguntas de investigación que se buscaron resolver son: ¿Cómo ha evolucionado el área de la Industria 4.0 y la automatización avanzada? y ¿cuáles son las principales perspectivas de investigación de este campo de conocimiento?

En el campo de la Industria 4.0 y la automatización avanza se han desarrollado revisiones centradas en estudiar la manufactura inteligente y sostenible (Zhong et al., 2017; Jamwal et al., 2021), la producción eficiente (Kassem et al., 2024), la innovación digital (Gupta & Jauhar, 2023) y la conceptualización sociotécnica de la Industria 4.0 (Beier et al., 2020). Si bien estas investigaciones aportan significativamente al desarrollo del campo, adolecen de la una integración metodológica de herramientas que posibiliten revelar la evolución, el estado actual y las perspectivas simultáneamente.

En particular, la originalidad de esta investigación radica en la integración de las herramientas, softwares y algoritmos utilizados, aplicados a datos extraídos de WoS y Scopus para el período 2012 – 2024, y que además contempla, como garantía de

replicabilidad y transparencia académica, la utilización de elementos de la declaración PRISMA 2020. Además, este estudio ofrece implicaciones prácticas al presentar una visión sistemática de los avances y tendencias de implementación sostenible y responsable de este tipo de tecnologías.

Para finalizar, este documento se encuentra estructurado por cuatro acápites más: (i) Metodología, en la que se describen los criterios de búsqueda, inclusión y exclusión, el proceso de curación de la información y el procedimiento adelantado para la realización del mapeo científico y la identificación de las perspectivas de investigación; (ii) Resultados, en el que se presentan los hallazgos más relevantes en materia de la evolución, relevancia, importancia, Árbol de la Ciencia y perspectivas de investigación; (iii) Discusión, en el que se realiza un análisis e interpretación de los resultados obtenidos; (iv) Conclusiones; y (v) Referencias bibliográficas.

METODOLOGÍA

La metodología empleada para la elaboración de este artículo se estructuró en dos grandes etapas: (i) la curación de los datos y (ii) su análisis. Ambas fases se llevaron a cabo mediante el uso de herramientas bibliométricas y cienciométricas, y en concordancia con los lineamientos establecidos en la declaración PRISMA 2020, guía de referencia que posibilita garantizar la rigurosidad científica en el desarrollo de revisiones sistemáticas de literatura (Haddaway et al., 2022). Las dos etapas se describen a continuación:

Curación de los datos

La curación de los datos, proceso en el que se obtuvieron, integraron, limpiaron y organizaron los registros bibliográficos para su posterior análisis, partió de la construcción de una ecuación de búsqueda en la que se incorporaron las temáticas de interés para esta investigación: Industria 4.0 y automatización avanzada. Esta ecuación, que fue corrida en las bases de datos de Scopus y WoS, incluyó términos como “Smart Manufacturing”, “Robotic Automation” y “Process Automation” con el propósito de ampliar su alcance.

La búsqueda, realizada el 16 de agosto de 2024, arrojó un resultado de 3689 registros bibliográficos en Scopus y 1932 en WoS, los cuales fueron sometidos a diferentes criterios de inclusión y exclusión, permitiendo la agrupación y selección final de 2442 artículos académicos que posteriormente fueron analizados. En la Tabla 1, se presenta el resumen de los criterios y los resultados obtenidos tras este proceso inicial.

Tabla 1:
Criterios y resultados de búsqueda

<i>Tema</i>	Industria 4.0 y automatización avanzada	
<i>Ecuación</i>	(Industry 4.0 OR Industria 4.0 OR Smart Manufacturing) and (Advanced automation OR automatización avanzada OR Robotic Automation OR Process Automation)	
<i>Bases de datos</i>	Scopus	WoS
<i>Periodo de consulta</i>	2012 - 2024	
<i>Fecha de consulta</i>	16 de agosto de 2024	
<i>Tipo de documento</i>	Artículos, artículos de revisión	
<i>Tipo de revista</i>	Todos los tipos	
<i>Campos de consulta</i>	Título, resumen, palabras clave	
<i>Resultados iniciales</i>	3689	1932
<i>Resultados finales</i>	2442	

Fuente: elaboración propia con datos de Scopus y WoS

Específicamente, los criterios de inclusión y exclusión empleados en esta investigación fueron: (i) eliminación de registros duplicados, que permitió excluir 197 textos; (ii) selección de tipo de documentos por artículos y artículos de revisión, permitiendo descartar 1125 textos, correspondientes a resúmenes o memorias de conferencias; (iii) selección de artículos por temática, lo que permitió separar de 725 textos que se distanciaban del tema central de la investigación; (iv) omisión de 935 artículos por no tener acceso abierto; (v) exclusión de 197 títulos que no fueron escritos en español o inglés. El diagrama de flujo de la declaración PRISMA, en el que se presentan gráficamente los criterios aquí descritos, se ilustra en la Fig. 1.

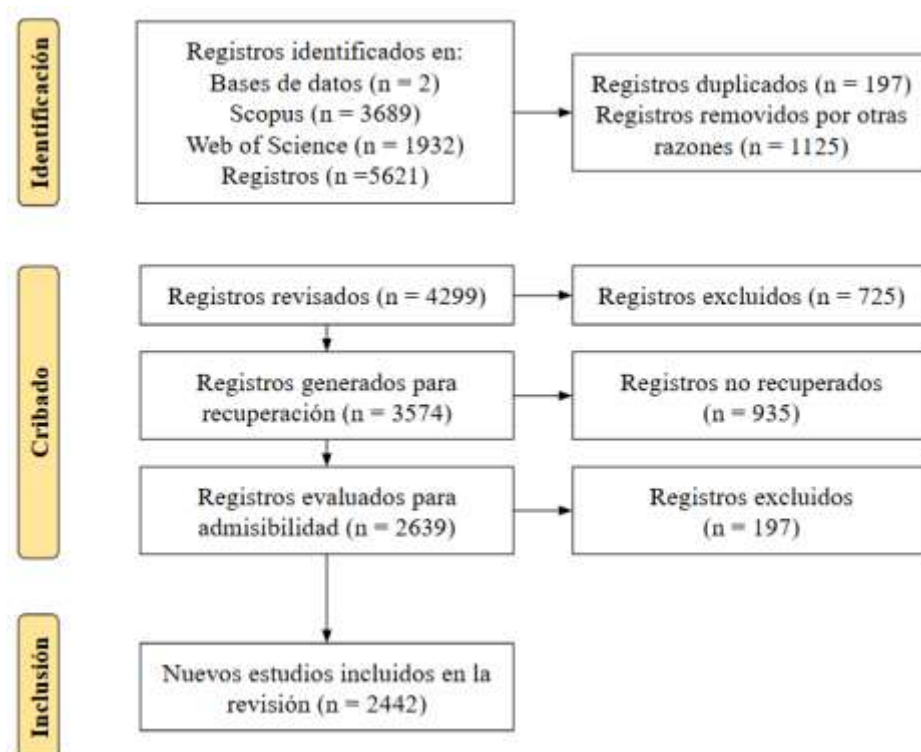


Fig. 1. Diagrama de flujo de la declaración PRISMA
Fuente: elaboración propia con base en Haddaway et al. (2022).

Análisis de los datos

Este proceso comenzó con la agrupación de toda la información bibliográfica de los 2442 documentos en dos archivos: uno de texto plano (.txt) y uno en formato BibTeX (.bib). En primer lugar, el archivo .bib fue cargado a Bibliometrix, una herramienta, de acceso abierto, que facilita el procesamiento y análisis estadístico, de cocitación, acoplamiento, coocurrencia y clústeres y de la información bibliográfica (Aria & Cuccurullo, 2017). Esta primera etapa permitió establecer, a partir de la utilización de indicadores como las publicaciones por año, la producción autorial, los Journals más productivos y los núcleos de colaboración mundial, la identificación de la importancia, relevancia y evolución que ha tenido el campo de la Industria 4.0 y la automatización avanzada.

