

ARTÍCULO DE REVISIÓN**Integración de la automatización en la construcción 4.0****Integration of automation in construction 4.0**Nelson Huangal¹ * y Roberto Cachay¹ **RESUMEN**

La integración de la automatización en la construcción 4.0, presenta un análisis detallado de la producción científica sobre la automatización en la construcción 4.0, destacando tendencias y patrones de investigación global. El estudio, comprendido del año 2020, a octubre del año 2024, identifica la tasa de crecimiento anual en publicaciones del 60.69%, reflejando el creciente interés en el tema. A través de indicadores bibliométricos, se reconocen autores influyentes, como Menges A., y revistas influyentes como Automation in Construction y Sustainability (Switzerland). También, países como EE.UU., China y Alemania, lideran la producción científica sobre la automatización en la construcción. La investigación revela que, disciplinas como la robótica y la automatización, contribuyen un enfoque multidimensional. El desarrollo semántico destaca la relevancia de términos como “construction 4.0” y “robotics”, mientras que los temas emergentes incluyen la impresión 3D y la fabricación robótica.

Palabras clave: Construcción 4.0, automatización, bibliometría, robótica.

ABSTRACT

Integrating Automation in Construction 4.0 presents a detailed analysis of the scientific production on automation in Construction 4.0, highlighting global research trends and patterns. The study, spanning the year 2020, to October 2024, identifies the annual growth rate in publications of 60.69%, reflecting the growing interest in the topic. Through bibliometric indicators, influential authors, such as Menges A., and influential journals such as Automation in Construction and Sustainability (Switzerland) are recognized. Also, countries such as the USA, China and Germany lead the scientific production on automation in construction. The research reveals that disciplines such as robotics and automation contribute a multidimensional approach. Semantic development highlights the relevance of terms such as “construction 4.0” and “robotics”, while emerging themes include 3D printing and robotic manufacturing.

Keywords: Construction 4.0, automation, bibliometrics, robotics.

* Autor para correspondencia

¹ Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Perú. Email: nhuangal@unprg.edu.pe, rcachays@unprg.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La integración de la automatización en la construcción 4.0, refleja el creciente interés en la investigación científica, en el periodo comprendido entre el año 2020 y octubre del año 2024, donde el empleo de tecnologías avanzadas, permite optimizar procesos, planificando y controlando los recursos, tanto en la etapa de diseño como en la ejecución, en distintos proyectos de construcción. A nivel global, se manifiesta una profunda transformación de la industria de la construcción, debido al empleo de la automatización, robótica, e impresión 3D, siendo componentes esenciales para lograr avances en la sostenibilidad y eficiencia operativa en el sector de la construcción (Bruun et al., 2021; Prieto et al., 2024). En este contexto, países como Estados Unidos, China y Alemania, lideran la producción científica, contribuyendo a la difusión de estas tecnologías, vinculadas con la automatización y la construcción. La tasa de incremento anual del 60.69%, expresa el avance de la implementación de tecnologías, el Building Information Modeling (BIM) y la inteligencia artificial en la construcción, ante la demanda de procesos constructivos más seguros y sostenibles (Saini et al., 2022; Pereira et al., 2022). A medida que estas tecnologías emergentes, como la fabricación robótica y el diseño modular, se consolidan en la práctica constructiva, el interés en el desarrollo de métodos automatizados y sostenibles, es más relevante (Vidovszky y Szögi, 2024; Park et al., 2024).

El problema de investigación refiere a la identificación de patrones y tendencias dentro de la producción científica, que abordan la automatización en la construcción 4.0 y la tecnología de la información aplicada a la construcción sostenible. En el presente estudio, la pregunta de investigación planteada es la siguiente: ¿Cuáles son las tendencias de la producción científica sobre la integración de la automatización en la construcción 4.0?, según un análisis bibliométrico de la literatura existente? Esta pregunta general, incluye otras interrogantes específicas como: a) ¿Cuántos estudios se han publicado en el periodo comprendido entre el año 2020 y octubre del 2024?, b) ¿Quiénes son los autores más destacados en el área?, c) ¿Cuáles son las publicaciones más relevantes vinculadas con tema?, d) ¿En qué países se han llevado a cabo las investigaciones? e) ¿Desde qué áreas del conocimiento se han realizado las investigaciones?

La literatura revisada muestra varios temas emergentes y consolidados, como el papel de la robótica y el BIM, en la modernización del sector constructivo. La colaboración interdisciplinaria, reflejada en un 25% de coautorías internacionales, enfatiza la necesidad de enfoques multidimensionales para integrar tecnologías avanzadas en la construcción (Aghimien et al., 2024; Feldmann, 2022). Además, autores como Menges y Leder (2022), destacan que la robótica y la fabricación digital ofrecen beneficios sustanciales en términos de productividad y reducción de residuos en proyectos de infraestructura (Khosravani y Haghighi, 2022; Liu et al., 2024). Sin embargo, persisten desafíos, en torno a la adopción

de estas tecnologías en países en desarrollo, donde los altos costos de implementación limitan su aplicación generalizada (Yankah et al., 2024). Este estudio es justificable debido a la escasa sistematización de datos sobre las tendencias y patrones de la producción científica en la automatización de la construcción. Un análisis bibliométrico exhaustivo permitirá no solo detallar las áreas de avance en esta tecnología, sino también reconocer temas potenciales para futuras investigaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó el análisis bibliométrico para analizar la evolución, el nivel de avance y la rugosidad científica (Cuevas Molano et al., 2019), sobre el conocimiento de la integración de la automatización en la construcción 4.0; para lo cual, se plantea los siguientes pasos sistemáticos: formulación de preguntas, identificación de bases de datos, elaboración de una ecuación de búsqueda y análisis de metadatos.