Por su parte, el archivo .txt fue cargado a la plataforma de RStudio Cloud para ser procesado junto con el algoritmo de ToS, descargado de la GitHub de Core of Science. Este algoritmo de clusterización, descrito inicialmente por Robledo et al. (2014), permite la selección y análisis de la información a partir de las redes de citaciones y los grados de entrada, intermediación y salida que estos tienen. De acuerdo con Moyano-Londoño & Marín-Cardona (2024) y Alzate et al. (2024), esta metodología permite que los documentos sean clasificados en estudios seminales (raíz), por el alto número de citas recibidas; en estructurales (tronco), por su alto nivel de intermediación en la red; y en recientes (hojas), por el elevado grado de salida. Para esta investigación en particular, el Árbol se conformó por un total de 80 documentos: 10 en la raíz, 10 en el tronco, y 60 en las hojas.

De igual forma, el .txt sirvió de base para la generación de un archivo grafo (.graphml). Esta transformación, realizada en la plataforma de RStudio Cloud, proporcionó organizar la información para el análisis de cocitaciones que se adelantó en Gephi, un software que permite manipular, filtrar y analizar las grandes redes. Esta última etapa dio como resultado el reconocimiento de diecisiete clústeres o comunidades de investigación. No obstante, las tres primeras se configuran como las más importantes, pues juntas alcanzan un 38,37% del total de la red.

La selección y utilización conjunta de RStudio Cloud, Bibliometrix, ToS y Gephi permitió, en congruencia con los estudios adelantados por Robledo et al. (2014), Moyano-Londoño & Marín-Cardona (2024) y Alzate et al. (2024), sistematizar la información existente, seleccionar científica y sistemáticamente los estudios, a la vez que facilitan y dinamizan el proceso de análisis. Finalmente, la utilización de Bibliometrix y ToS posibilitó responder a la pregunta de investigación de como ha evolucionado el área de conocimiento, mientras que el empleo de Gephi permitió la identificación de las principales perspectivas.

RESULTADOS

Maapeo científico: Evolución, relevancia e importancia

Con el objetivo de identificar la evolución, crecimiento y afianzamiento de un área de investigación como la Industria 4.0 y la automatización avanzada, se adelantó un análisis del número de publicaciones que se han realizado, tanto en WoS como en Scopus, entre el 2012 y el 2023. Este proceso, que se realizó tras haber aplicado los criterios de inclusión y exclusión que fueron descritos anteriormente, permitió la generación de la Fig. 2.

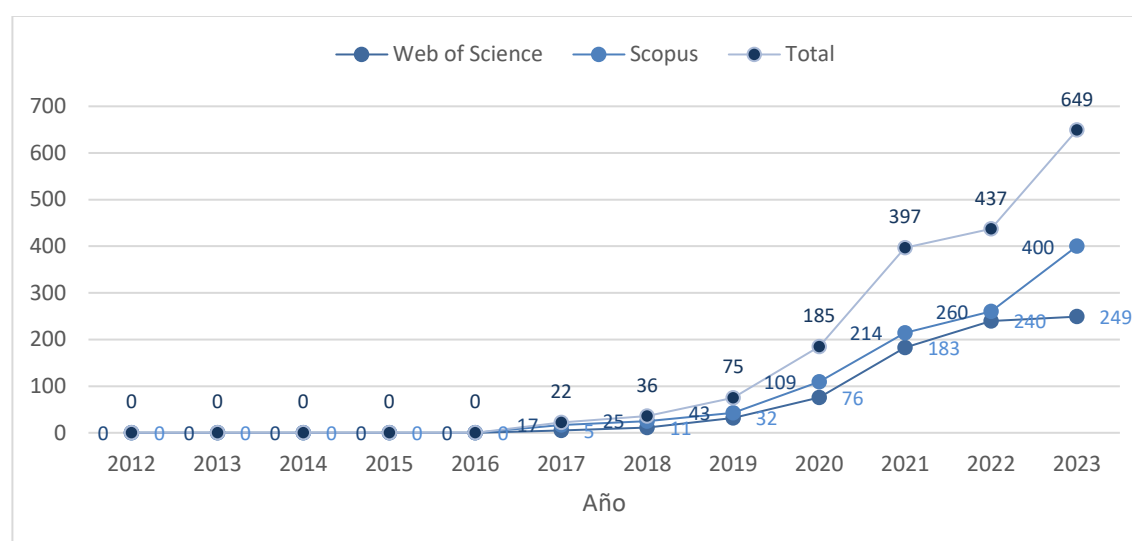


Fig. 2. Evolución de la producción científica del área

Fuente: elaboración propia tras el procesamiento de datos de Scopus y WoS.

De acuerdo con lo visualizado en la Fig. 2, es posible identificar tres etapas de producción científica. La primera es una etapa inicial o incipiente de producción entre los años 2012 y 2015, periodo en el que se realizaron publicaciones aisladas y bajas (no superaron 7 publicaciones). La segunda, corresponde a una etapa de crecimiento exponencial, en la que se pasó de 16 publicaciones (2016) a 484 publicaciones (2021). Mientras que la tercera etapa se asemeja a una etapa de maduración, en la que a pesar de que el crecimiento se desacelera (de 637 en 2020 a 649 en 2023), se evidencia una consolidación del área.

Por su parte, la utilización de Bibliometrix posibilitó identificar el número de publicaciones que se han realizado sobre la Industria 4.0 y la automatización avanzada por país. En la Figura 3, es posible identificar que Italia (218), el Reino Unido (207) y

China (190) son las tres naciones que mayor número de publicaciones poseen con un total de 615, representando el 44.53% de los diez países más productores. El top 10 de países más productores en esta área de conocimiento la completan España (150), Alemania (142), Estados Unidos (122), Polonia (110), India (92), Portugal (77) y Suecia (73).

Bajo este panorama, es posible evidenciar que el campo de la Industria 4.0 y la automatización avanzada posee una alta concentración geográfica de la producción científica en torno a un grupo de países, en su mayoría europeos. De igual forma, se destaca que la ausencia de países provenientes de regiones como América Latina o África podría motivar investigaciones futuras sobre barreras o brechas de visibilidad en el campo. A continuación, se presenta la Fig. 3.

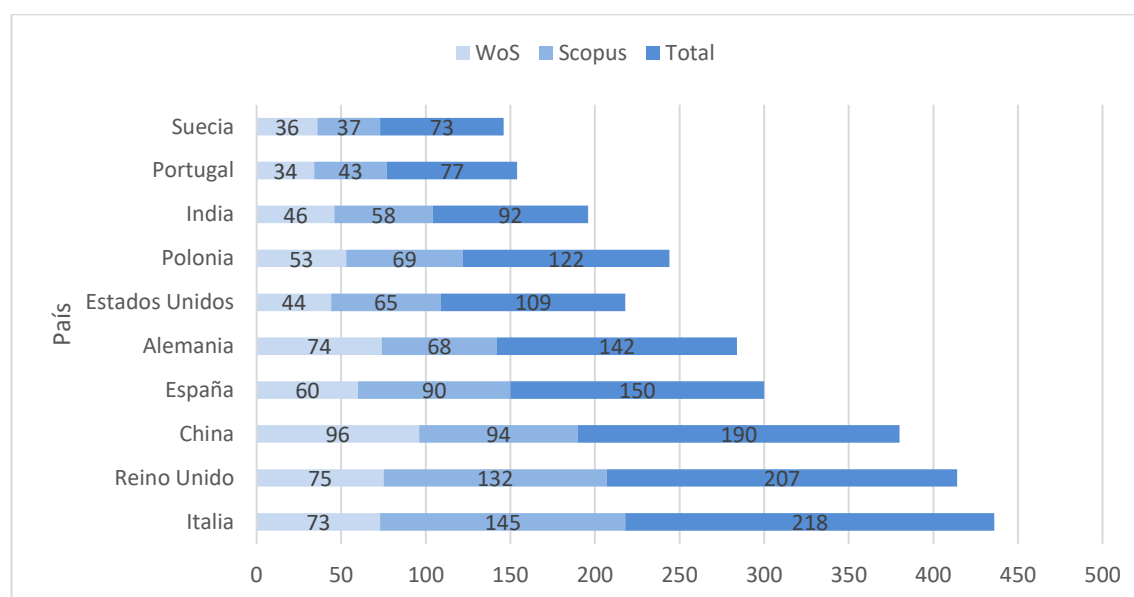


Fig. 3. Producción científica por país

Fuente: elaboración propia tras el procesamiento de datos de Scopus y WoS.