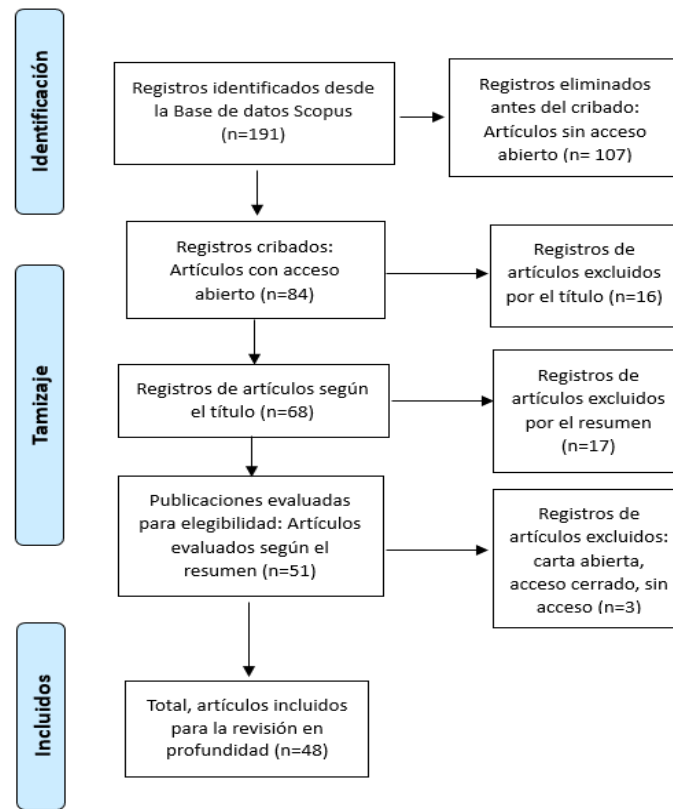
El enfoque de la presente investigación es cuantitativo, a nivel exploratorio y descriptivo; el diseño es no experimental, de tipo longitudinal. Se elaboró una cadena de búsqueda con términos clave: TITLE ("Automatización" OR "Automation" OR "Robotics") AND TITLE ("construcción" OR "Construction") AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (OA, "all")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE, "final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")). Cabe resaltar que, esta estrategia de investigación se restringió, desde el año 2020, hasta octubre del año 2024. Se empleó el enfoque multidisciplinario de la base de datos Scopus, identificando 191 artículos. Los datos de Scopus fueron exportados en formato CSV, luego fueron convertidos a Excel para su tratamiento. Se estableció, como se indica en la Tabla 1, los criterios para la inclusión y exclusión de las publicaciones de los artículos.

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión de la revisión

Criterios de exclusión	Criterios de inclusión
Permite acceso directo a la publicación completa del artículo para su revisión	No permite acceso directo a la publicación completa del artículo para su revisión
El contenido del artículo está relacionado con la automatización, la robótica en el sector de la construcción	El contenido del artículo no está relacionado con la automatización, la robótica en el sector de la construcción
El contenido del artículo está relacionado con la construcción 4.0	El contenido del artículo no está relacionado con la construcción 4.0

A partir de estos criterios, se elaboró un registro de comprobación, para la identificación, el tamizado, la elegibilidad y la inclusión de los artículos seleccionados, para su revisión en profundidad, según el modelo PRISMA (Barrios et al., 2021), según se detalla en el diagrama de flujo de fases, representado en la Figura 1.

Figura 1*Diagrama de flujo de fases según modelo PRISMA*

En la fase de identificación, de los 191 artículos, descargados del gestor de referencias bibliográficas Zotero, se eliminó 107 publicaciones sin acceso abierto, resultando 84 artículos, revisados en la fase de tamizaje, excluyéndose por el título 16 artículos, quedando 68 artículos, de los cuales se procedió a excluir, por el contenido del resumen, 17 artículos, obteniéndose 51 artículos, siendo evaluados para elegibilidad. Posteriormente, se excluyeron 3 artículos, teniéndose la publicación de una carta abierta, un artículo con acceso cerrado, y otro sin acceso; resultando 48 artículos incluidos, para su revisión en profundidad. Se elaboró las representaciones visuales de mapas científicos en forma de redes semánticas, empleando programas especializados como Bibliometrix y VOSviewer.

Bibliometrix es una herramienta creada en R, avalada por el Equipo Core de R y la Fundación R para Computación Estadística (Bibliometrix, 2023). Requiere la instalación de R y Rstudio.

VOSviewer, creado por la Universidad de Leiden, es un programa de código abierto destinado a la creación y visualización de redes bibliométricas. Proporciona capacidad de minería de texto para establecer redes de co-ocurrencia de términos clave (VOSviewer, 2023).

RESULTADOS

De acuerdo a los valores de los principales indicadores bibliométricos de la colección de metadatos, detallado en la Tabla 2, para el intervalo de tiempo comprendido desde el año 2020 y octubre del 2024, se observa que la tasa de 60.69%, correspondiente al crecimiento anual de los documentos, refleja el creciente interés de temas relacionados con la integración de la automatización en la construcción 4.0; la antigüedad media de los documentos, de 1.31 años, respalda el referido crecimiento. El promedio de 12 citas por documento, señala que estas investigaciones tienen impacto en otros estudios. Además, la cantidad de 3112 referencias, fortalece el rigor científico de las publicaciones. El promedio de 4.52 coautores por documento y un 25% de coautorías internacionales, manifiesta que la automatización en la construcción 4.0, es un tema que requiere la colaboración entre los autores de varios países; esto es corroborado por la publicación de 2 documentos de un solo autor. Con 34 fuentes, 368 palabras clave plus y 186 palabras clave del autor, revela la notable diversidad temática, posibilitando el estudio detallado en temas específicos y la búsqueda de nuevo conocimiento, dentro del campo de la automatización en la construcción 4.0, que todavía está en crecimiento.

Tabla 2

Principales indicadores bibliométricos de la colección de metadatos

Descripción	Indicador
Intervalo de tiempo	2020: 2024 (octubre)
Fuentes	34
Documentos	48
Tasa de crecimiento anual de los documentos%	60.69
Antigüedad media de los documentos	1.31
Promedio de citas por documento	12
Referencias	3112
Palabras clave Plus (ID)	368
Palabras clave del autor (DE)	186
Autores	198
Autores de documentos de un solo autor	2
Documentos de un solo autor	2
Coautores por documento	4.52
Coautorías internacionales %	25
Artículos	48

Nota. Indicadores obtenidos con Bibliometrix, con base en los metadatos de la colección identificada en Scopus.

En la Tabla 3, se presenta los 10 principales autores, sobresaliendo Menges A, como el autor con más citas y más cantidad de publicaciones, vinculados con la automatización y el sector construcción.

Tabla 3*Principales autores*

Autor	Total de citas	Número de publicaciones
Menges A	104	5
Ashok P	8	2
García De Soto B	4	2
Giusti A	50	2
Marcher C	50	2
Matt Dt	50	2
Prieto Sa	4	2
Saini Gs	8	2
Van Oort E	8	2
Wagner Hj	95	2

Nota. Indicadores obtenidos con Bibliometrix, con base en los metadatos de la colección identificada en Scopus.

En la Tabla 4, se observa las principales revistas especializadas, que más contribuyeron con la difusión de resultados de investigaciones relacionados con la automatización en la construcción 4.0, destacando las revistas Automation In Construction y Sustainability (Switzerland).

Tabla 4*Principales revistas especializadas*

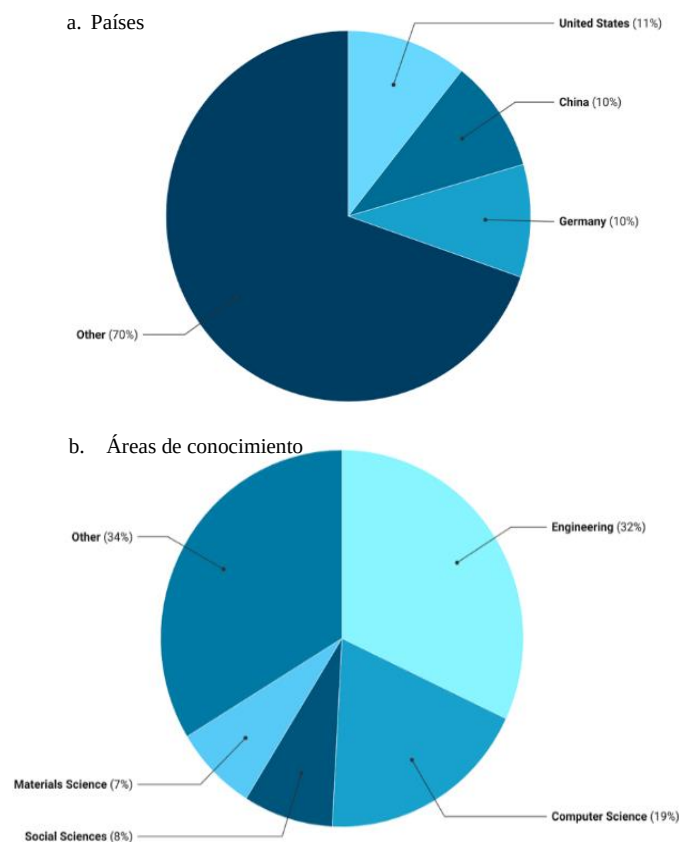
Revista	Frecuencia
Automation In Construction	6
Sustainability (Switzerland)	3
Advanced Engineering Informatics	2
Buildings	2
Computer-Aided Civil And Infrastructure Engineering	2
Developments In The Built Environment	2

Nota. Indicadores obtenidos con Bibliometrix, con base en los metadatos de la colección identificada en Scopus.