Por otra parte, el procesamiento de la producción científica también permitió la identificación de las principales subáreas de investigación. La Fig. 4, ilustra las cinco subáreas en las que más se publica sobre la Industria 4.0 y la automatización avanzada, la cual permite entrever que este escalafón es dominado por el subcampo de Ingeniería (824) y las Ciencias de la computación (613). A estas, tras un amplio margen, le siguen Ciencia multidisciplinar (206), Negocios, administración y contabilidad (199) y las Ciencias medioambientales (128). En tal sentido, los datos reflejan un campo de conocimiento con una fuerte inclinación tecnológica, pero también con interés desde los campos organizaciones y ambientales.

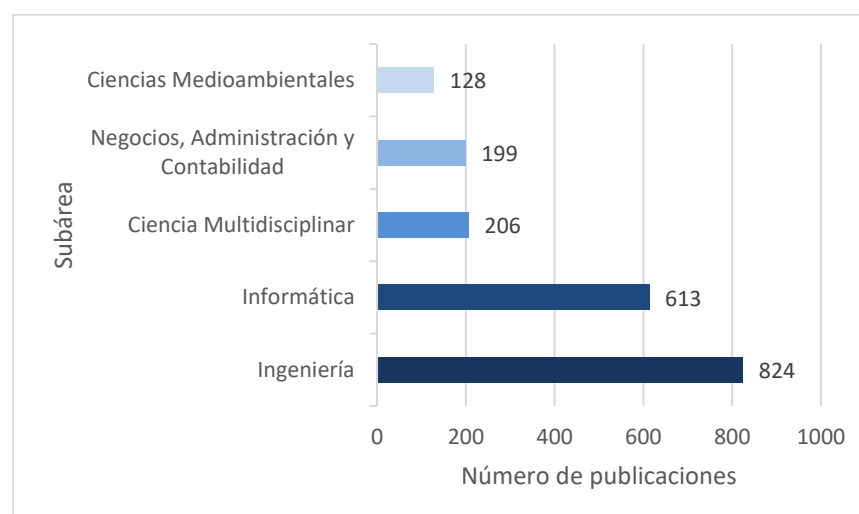


Fig. 4. Principales subáreas de la producción científica

Fuente: elaboración propia tras el procesamiento de datos de Scopus y WoS.

Ahora bien, para esta investigación también fue de interés el identificar las diez revistas en las que más se publica sobre la Industria 4.0 y la automatización avanzada. En particular, una vez realizado el procesamiento de la información, llamó la atención que siete de las diez revistas en las que más se publican son de nacionalidad suiza, dominando así este escalafón. Específicamente, este ranking lo lidera la revista *Sensors*, con 146 publicaciones, seguida de *Ieee Access*, con 139, y *Applied Sciences*, con 106 documentos.

Adicionalmente, se consultó el SCImago Journal & Country Rank con el fin de verificar el cuartil y el índice H correspondientes a cada una de las diez revistas identificadas. Esta revisión permitió establecer que las revistas *Sensors*, *IEEE Access*, *Sustainability*, *Journal of Manufacturing Systems* y *Energies* se encuentran clasificadas en el cuartil Q1 y presentan un alto índice H. Por su parte, *Applied Sciences*, *Applied Sciences–Basel*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *Machines* y *Processes* están ubicadas en el cuartil Q2. Esta información evidencia que las investigaciones del área son publicadas y difundidas en revistas con alta visibilidad, impacto y relevancia científica. De igual forma, en la Tabla 2, es posible evidenciar la existencia de una hegemonía editorial europea, lo cual puede incidir en los estilos editoriales, así como en los enfoques metodológicos y temáticos. A continuación, se presenta el detalle de la información.

Tabla 2:

Principales revistas científicas

Revista	WoS	Scopus	Total	Cuartil	Índice H	País
<i>Sensors</i>	67	79	146	Q1	245	Suiza
<i>Ieee Access</i>	56	83	139	Q1	242	Estados Unidos
<i>Applied Sciences</i>	0	106	106	Q2	130	Suiza
<i>Sustainability</i>	0	91	91	Q1	169	Suiza
<i>Applied Sciences-Basel</i>	68	0	68	Q2	130	Suiza
<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>	15	34	49	Q2	161	Reino Unido
<i>Journal Of Manufacturing Systems</i>	12	34	46	Q1	107	Países Bajos
<i>Energies</i>	13	24	37	Q1	152	Suiza
<i>Machines</i>	16	21	37	Q2	34	Suiza
<i>Processes</i>	17	18	35	Q2	72	Suiza

Fuente: elaboración propia tras el procesamiento de datos de Scopus, WoS y SCImago Journal & Country Rank

Las afiliaciones institucionales con mayor número de publicaciones -NP-, tanto en WoS como en Scopus, también atrajeron la atención de esta investigación. En Scopus, la Free University of Bozen-Bolzano y la Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet son los centros con mayor número de publicaciones (19), seguidos del Politecnico di Milano y la Universidad del País Vasco, cada una con 18, y la Cranfield University con 17. Por su parte, en WoS el escalafón lo lidera la Norwegian University Of Science Technology con 14, seguida del Tecnológico De Monterrey (13), Fraunhofer Gesellschaft (12) y el Consiglio Nazionale Delle Ricerche y la Polytechnic University Of Milan con 11 documentos publicados cada una.

En consecuencia, es posible evidenciar que las instituciones europeas dominan ambos rankings, tanto el de Scopus como el de WoS. Esta concentración geográfica también permite identificar la ausencia de instituciones latinoamericanas, africanas y asiáticas, lo que sugiere posibilidades de fortalecimiento, alianza, colaboración y coautoría internacional. El detalle de la información es presentado en la Tabla 3.

Tabla 3:

Afiliaiones institucionales con mayor número de publicaciones

Scopus			WoS		
Afiliaación	NP	País	Afiliaación	NP	País
Free University of Bozen-Bolzano	19	Italia	Norwegian University of Science Technology	14	Noruega
Norges Teknisk-NaturvitenSkapelige Universitet	19	Noruega	Tecnológico de Monterrey	13	México
Politecnico di Milano	18	Italia	Fraunhofer Gesellschaft	12	Alemania
Universidad del País Vasco	18	España	Consiglio Nazionale Delle Ricerche	11	Italia
Cranfield University	17	Reino Unido	Polytechnic University of Milan	11	Italia

Fuente: elaboración propia tras el procesamiento de datos de Scopus y WoS

En el desarrollo del mapeo científico, resultó particularmente relevante que cuatro de los diez investigadores con mayor número de publicaciones sobre Industria 4.0 y automatización avanzada sean de nacionalidad india. Por ejemplo, Haleem A, Javaid M y Kumar A registran, cada uno, un total de 16 publicaciones en WoS y Scopus, mientras que Suman R cuenta con 14 publicaciones en dichas bases de datos. Por su parte, Lee S y Singh R, de nacionalidad surcoreana y estadounidense respectivamente, también acumulan 14 trabajos publicados en este campo de estudio.