Entre los países que sobresalen en producción científica sobre la automatización en la construcción 4.0, Estados Unidos, lidera con 11%, continúan China y Alemania, ambos con 10%; este enfoque es abordado desde diversas disciplinas, resaltando la ingeniería, con 32% y ciencias de la computación, con 19%. Esta pluralidad de áreas involucradas evidencia la naturaleza multidimensional de la tecnología automatizada y los fundamentos de la construcción 4.0, como se puede observar en la Figura 2, paneles a y b.

Figura 2

Países y áreas del conocimiento asociado con la integración de la automatización en la construcción 4.0

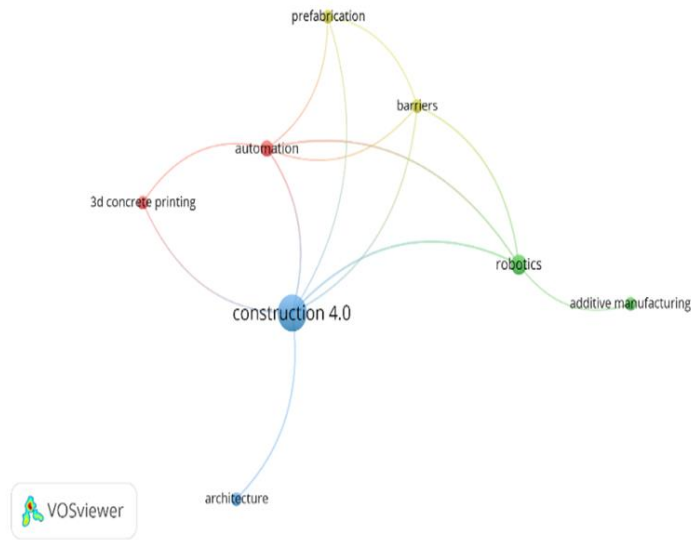


Nota. Representaciones obtenidas con Datawrapper, con base en los metadatos de la colección identificada en Scopus.

Respecto al desarrollo semántico, se presenta la red en la Figura 3, donde la ubicación central del nodo “construction 4.0”, demuestra que este concepto posee una gran relevancia en el presente estudio. Al nodo “construction 4.0”, se vinculan directamente los nodos “automation”, “robotics”, “3D concrete printing”, y “prefabrication”. Los colores específicos de los clústeres destacan áreas de enfoque particulares: el clúster azul se concentra en “construction 4.0” y “architecture”, sugiriendo la relación entre la tecnología en la construcción, vinculado con proyectos de diseño arquitectónicos. El clúster verde se asocia con términos como “robotics” y “additive manufacturing”, esto indica que la robótica permite potenciar la manufactura aditiva al autonomizar procesos en la industria de la construcción. El clúster rojo relaciona términos como “automation” y “3d concrete printing”, lo cual evidencia que la automatización promueve la impresión 3D de concreto permitiendo la construcción de estructuras complejas, de manera rápida y precisa. Estos clústeres y conexiones evidencian que la integración de la automatización en la construcción 4.0, es un tema multifacético, con investigaciones que abordan distintos aspectos, reflejando la complejidad y la diversidad de perspectivas en este campo de estudio.

Figura 3

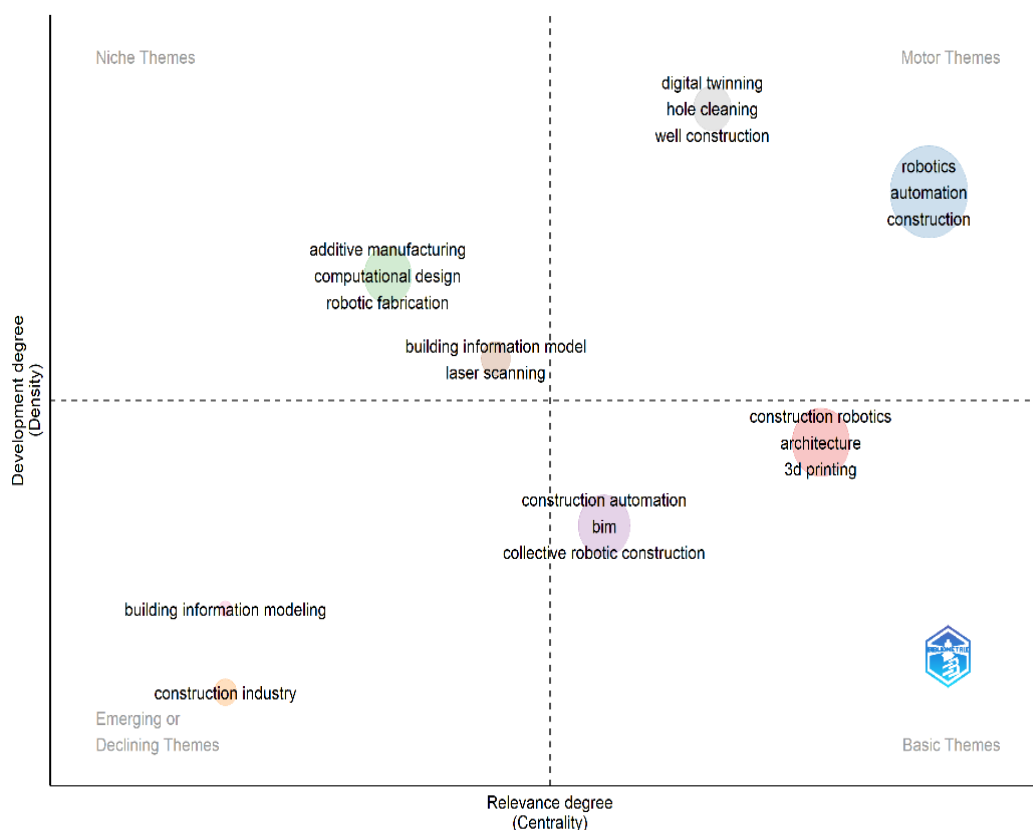
Mapa semántico sobre la integración de la automatización en la construcción 4.0



Nota. Representación obtenida con VosViewer, a partir de la colección de metadatos en formato CSV extraída de Scopus y con las correcciones realizadas mediante la técnica del tesoro.