En la Tabla 4 se presenta el listado de los diez autores con mayor número de publicaciones. En esta, se incluye tanto el índice H de cada autor, como la institución a la que están afiliados. Asimismo, es posible observar que, además de India, los países con mayor representación entre los autores más productivos son Estados Unidos, Corea del Sur, China, Hungría y España. Asimismo, se destaca que Kumar A y Chen Y son los investigadores con los índices H más elevados, con 162 y 159, respectivamente.

Tabla 4:

Autores con mayor número de publicaciones

Autor	Publicaciones WoS y Scopus	Índice H	Institución	País
Kumar A	16	162	Indian Institute of Technology	India
Haleem A	16	89	Jamia Millia Islamia	India
Javaid M	16	74	Jamia Millia Islamia	India
Suman R	14	71	G. B. Pant University of Agriculture and Technology	India
Singh R	14	68	University of California	Estados Unidos
Lee S	14	62	Yonsei University	Corea del Sur
Wang X	14	44	Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences	China
Abonyi J	13	45	University of Pannonia	Hungría
Chen Y	12	159	California Institute of Technology	Estados Unidos
Fraga-Lamas	12	40	Universidade da Coruña	España

Fuente: elaboración propia tras el procesamiento de datos de Scopus, WoS y Bibliometrix

Finalmente, la Fi. 5 ilustra la red mundial de colaboración de publicaciones, la cual fue elaborada a partir de la información bibliográfica que se procesó en Bibliometrix. En este caso, el mapamundi representa, mediante líneas delgadas y gruesas, la intensidad de la colaboración que se tiene entre los diferentes países a nivel mundial. En detalle, la red de colaboración más fuerte es la de China y el Reino Unido, con un total de 14 publicaciones realizadas, seguida de la de China y Australia, con 10 publicaciones, y la de Italia y España, con 9 textos publicados de manera conjunta.

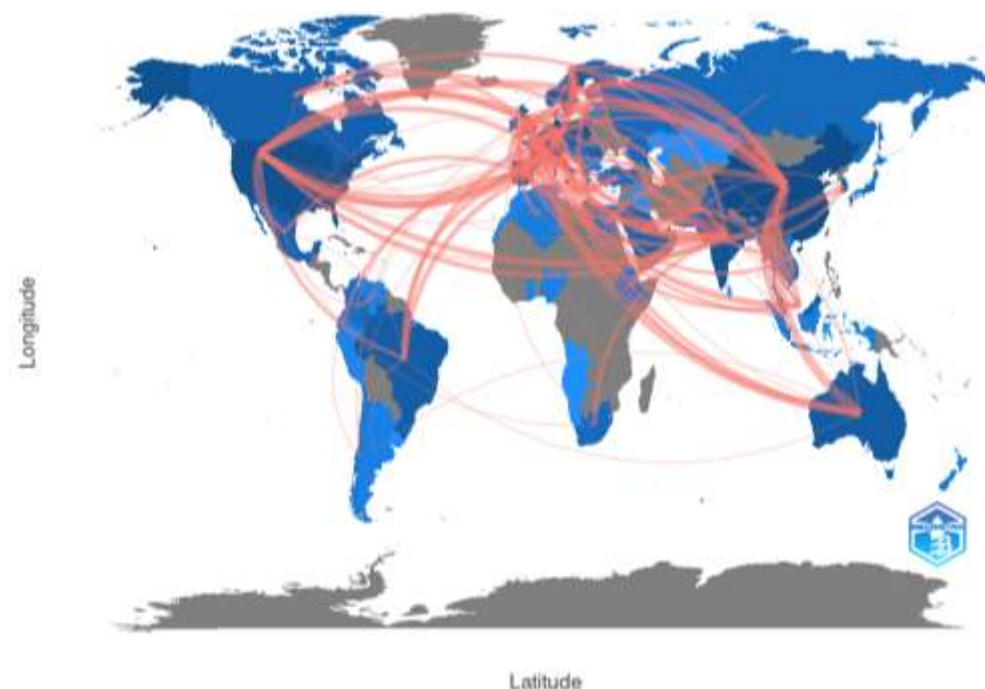


Fig. 5. Red mundial de colaboración de publicaciones
Fuente: elaboración propia tras el procesamiento en Bibliometrix.

Árbol de la ciencia

El Árbol de la Ciencia es una metodología que, a través del análisis de redes, permite clasificar a los artículos en una analogía de árbol, facilitando no solo su procesamiento y análisis, sino también, el ahorro de esfuerzos. El algoritmo de ToS, tras el procesamiento de la información bibliográfica, clasifica a los artículos seminales en la raíz, a los estructurales en el tronco del árbol, y a las tendencias investigativas en las hojas (Robledo et al., 2014; Moyano-Londoño, 2022).

Tal como se anunció en la sección de metodología, el Árbol de esta investigación se estructuró con un total de 80 investigaciones. En la raíz fueron clasificados 10 documentos que, publicados entre el 2014 y el 2019, sentaron las bases para el entendimiento de la cuarta revolución industrial (Vaidya et al., 2018; Frank et al., 2019), los retos derivados de la implementación y transformación organizacional (Oesterreich & Teuteberg, 2016), así como los impactos en el rendimiento industrial que devienen de la incorporación de las nuevas tecnologías (Lu, 2017).

En detalle, dentro de esta parte del Árbol se resaltan investigaciones como la de Lasi et al. (2014), en la que se describe la evolución de la Industria 4.0 y las transformaciones industriales que ha provocado. Mientras que en el estudio de Lee et al. (2015), se resaltan los sistemas ciberfísicos como tecnologías transformadoras que posibilitaran mejorar los procesos de planificación de la producción. Al respecto, Zhong et al. (2017) enfatizan en que la creación de las fabricas inteligentes, impulsadas desde la Industria 4.0, implica la integración de tecnologías como los sistemas ciberfísicos, el Internet de las Cosas y la computación en la nube.

Por su parte, en el tronco del Árbol se posicionaron investigaciones como las de, por ejemplo, Beier et al. (2020) y Ramirez-Ibarra (2023), quienes lograron determinar que los avances de la Industria 4.0 contribuyen, además de aumentar la eficiencia y la productividad en las empresas, al alcance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible - ODS-. Asimismo, es posible encontrar los estudios de Akundi et al. (2022) y Hughes et al. (2022) quienes coinciden en que la incorporación de tecnologías de la cuarta revolución industrial seguirá transformando el panorama de la producción en los

próximos años, principalmente por la eliminación de tareas repetidas y la fabricación sostenible e inteligente.

La investigación de Angelopoulos et al. (2019), clasificada como un estudio estructural, se concentró en estudiar los procesos de detección, predicción y prevención de fallos en la Industria 4.0, algo que en su momento había sido detallado por Piccarozzi et al. (2018). Adicionalmente, en esta sección se posicionaron estudios cuya preocupación giró en torno a los cambios generados por la incorporación de tecnologías en el sector manufacturero (Hughes et al., 2022), así como por la acelerada generación de grandes volúmenes de datos industriales (Akundi et al., 2022).