El mapa temático de la Figura 4, clasifica los temas de investigación relacionados con la automatización en la construcción 4.0, en cuatro cuadrantes, establecidos por el grado de desarrollo (densidad) y el grado de relevancia (centralidad). En el cuadrante superior derecho, los temas motores, destacan conceptos clave como “robotics”, “automation” y “construction”, siendo relevantes para el impulsando de desarrollo de nuevas tecnologías en el sector de la construcción.

En el cuadrante superior izquierdo, los temas básicos, como “additive manufacturing”, “computational design” y “robotic manufacturing”, tienen un gran potencial para futuras aplicaciones. El cuadrante inferior derecho, se agrupa temas en consolidación como “construction robotics”, “architecture”, “3d printing”, “construction automation”, y “collective robotics construction”, su desarrollo está en proceso, pero con un futuro prometedor. Finalmente, el cuadrante inferior izquierdo, contiene temas emergentes o en declive, como “Building Information Modeling (BIM)” y “construction industry”, su relevancia puede aumentar si se ajustan a las nuevas demandas tecnológicas de la industria de la construcción.

Figura 4*Mapa temático estructural*

Nota. Representación obtenida con Bibliometrix, a partir de la colección de metadatos en formato CSV extraída de Scopus.

DISCUSIÓN

El análisis bibliométrico sobre la integración de la automatización en la construcción 4.0, muestra una clara tendencia en el incremento de la producción científica, en el periodo comprendido desde el año 2020 hasta octubre de 2024; esto es revelado por el crecimiento anual del 60.69% en publicaciones, de hecho, la incorporación, cada vez mayor, de tecnologías robóticas (Chai et al., 2022; Waqar et al., 2024), y el Building Information Modeling -BIM (Kavaliauskas et al., 2022; Khaleel y Naimi, 2022; Park y Lee, 2022; Spinner y Degani, 2024), combinado con la inteligencia artificial (Saini et al., 2022), el modelado digital (Rada et al., 2023), y la realidad virtual (Pereira et al., 2022; Wang et al., 2024), para mejorar los procesos constructivos (Follini et al., 2020; Wong et al., 2022; Abkar et al., 2023). En relación a los autores, Menges A. sobresale por contar con el mayor número de publicaciones y citaciones vinculadas a la automatización en la construcción 4.0. Las revistas “Automation in Construction” y “Sustainability (Switzerland)” han tenido el mayor impacto en la difusión de investigaciones. Países como Estados Unidos, China y Alemania lideran la producción científica, sobre automatización en la construcción 4.0, evidenciando una significativa colaboración internacional (25% de coautorías); la investigación realizada

por Agrawal et al. (2024), manifiestan la importancia de un enfoque global e interdisciplinario, indicando que la colaboración entre países, favorece la integración de innovaciones automatizadas, especialmente en actividades de riesgo en la construcción (Adami et al., 2021; Aghimien et al., 2024). No obstante, en países en desarrollo, los costos elevados dificultan la incorporación de estas tecnologías (Yankah et al., 2024). Las áreas de conocimientos como la ingeniería y ciencias de la computación, reafirma el enfoque multidisciplinario de la construcción 4.0; la implementación efectiva de la automatización, en la construcción modular, requiere la integración de diferentes áreas, incluyendo diseño y gestión de procesos (Feldmann, 2022); es obvio que, existe relación, entre la innovación en automatización de la construcción (Leder et al., 2022) y la sostenibilidad del sector (Follini et al., 2020; Abkar et al., 2023; Vidovszky y Szögi, 2024; Lai et al., 2024; Leder et al., 2024); del mismo modo, el empleo de herramientas digitales para la simulación de operaciones en la construcción (Saini et al., 2022).

El desarrollo semántico destaca que los conceptos clave como “construction 4.0”, “Automation” y “robotics” son fundamentales. Conviene señalar que el estudio efectuado por Hoffmann et al. (2020), enfatizan que la impresión 3D, como tecnología, posibilita la optimización de tiempos y costos, junto con el diseño modular, son clave en la evolución en la construcción automatizada (Hoffmann et al., 2020; Feldmann, 2022; Xu et al., 2022; Vidovszky y Szögi, 2024 ; Hiramatsu et al., 2024), como la fabricación robótica (Wagner et al., 2020; Zhang et al., 2021) y la cooperación entre robots para el ensamblaje de estructuras (Bruun et al., 2021; Li, 2021; Kajzr et al., 2021; Chai et al., 2022; Codarin, 2023, Liu et al., 2024; Leder y Menges, 2024), minimizando el volumen de desperdicio de material, particularmente en la ejecución de estructuras de concreto (Khosravani y Haghighi, 2022; Rehman et al., 2024), incrementando la productividad con la incorporación de sistemas multirrobóticos (Prieto et al., 2024) y la seguridad en las actividades de la construcción (Naranjo et al., 2023; Chea et al., 2024). El mapa temático expone que temas como la robótica y la automatización en la construcción, lo que concuerda con investigaciones, que han reconocido estas tecnologías como esenciales, para el avance en la industria de la construcción (Kim et al., 2021; Davila y Oyedele, 2022; Park et al., 2024; Liu et al., 2024); otros temas, como el diseño computacional y la fabricación robótica, tienen un considerable potencial para aplicaciones futuras (Prieto, Xu, et al., 2024), con relación a la cultura organizacional y la planificación, el control y prácticas de aseguramiento de la calidad (Park et al., 2022; Faltein y Sukdeo, 2024), en comparación con los procesos convencionales (Marcher et al., 2021). El aporte principal de esta investigación es presentar un exhaustivo análisis bibliométrico, sobre la integración de la automatización en la edificación 4.0, destacando los actores, revistas y áreas de conocimiento, detallando las tendencias actuales y futuros estudios, que incorpora la tecnología emergente en el sector de la construcción, tales como la impresión en 3D, la robótica y la inteligencia artificial.

CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico efectuado, permite evidenciar el crecimiento en la producción científica, sobre la integración de la automatización en la construcción 4.0, desde el 2020 hasta octubre de 2024. Se destaca la colaboración internacional y la diversidad de enfoques multidisciplinario del tema, predominado la robótica y la automatización, como consecuencia del desafío de la industria de la construcción, a la implementación de tecnologías avanzadas, que incluye la robótica, la automatización y el Building Information Modeling (BIM), como herramientas clave. Respecto a la autoría y la publicación destaca Leder y Menges (, tanto en producción como en citación. Las revistas “Automation in Construction” y “Sustainability (Switzerland)”, destacan en la difusión de investigaciones. Además, países como Estados Unidos, China y Alemania lideran la producción científica, señalando un dominio en la aplicación de automatización avanzada en la industria de la construcción, mientras que la limitada participación de países en desarrollo subraya una brecha tecnológica impulsada por barreras económicas. En cuanto al desarrollo semántico, el nodo central “construction 4.0” y su vínculo con términos como “automation” y “robotics”, indican que estas tecnologías están integradas a la modernización del sector. Cabe mencionar que, conceptos asociados a la impresión 3D y a la fabricación, busca mejorar la calidad, reducir costos, disminuir residuos y la sostenibilidad del sector. Los temas motores, ubicados en el cuadrante superior derecho del mapa temático, como robótica y construcción 4.0, se perfilan como áreas estratégicas de futuro desarrollo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abkar, M. M. A., Yunus, R., Al-Shameri, A. S. A. S., Harouache, A., & Gamil, Y. (2023). An empirical investigation of automation technology as material waste mitigation measure at Johor construction sites. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1232195. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1232195>
- Adami, P., Rodrigues, P. B., Woods, P. J., Becerik-Gerber, B., Soibelman, L., Copur-Gencturk, Y., & Lucas, G. (2021). Effectiveness of VR-based training on improving construction workers’ knowledge, skills, and safety behavior in robotic teleoperation. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101431. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101431>
- Aghimien, D., Ikuabe, M., Aghimien, L. M., Aigbavboa, C., Ngcobo, N., & Yankah, J. (2024). PLS-SEM assessment of the impediments of robotics and automation deployment for effective construction health and safety. *Journal of Facilities Management*, 22(3), 458-478. <https://doi.org/10.1108/JFM-04-2022-0037>
- Agrawal, A. K., Zou, Y., Chen, L., Abdelmegid, M. A., & González, V. A. (2024). Moving toward lean construction through automation of planning and control in last planner system: A systematic literature review. *Developments in the Built Environment*, 18, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100419>
- Barrios Serna, K. V., Orozco Núñez, D. M., Pérez Navas, E. C., & Conde Cardona, G. (2021). Nuevas recomendaciones de la versión PRISMA 2020 para revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Acta Neurológica Colombiana*, 37(2), 105-106. <https://doi.org/10.22379/24224022373>
- Bibliometrix. (2023). *Bibliometrix—Home*. <https://www.bibliometrix.org/home/>