Ahora bien, el análisis de los documentos ubicados en las hojas del Árbol permitió identificar una multiplicidad de enfoques y tendencias actuales de investigación, centradas principalmente en dos aspectos: por un lado, la necesidad de incorporar los avances de la innovación digital y la Industria 4.0 en organizaciones dedicadas a los servicios, la formación profesional y el sector salud (Gupta & Jauhar, 2023); y por otro, el imperativo de continuar el desarrollo de sistemas de producción inteligentes en los distintos sectores industriales (Dombrowski et al., 2021; Schumacher et al., 2023).

Otro campo de investigación importante es el liderado por Martínez-Olvera (2022), en el que se han desarrollado mecanismos que propenden por una implementación sostenible de las tecnologías de la Industria 4.0. A la par, se posicionan enfoques investigativos que han reconocido que, a pesar de los efectos negativos provocados por la pandemia del SARS-CoV-2, se ha acelerado la transformación digital y el desarrollo de competencias tecnológicas en las industrias de todo el mundo (Hassoun et al., 2023). Como enfoques en los que se reconoce la oportunidad de una mayor colaboración e integración entre el capital humano y las máquinas (Martín-Gómez et al., 2024).

Finalmente, a partir de los grados de entrada, intermediación y salida, fue posible identificar las principales investigaciones por cada una de las partes del Árbol de la Ciencia de la Industria 4.0 y la automatización avanzada. La Tabla 5 esquematiza, con base en estos indicadores, las investigaciones mejor posicionadas.

Tabla 5:

Principales publicaciones del Árbol de la ciencia

<i>Raíz</i>	<i>Tronco</i>	<i>Hojas</i>
<i>Industry 4.0 (Lasi et al., 2014)</i>	Tackling Faults in the Industry 4.0 Era—A Survey of Machine-Learning Solutions and Key Aspects (Angelopoulos et al., 2019)	Lean 4.0: a systematic literature review on the interaction between lean production and industry 4.0 pillars (Kassem et al., 2024)
<i>A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems (Lee et al., 2015)</i>	Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions (Jamwal et al., 2021)	Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review (Zafar et al., 2024)
<i>Industry 4.0: state of the art and future trends (Xu et al., 2018)</i>	Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges (Chen et al., 2018)	Proactive human–robot collaboration: Mutual-cognitive, predictable, and self-organising perspectives (Li et al., 2023)
<i>Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review (Zhong et al., 2017)</i>	State of Industry 5.0—Analysis and Identification of Current Research Trends (Akundi et al., 2022)	A Framework for Sustainable Manufacturing: Integrating Industry 4.0 Technologies with Industry 5.0 Values (Martín-Gómez et al., 2024)
<i>Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal (Liao et al., 2017)</i>	Perspectives on the future of manufacturing within the Industry 4.0 era (Hughes et al., 2022)	Implementing Industry 4.0 technologies: Future roles in purchasing and supply management (Delke et al., 2023)

Fuente: elaboración propia tras el procesamiento de ToS

Perspectivas de investigación

Los clústeres o perspectivas de investigación fueron identificadas y analizadas a partir de la utilización de Gephi, como el software de acceso abierto que permite este proceso. La utilización de esta herramienta para la visualización de las redes de cocitación, permitió el reconocimiento de 17 grandes comunidades, clústeres o perspectivas investigativas. No obstante, para esta investigación fueron de interés las 3 primeras, dado que juntas poseen el porcentaje más importante de la red (38,37%).

La Fig. 6, ilustra el procesamiento de la red de cocitaciones y la generación de los tres principales clústeres. Específicamente, esta etapa comenzó con el archivo .graphml (red inicial), el cual fue cargado y procesado, tal como se indicó en la sección de metodología, en el software Gephi. En este, fue posible identificar cada uno de los 17 clústeres, al igual que su respectivo porcentaje dentro de la red, criterio utilizado para la identificación de las tres perspectivas más importantes. A continuación, la ilustración del procesamiento.

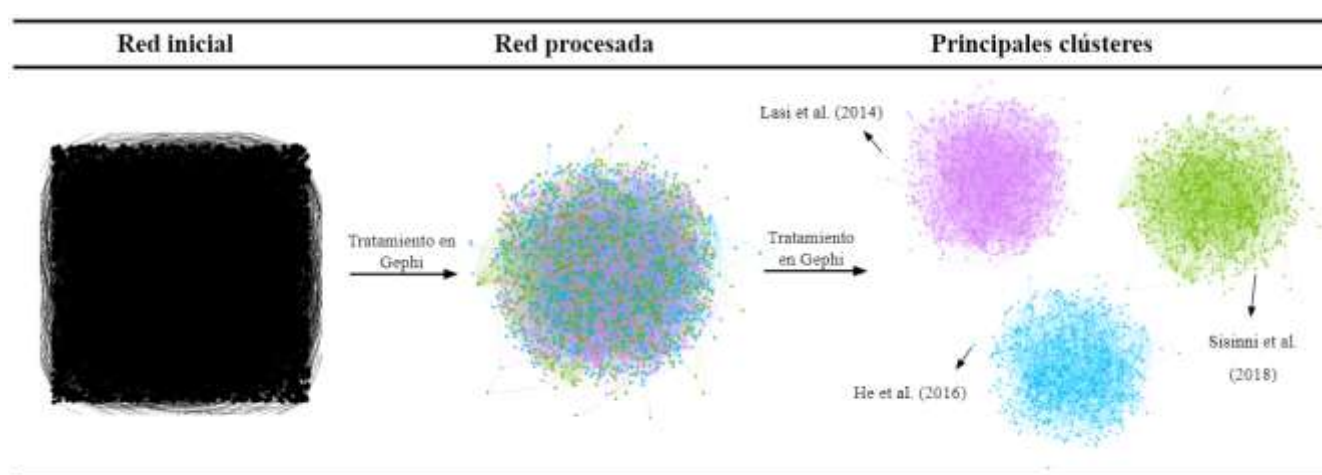


Fig. 6. Procesamiento de la red de cocitaciones y los clústeres
Fuente: elaboración propia tras el procesamiento en Gephi.

Perspectiva 1: Aportes de la Industria 4.0

La primera perspectiva fue denominada como Aportes de la Industria 4.0, principalmente, porque casi la totalidad de los documentos que conforman este clúster de investigación se concentran en la comprensión de este fenómeno industrial, sus ventajas, aplicaciones y avances en la actualidad. Este clúster posee el porcentaje más alto de toda la red de cocitaciones (13.53%) y gráficamente se identifica con el color púrpura.

Si bien el concepto de Industria 4.0 viene siendo utilizado desde hace varios años, de acuerdo con el estudio realizado por Beier et al. (2020), su definición aún es vaga y poca homogénea. Lo anterior ha provocado una dispersión investigativa, pues la heterogeneidad conceptual y la superposición de características ha amplificado drásticamente el campo de estudio de esta área de conocimiento (Davies et al., 2017). Beier et al. (2020) y Hofmann & Rüsçh (2017) señalan que la vaguedad conceptual también ha incidido en que, hoy en día, los objetivos de la Industria 4.0 siguen caminos tradicionales, más no una disrupción en la producción industrial.

Por su parte, estudios como los de Buer et al. (2018), Piccarozzi et al. (2018), Xu et al. (2018), Madsen (2019), Jamwal et al. (2021), Martínez-Olvera (2022), Sayem et al. (2022), Schumacher et al. (2023), Tortorella et al. (2023) y Kassem et al. (2024), incluidos dentro de esta perspectiva, se enfocan en comprender las diferentes aplicaciones y aportes que la Industria 4.0 realiza a las empresas. Específicamente,

estas investigaciones permiten entrever, mediante revisiones sistemáticas de literatura o estudios de caso que se adelantaron, que la manufactura aditiva, los servicios digitales, la robótica industrial y la fabricación inteligente son los rasgos más notorios de la incursión empresarial en el mundo de la Industria 4.0, los cuales están aportando significativamente a la reducción de costos, el desarrollo sostenible y la transformación tecnológica de las organizaciones, independientemente del sector en el que estas se encuentren.

El estudio general de los documentos de esta perspectiva permitió establecer, entre otros aspectos, que las diferentes tecnologías de la Industria 4.0, vienen siendo incorporadas en las diferentes actividades y ejercicios empresariales como resultado de estrategias y planificaciones que giran en torno a la optimización de los recursos, el aumento de la competitividad y el posicionamiento de la organización en un contexto volátil y cambiante.

Para finalizar este clúster, en la Fig. 7 se ilustra la red de cocitaciones y la nube de palabras de esta primera perspectiva:

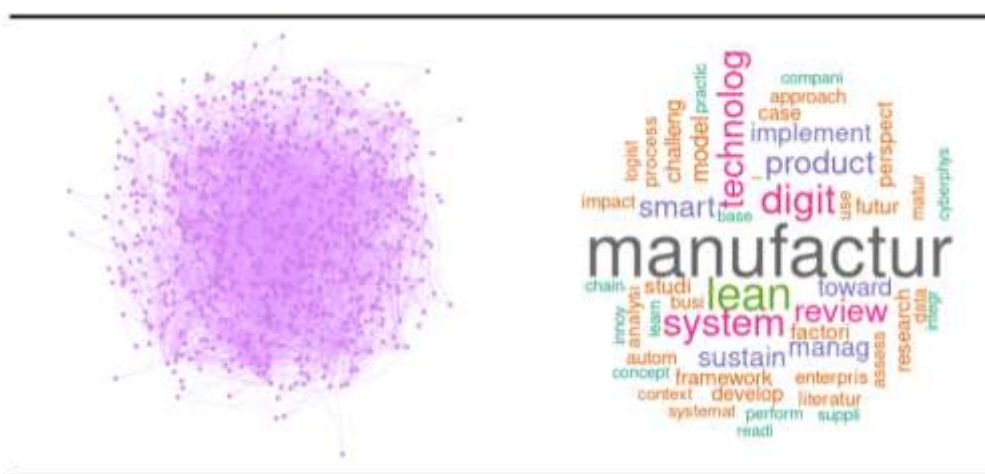


Fig. 7. Red de cocitaciones y nube de palabras de la Perspectiva 1
Fuente: elaboración propia tras el procesamiento en Gephi y RStudio Cloud.

Perspectiva 2: Problemas y desafíos de seguridad

La segunda perspectiva, representada con el color verde, acapara un 13.08% de la totalidad de la red y fue denominada como Problemas y desafíos de seguridad. En este caso, un gran número de las investigaciones proporcionan una visión general de los principales problemas y desafíos que están inmersos en el tránsito y la implementación de la Industria 4.0, en especial, los relacionados con el manejo y la seguridad de la información.

Si bien la innovación digital, como uno de los segmentos que hace parte y que puede ayudar a las empresas a cumplir de manera exitosa con los estándares de la Industria 4.0, está generando efectos positivos como resultado de la adopción y la actualización tecnológica (Gupta & Jauhar, 2023), también está provocando, constantemente, nuevos desafíos en el entorno industrial. Según el estudio adelantado por Jayalaxmi et al. (2021), lo anterior es resultado de la baja capacidad de respuesta y la vulnerabilidad de los componentes y el software de las nuevas tecnologías que vienen siendo implementadas.

Para Pal & Jadidi (2021) si bien se ha avanzado en el desarrollo de herramientas, tecnologías y metodologías que están ayudando a la optimización de procesos, la reducción de costos y la toma de decisiones en las empresas que transitan en la

2017), mejorar la escalabilidad y aplicabilidad de los métodos del aprendizaje automático (Angelopoulos et al., 2019), al igual que buscar la democratización de las tecnologías, aplicaciones industriales y las tendencias del aprendizaje automático en las PYMES (Mazzei & Ramjattan, 2022).

Para finalizar, la Fig. 9 ilustra la red de cocitaciones y la nube de palabras de esta tercera perspectiva:

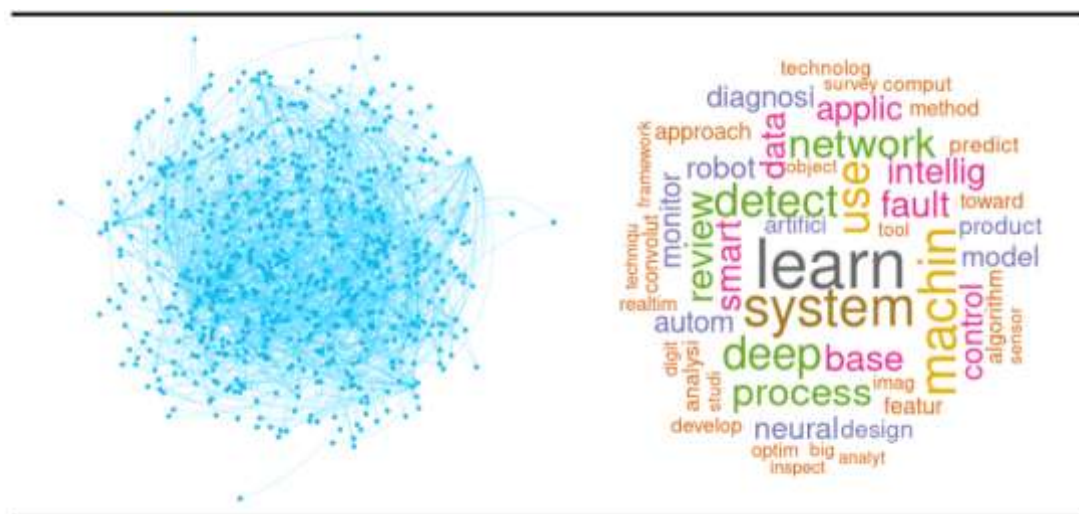


Fig. 9. Red de cocitaciones y nube de palabras de la Perspectiva 3
Fuente: elaboración propia tras el procesamiento en Gephi y RStudio Cloud.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el mapeo científico posibilitan identificar que la producción académica en el campo de la Industria 4.0 y la automatización avanzada viene creciendo de manera importante en los últimos años, especialmente desde el 2019. De igual forma, fue posible identificar una alta concentración geográfica de la producción científica, especialmente en países desarrollados y mayoritariamente de origen europeo -Italia, Reino Unido, España y Alemania- y asiático -China e India-, mientras que la producción académica en regiones como Latinoamérica y África es casi nula. Esta distribución evidencia una brecha de producción, visibilidad y acceso al conocimiento, como también, la oportunidad de adelantar investigación que se centren en analizar las barreras de carácter estructural, institucional y tecnológicas que generan una baja participación investigativa de estas regiones.

Esta investigación también revela que los primeros estudios en este campo se concentraron, principalmente, en analizar los retos que conlleva la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en las organizaciones, como en identificar los beneficios que podrían otorgar en términos de rendimiento industrial y competitividad (Vaidya et al., 2018; Frank et al., 2019; Lu, 2017). Los artículos clasificados como estructurales, por su parte, coinciden en determinar qué que los avances tecnológicos inciden en el aumento de la productividad y la eficiencia, como en el alcance y aportes realizados, desde el campo organizacional, a los ODS (Beier et al., 2020; Ramirez-Ibarra, 2023).

Mientras que las tendencias actuales giran alrededor de la implementación sostenible y responsable de tecnologías, la reducción de efectos negativos y en el desarrollo de sistemas de producción sostenibles (Dombrowski et al., 2021; Schumacher et al., 2023; Gupta & Jauhar, 2023). Lo anterior está estrechamente relacionado y guarda correspondencia con lo identificado en las tres perspectivas de investigación.