- Bruun, E. P. G., Pastrana, R., Paris, V., Beghini, A., Pizzigoni, A., Parascho, S., & Adriaenssens, S. (2021). Three cooperative robotic fabrication methods for the scaffold-free construction of a masonry arch. *Automation in Construction*, 129, 103803. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103803>
- Chai, H., Wagner, H. J., Guo, Z., Qi, Y., Menges, A., & Yuan, P. F. (2022). Computational design and on-site mobile robotic construction of an adaptive reinforcement beam network for cross-laminated timber slab panels. *Automation in Construction*, 142, 104536. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104536>
- Chea, C. P., Bai, Y., & Zhou, Z. (2024). Design and development of robotic collaborative system for automated construction of reciprocal frame structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(10), 1550-1569. <https://doi.org/10.1111/mice.13145>
- Codarin, S. (2023). Enhancing the workforce in construction: Robotic concrete printing in Detroit. *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, 25, 233-242. <https://doi.org/10.36253/techne-13704>
- Cuevas Molano, E., Sánchez Cid, M., & Matosas-López, L. (2019). Análisis bibliométrico de estudios sobre la estrategia de contenidos de marca en los medios sociales. *Comunicación y Sociedad*, 1-25. <https://doi.org/10.32870/cys.v2019i0.7441>
- Davila Delgado, Manuel, J. M., & Oyedele, L. (2022). Robotics in construction: A critical review of the reinforcement learning and imitation learning paradigms. *Advanced Engineering Informatics*, 54, 101787. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101787>
- Faltein, S. A., & Sukdeo, N. I. (2024). Culture-driven quality enhancement: Uncovering the impact of robotics integration in the South African construction sector. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(6), 102728. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102728>
- Feldmann, F. G. (2022). Towards Lean Automation in Construction—Exploring Barriers to Implementing Automation in Prefabrication. *Sustainability*, 14(19), 12944. <https://doi.org/10.3390/su141912944>
- Follini, C., Magnago, V., Freitag, K., Terzer, M., Marcher, C., Riedl, M., Giusti, A., & Matt, D. T. (2020). BIM-Integrated Collaborative Robotics for Application in Building Construction and Maintenance. *Robotics*, 10(1), 2. <https://doi.org/10.3390/robotics10010002>
- Hiramatsu, T., Saiki, M., Hara, N., Yamada, M., & Sugiura, H. (2024). Study of Force Control for Construction Automation. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 36(2), 284-293. <https://doi.org/10.20965/jrm.2024.p0284>
- Hoffmann, M., Skibicki, S., Pankratow, P., Zieliński, A., Pajor, M., & Techman, M. (2020). Automation in the Construction of a 3D-Printed Concrete Wall with the Use of a Lintel Gripper. *Materials*, 13(8), 1800. <https://doi.org/10.3390/ma13081800>
- Kajzr, D., Brousek, J., Petr, T., Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Studies, Faculty of Mechanical Engineering, Technical university of Liberec, Liberec, Czech Republic, Beran, L., Diblík, M., & Vozenilek, R. (2021). New design of Plc-Based Robotic Control System for Concrete Printing in Building Construction. *MM Science Journal*, 2021(6), 5346-5352. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_12_2021051
- Kavaliauskas, P., Fernandez, J. B., McGuinness, K., & Jurelionis, A. (2022). Automation of Construction Progress Monitoring by Integrating 3D Point Cloud Data with an IFC-Based BIM Model. *Buildings*, 12(10), 1754. <https://doi.org/10.3390/buildings12101754>
- Khaleel, A., & Naimi, S. (2022). Automation of cost control process in construction project building information modeling (BIM). *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 10(6), 28. <https://doi.org/10.21533/pen.v10i6.3354>
- Khosravani, M. R., & Haghighi, A. (2022). Large-Scale Automated Additive Construction: Overview, Robotic Solutions, Sustainability, and Future Prospect. *Sustainability*, 14(15), 9782. <https://doi.org/10.3390/su14159782>

- Kim, T., Lee, D., Lim, H., Lee, U.-K., Cho, H., & Cho, K. (2021). Exploring research trends and network characteristics in construction automation and robotics based on keyword network analysis. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(4), 442-457. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1798774>
- Lai, Z., Xiao, Y., Chen, Z., Li, H., & Huang, L. (2024). Preserving Woodcraft in the Digital Age: A Meta-Model-Based Robotic Approach for Sustainable Timber Construction. *Buildings*, 14(9), 2900. <https://doi.org/10.3390/buildings14092900>
- Leder, S., Kim, H., Oguz, O. S., Kubail Kalousdian, N., Hartmann, V. N., Menges, A., Toussaint, M., & Sitti, M. (2022). Leveraging Building Material as Part of the In-Plane Robotic Kinematic System for Collective Construction. *Advanced Science*, 9(24), 2201524. <https://doi.org/10.1002/adv.202201524>
- Leder, S., Kim, H., Sitti, M., & Menges, A. (2024). Enhanced co-design and evaluation of a collective robotic construction system for the assembly of large-scale in-plane timber structures. *Automation in Construction*, 162, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105390>
- Leder, S., & Menges, A. (2024). Merging architectural design and robotic planning using interactive agent-based modelling for collective robotic construction. *Journal of Computational Design and Engineering*, 11(2), 253-268. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwae028>
- Li, H. (2021). Application and Analysis of Internet and Information Technology in Higher Education Computer Teaching. *2021 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education*, 843-846. <https://doi.org/10.1145/3482632.3483033>
- Liu, Y., Alias, A. H. B., Haron, N. A., Bakar, N. A., & Wang, H. (2024). Technology status tracing and trends in construction robotics: A patent analysis. *World Patent Information*, 76, 102259. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2023.102259>
- Liu, Y., Belousov, B., Schneider, T., Harsono, K., Cheng, T.-W., Shih, S.-G., Tessmann, O., & Peters, J. (2024). Advancing Sustainable Construction: Discrete Modular Systems & Robotic Assembly. *Sustainability*, 16(15), 6678. <https://doi.org/10.3390/su16156678>
- Marcher, C., Giusti, A., & Matt, D. T. (2021). On the Design of a Decision Support System for Robotic Equipment Adoption in Construction Processes. *Applied Sciences*, 11(23), 11415. <https://doi.org/10.3390/app112311415>
- Naranjo, J. E., Valle, A., Cruz, A., Martín, M., Anguera, M., García, P., & Jiménez, F. (2023). Automation of haulers for debris removal in tunnel construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 38(14), 2030-2045. <https://doi.org/10.1111/mice.12997>
- Park, E. S., Seo, H. C., & Lee, A. Y. (2022). Development of a Multi-Layer Marking Toolkit for Layout-Printing Automation at Construction Sites. *Sensors*, 22(13), 4822. <https://doi.org/10.3390/s22134822>
- Park, J. K., & Lee, K. W. (2022). Efficiency Analysis of Construction Automation Using 3D Geospatial Information. *Sensors and Materials*, 34(1), 415. <https://doi.org/10.18494/SAM3707>
- Park, S., Wang, X., Menassa, C. C., Kamat, V. R., & Chai, J. Y. (2024). Natural language instructions for intuitive human interaction with robotic assistants in field construction work. *Automation in Construction*, 161, 105345. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105345>
- Pereira Da Silva, N., Eloy, S., & Resende, R. (2022). Robotic construction analysis: Simulation with virtual reality. *Heliyon*, 8(10), e11039. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11039>
- Prieto, S. A., Giakoumidis, N., & García De Soto, B. (2024). Multiagent robotic systems and exploration algorithms: Applications for data collection in construction sites. *Journal of Field Robotics*, 41(4), 1187-1203. <https://doi.org/10.1002/rob.22316>
- Prieto, S. A., Xu, X., & García De Soto, B. (2024). A guide for construction practitioners to integrate robotic systems in their construction applications. *Frontiers in Built Environment*, 10, 1307728. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1307728>