Por otra parte, el análisis de la información también permitió identificar líneas y temas emergentes como los desafíos de ciberseguridad, la sostenibilidad de procesos automatizados y la integración entre humano y máquina, conocida como Industria 5.0. Estas tendencias son el reflejo de los intereses actuales de la comunidad académica, que se constituyen, a su vez, como necesidades y oportunidades de investigación que posibilitarían, desde enfoques interdisciplinarios, resolver problemas en los diferentes sectores económicos, así como en regiones que apenas vienen explorando este campo de conocimiento.

Ahora bien, aunque en el desarrollo de esta investigación no se identificaron estudios en los que se realizara una revisión sistemática que integrara herramientas como Bibliometrix, ToS y Gephi sobre registros bibliográficos de WoS y Scopus, a la vez que se seguía se utilizaban elementos de la declaración PRISMA 2020 como guía de rigurosidad académica, si fue posible encontrar otro tipo de revisiones como las de Zhong et al. (2017), Beier et al. (2020), Jamwal et al. (2021), Gupta & Jauhar (2023) y Kassem et al. (2024). No obstante, estas investigaciones no incorporaron análisis de redes de cocitación ni emplearon metodologías como la del Árbol de la Ciencia, lo que limita su capacidad para identificar perspectivas de investigación. En tal sentido, este artículo se constituye como un aporte original al consolidar un enfoque metodológico replicable y robusto en el campo de la Industria 4.0 y la automatización avanzada.

En definitiva, lo presentado en el mapeo, el Árbol de la ciencia y las perspectivas de investigación, da cuenta del interés y esfuerzo académico, investigativo y empresarial de avanzar en el desarrollo y aplicación de las tecnologías de la Industria 4.0 en los ejercicios y prácticas organizacionales. Se resalta, por otra parte, la automatización de procesos, la integración de procesos físicos con sistemas computacionales, la fabricación inteligente y la toma de decisiones descentralizadas.

CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática de literatura permitió, a partir de la integración de herramientas como RStudio Cloud, Bibliometrix, ToS y Gephi, identificar la evolución y estructura del campo de la Industria 4.0 y la automatización avanzada. En primera instancia, se logró identificar la consolidación de un área investigativa que pasó de 16 publicaciones en el 2016, a 649 publicaciones en el 2023, con una marcada concentración geográfica de países, mayoritariamente, de origen europeo y asiático, a pesar de que los cuatro autores con mayor producción científica son originarios de la India.

Por otra parte, a partir del procesamiento de los 2442 registros bibliográficos se identificaron tres perspectivas de investigación: (i) aportes de la Industria 4.0, enfocada en los beneficios organizacionales de tecnologías como la robótica industrial, la fabricación inteligente y los sistemas ciberfísicos; (ii) problemas y desafíos de seguridad, en la que se hace hincapié en la necesidad de la protección de datos y las vulnerabilidades de las infraestructuras digitales; y (iii) automatización industrial y las tecnologías 4.0, en la que se posicionan investigaciones orientadas al desarrollo de sistemas inteligentes, la descentralización de decisiones y la producción autónoma. Estos clústeres evidencian la consolidación de un campo fuertemente tecnológico, pero también la emergencia de preocupaciones sociotécnicas, éticas y organizacionales.

Ahora bien, entre las principales limitaciones de este estudio se encuentra la dependencia exclusiva de las bases de datos de WoS y Scopus, lo que pudo haber generado la exclusión de literatura relevante que proveniente de otras fuentes, tanto

indexadas como no indexadas. Del mismo modo, la exclusión de artículos redactados en idiomas diferentes al español e inglés pudo haber limitado el acceso a investigaciones que habrían enriquecido el análisis.

Finalmente, como líneas de investigación futura, se propone profundizar en las temáticas emergentes identificadas en las distintas perspectivas que fueron analizadas. Asimismo, se considera pertinente explorar temáticas que han sido poco abordadas, como la aplicación de la Industria 4.0 y la automatización avanzada en sectores no manufactureros, el impacto de las tecnologías 4.0 en pequeñas y medianas empresas, así como el estudio de las tensiones entre la automatización y el empleo desde un enfoque ético y organizacional.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Moyano-Londoño: Conceptualización, Metodología, Validación, Análisis formal, Supervisión, Curación de datos, Visualización. **Cardona-Granada:** Redacción – Borrador original, Redacción – Revisión y edición.

FINANCIACIÓN

Este artículo se deriva del proyecto de investigación académica del mismo nombre desarrollado por los autores. No recibió financiación externa de instituciones públicas, privadas o de cooperación internacional. Todos los gastos relacionados con el desarrollo del estudio fueron sufragados por los propios autores.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que puedan haber influido en la investigación, la autoría o la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

- Adrita, M. M., Brem, A., O’Sullivan, D., Allen, E., & Bruton, K. (2021). Methodology for data-informed process improvement to enable automated manufacturing in current manual processes. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 11(9), 3889. <https://doi.org/10.3390/app11093889>
- Akundi, A., Euresti, D., Luna, S., Ankobiah, W., Lopes, A., & Edinbarough, I. (2022). State of industry 5.0—analysis and identification of current research trends. *Applied System Innovation*, 5(1), 27. <https://doi.org/10.3390/asi5010027>
- Alzate, P., Moyano-Londoño, G. A., Carrasco, J. M. S., Isaza, G. A., Toro, E. M., & Jaramillo-Garzón, J. A. (2024). Scientific mapping and research perspectives of the vehicle routing problem: An approach from sustainability strategies. *Sustainable Futures (Amsterdam, Netherlands)*, 8(100390), 100390. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100390>
- Angelopoulos, A., Michailidis, E. T., Nomikos, N., Trakadas, P., Hatziefremidis, A., Voliotis, S., & Zahariadis, T. (2019). Tackling faults in the Industry 4.0 era-A survey of machine-learning solutions and key aspects. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(1), 109. <https://doi.org/10.3390/s20010109>
- 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>

- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259(120856), 120856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>
- Belman-Lopez, C. E., Jiménez-García, J. A., & Hernández-González, S. (2020). Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de Industria 4.0. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial RIAI*, 17(4), 432. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.12579>
- Buer, S.-V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. S. (2018). The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2924–2940. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2018). Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 6, 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/access.2017.2783682>
- Davies, R., Coole, T., & Smith, A. (2017). Review of Socio-technical considerations to ensure successful implementation of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 1288–1295. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.256>
- Delke, V., Schiele, H., Buchholz, W., & Kelly, S. (2023). Implementing Industry 4.0 technologies: Future roles in purchasing and supply management. *Technological Forecasting and Social Change*, 196(122847), 122847. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122847>
- Dombrowski, U., Deuse, J., Ortmeier, C., Henningsen, N., Wullbrandt, J., & Nöhring, F. (2021). Auswahlssystematik für Methoden und Werkzeuge Ganzheitlicher Produktionssysteme 4.0: Ergebnisse eines Forschungsprojekts. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(6), 398–402. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0093>
- Elnadi, M., & Abdallah, Y. O. (2024). Industry 4.0: critical investigations and synthesis of key findings. *Management Review Quarterly*, 74(2), 711–744. <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00314-4>
- Elsisi, M., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2021). Effective nonlinear model predictive control scheme tuned by improved NN for robotic manipulators. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 9, 64278–64290. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3075581>
- 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>
- Gonzalez-Jimenez, D., Del-Olmo, J., Poza, J., Garramiola, F., & Madina, P. (2021). Data-driven fault diagnosis for electric drives: A review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(12), 4024. <https://doi.org/10.3390/s21124024>
- Gupta, M., & Jauhar, S. K. (2023). Digital innovation: An essence for Industry 4.0.

Thunderbird International Business Review. <https://doi.org/10.1002/tie.22337>

- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2), e1230. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>
- Hassoun, A., Marvin, H. J. P., Bouzembrak, Y., Barba, F. J., Castagnini, J. M., Pallarés, N., Rabail, R., Aadil, R. M., Bangar, S. P., Bhat, R., Cropotova, J., Maqsood, S., & Regenstein, J. M. (2023). Digital transformation in the agri-food industry: recent applications and the role of the COVID-19 pandemic. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1217813>
- Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Hughes, L., Dwivedi, Y. K., Rana, N. P., Williams, M. D., & Raghavan, V. (2022). Perspectives on the future of manufacturing within the Industry 4.0 era. *Production Planning & Control*, 33(2-3), 138–158. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810762>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 11(12), 5725. <https://doi.org/10.3390/app11125725>
- Jayalaxmi, P., Saha, R., Kumar, G., Kumar, N., & Kim, T.-H. (2021). A taxonomy of security issues in industrial internet-of-things: Scoping review for existing solutions, future implications, and research challenges. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 9, 25344–25359. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3057766>
- Kassem, B., Callupe, M., Rossi, M., Rossini, M., & Portioli-Staudacher, A. (2024). Lean 4.0: a systematic literature review on the interaction between lean production and industry 4.0 pillars. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(4), 821–847. <https://doi.org/10.1108/jmtm-04-2022-0144>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J. Y., Kim, D., Choi, B., & Jiménez, A. (2023). Early evidence on how Industry 4.0 reshapes MNEs' global value chains: The role of value creation versus value capturing by headquarters and foreign subsidiaries. *Journal of International Business Studies*, 54(4), 599–630. <https://doi.org/10.1057/s41267-022-00596-6>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>

- Li, S., Zheng, P., Liu, S., Wang, Z., Wang, X. V., Zheng, L., & Wang, L. (2023). Proactive human–robot collaboration: Mutual-cognitive, predictable, and self-organising perspectives. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 81(102510), 102510. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102510>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Lu, Y., Morris, K. C., & Frechette, S. (2016). *Current standards landscape for smart manufacturing systems*. National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/nist.ir.8107>
- Madsen, D. Ø. (2019). The emergence and rise of industry 4.0 viewed through the lens of management fashion theory. *Administrative Sciences*, 9(3), 71. <https://doi.org/10.3390/admsci9030071>
- Marinagi, C., Reklitis, P., Trivellas, P., & Sakas, D. (2023). The impact of Industry 4.0 technologies on Key Performance Indicators for a Resilient Supply Chain 4.0. *Sustainability*, 15(6), 5185. <https://doi.org/10.3390/su15065185>
- Martínez-Olvera, C. (2022). Towards the development of a digital twin for a sustainable mass customization 4.0 environment: A literature review of relevant concepts. *Automation*, 3(1), 197–222. <https://doi.org/10.3390/automation3010010>
- Martín-Gómez, A. M., Agote-Garrido, A., & Lama-Ruiz, J. R. (2024). A framework for sustainable manufacturing: Integrating Industry 4.0 technologies with Industry 5.0 values. *Sustainability*, 16(4), 1364. <https://doi.org/10.3390/su16041364>
- Mazzei, D., & Ramjattan, R. (2022). Machine learning for industry 4.0: A systematic review using deep learning-based topic modelling. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(22), 8641. <https://doi.org/10.3390/s22228641>
- Mim, I. Z., Rayhan, M. G. S., & Syduzzaman, M. (2024). Prospects and current scenario of industry 4.0 in Bangladeshi textile and apparel industry. *Heliyon*, 10(11), e32044. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32044>
- Moyano-Londoño, G. A. (2022). Emprendimiento en zonas de post-conflicto: una revisión bibliográfica. *Económicas CUC*, 44(1), 103–120. <https://doi.org/10.17981/econcuc.44.1.2023.org.4>
- Moyano-Londoño, G. A., & Marín-Cardona, P. F. (2024). La perdurabilidad empresarial de los emprendimientos sociales: revisión sistemática y perspectivas de investigación. *Tendencias*, 25(1), 269–295. <https://doi.org/10.22267/rtend.242501.249>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>

- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- Pal, S., & Jadidi, Z. (2021). Analysis of security issues and countermeasures for the industrial Internet of Things. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 11(20), 9393. <https://doi.org/10.3390/app11209393>
- Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. *Sustainability*, 10(10), 3821. <https://doi.org/10.3390/su10103821>
- Qureshi, K. M., Mewada, B. G., Kaur, S., Khan, A., Al-Qahtani, M. M., & Qureshi, M. R. N. M. (2024). Investigating industry 4.0 technologies in logistics 4.0 usage towards sustainable manufacturing supply chain. *Heliyon*, 10(10), e30661. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30661>
- Ramirez-Ibarra, P. I. (2023). Society 5.0, beyond Industry 4.0: A documentary investigation with a national perspective. *Entretextos*, 15(39), 1–20. <https://doi.org/10.59057/iberoleon.20075316.202339674>
- Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. (2017). Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6), 1137–1149. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031>
- Robledo, S., Osorio, G., & Lopez, C. (2014). Centro de Investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Vinculos*, 11(2), 6–16. <https://doi.org/10.14483/2322939X.9664>
- Rossi, A. H. G., Marcondes, G. B., Pontes, J., Leitão, P., Treinta, F. T., De Resende, L. M. M., Mosconi, E., & Yoshino, R. T. (2022). Lean tools in the context of Industry 4.0: Literature review, implementation and trends. *Sustainability*, 14(19), 12295. <https://doi.org/10.3390/su141912295>
- Rossit, D. A., Tohmé, F., & Frutos, M. (2019). Industry 4.0: Smart scheduling. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3802–3813. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504248>
- Sadeghi, A.-R., Wachsmann, C., & Waidner, M. (2015, June 7). Security and privacy challenges in industrial internet of things. *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*. DAC '15: The 52nd Annual Design Automation Conference 2015, San Francisco California. <https://doi.org/10.1145/2744769.2747942>
- Sayem, A., Biswas, P. K., Khan, M. M. A., Romoli, L., & Dalle Mura, M. (2022). Critical barriers to Industry 4.0 adoption in manufacturing organizations and their mitigation strategies. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(6), 136. <https://doi.org/10.3390/jmmp6060136>
- Schumacher, S., Hall, R., Bildstein, A., & Bauernhansl, T. (2023). Lean Production Systems 4.0: systematic literature review and field study on the digital transformation of lean methods and tools. *International Journal of Production Research*, 61(24), 8751–8773. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2159562>

- Tortorella, G. L., Saurin, T. A., Gaiardelli, P., & Jurburg, D. (2023). Relationships between competences and lean automation practices: an exploratory study. *Production Planning & Control*, 34(8), 689–704. <https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1953178>
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Velásquez, J. D. (2014). Una guía corta para escribir Revisiones Sistemáticas de Literatura Parte 2. *Dyna*, 81(188), 9–10. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n188.47872>
- Xu, L. D., Xu, E. L., & 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>
- Zafar, M. H., Langås, E. F., & Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89(102769), 102769. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102769>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review. *Engineering (Beijing, China)*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.05.015>

BIODATA

Gabriel Antonio Moyano Londoño es Administrador de Empresas, Magíster en Administración y candidato a Doctor en Administración. En la actualidad, se desempeña como docente e investigador en la Universidad Católica Luis Amigó, institución en la que coordina el Semillero de Investigación Competitividad e Innovación. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0796-119X>

Valentina Cardona Granada es estudiante del programa de Negocios Internacionales de la Universidad Católica Luis Amigó, institución en la que hace parte del Semillero de Investigación Competitividad e Innovación. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1915-9247>