- Rada, A. O., Kuznetsov, A. D., Zverev, R. E., & Timofeev, A. E. (2023). Automation of monitoring construction works based on laser scanning from unmanned aerial vehicles. *Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal*, 15(4), 373-382. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-373-382>
- Rehman, A. U., Kim, I.-G., & Kim, J.-H. (2024). Towards full automation in 3D concrete printing construction: Development of an automated and inline sensor-printer integrated instrument for in-situ assessment of structural build-up and quality of concrete. *Developments in the Built Environment*, 17, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100344>
- Saini, G. S., Erge, O., Ashok, P., & Van Oort, E. (2022). Well Construction Action Planning and Automation through Finite-Horizon Sequential Decision-Making. *Energies*, 15(16), 5776. <https://doi.org/10.3390/en15165776>
- Saini, G. S., Pournazari, P., Ashok, P., & Van Oort, E. (2022). Intelligent Action Planning for Well Construction Operations Demonstrated for Hole Cleaning Optimization and Automation. *Energies*, 15(15), 5749. <https://doi.org/10.3390/en15155749>
- Spinner, A., & Degani, A. (2024). Online as-Built Building Information Model Update for Robotic Monitoring in Construction Sites. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110(2), 50. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02087-2>
- Vidovszky, I., & Szögi, T. (2024). Az építésautomatizálás technológiai lehetőségei: Az ipar 4.0 szemlélet kibontakozása az építőiparban. *Építés – Építészettudomány*, 52(1-2), 105-123. <https://doi.org/10.1556/096.2024.00108>
- VOSviewer. (2023). *VOSviewer—Visualizing scientific landscapes*. <https://www.vosviewer.com/>
- Wagner, H. J., Alvarez, M., Kyjanek, O., Bhiri, Z., Buck, M., & Menges, A. (2020). Flexible and transportable robotic timber construction platform – TIM. *Automation in Construction*, 120, 103400. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103400>
- Wang, Y., Lu, H., Wang, Y., Yang, Z., Wang, Q., & Zhang, H. (2024). A hybrid building information modeling and collaboration platform for automation system in smart construction. *Alexandria Engineering Journal*, 88, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.01.013>
- Waqar, A., Alrasheed, K. A., & Benjeddou, O. (2024). Enhancing construction management outcomes through the mitigation of robotics implementation barriers: A sustainable practice model. *Environmental Challenges*, 16, 100989. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100989>
- Wong Chong, O., Zhang, J., Voyles, R. M., & Min, B.-C. (2022). BIM-based simulation of construction robotics in the assembly process of wood frames. *Automation in Construction*, 137, 104194. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104194>
- Xu, W., Huang, S., Han, D., Zhang, Z., Gao, Y., Feng, P., & Zhang, D. (2022). Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01442. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01442>
- Yankah, J. E., Adjei, K. O., & Tieru, C. K. (2024). Apps as partial replacement for robotics and automation systems in construction health and safety management. *Frontiers in Engineering and Built Environment*, 4(2), 90-100. <https://doi.org/10.1108/FEBE-07-2023-0033>
- Zhang, Y., Meina, A., Lin, X., Zhang, K., & Xu, Z. (2021). Digital Twin in Computational Design and Robotic Construction of Wooden Architecture. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 8898997. <https://doi.org/10.1155/2021/8898997>