

TECNOLOGÍA: RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

DOI:<https://doi.org/10.35588/6436n243>

Tendencias en la producción científica en el área de tecnologías digitales y economía circular

Trends in scientific production in the area of digital technologies and circular economy

Edición Nº49 – Abril de 2024

Artículo Recibido: Agosto 22 de 2023

Aprobado: Abril 29 de 2024

Autora

Gloria María Aponte¹

Resumen:

Las tecnologías digitales están cada día más involucradas en el desarrollo de las operaciones de las empresas, organizaciones y la sociedad en general. Su integración pretende, entre otros aspectos, optimizar la asignación de los recursos, mejorar la eficiencia de los procesos y facilitar la toma de decisiones con una menor necesidad de intervención humana. Estas tecnologías, en el caso de la economía circular, pueden contribuir a mejorar el uso de los recursos, reducir la generación de residuos y facilitar la reutilización y el reciclaje de los mismos. Desde esa perspectiva, surge el interés por analizar la evolución de las tecnologías digitales y la economía circular, tomando en cuenta las publicaciones científicas y académicas realizadas en dicha área a nivel mundial. Esta investigación presenta un estudio sobre las tendencias más destacadas, centrándose en la información técnica científica publicada en fuentes académicas

¹ Dra. en Gestión de Investigación y Desarrollo. Profesora Investigadora, Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, República Bolivariana de Venezuela. Correo electrónico: gapontef@ucab.edu.ve, <https://orcid.org/0000-0002-1029-8264>

arbitradas a nivel mundial. Para ello se utilizaron las técnicas de revisión bibliográfica, el análisis bibliométrico y el análisis de contenido para evaluar la literatura publicada en revistas y congresos especializados durante el periodo de estudio entre 2018 y 2022. Entre los resultados más relevantes obtenidos se tiene que tanto la comunidad científica como la académica a nivel internacional están cada día más involucradas a explorar la interacción entre las tecnologías digitales y la economía circular y que las tecnologías digitales se vislumbran cada vez más con un inmenso potencial como fuente habilitadora que permite fomentar las prácticas de la economía circular en el mundo. En este trabajo se consideraron como tecnologías digitales aquellas relacionadas con la inteligencia artificial, el internet de las cosas, la cadena de bloques, los gemelos digitales, la fabricación aditiva o impresión 3D, la robótica, *big data*, la computación en la nube, aprendizaje automatizado, los sistemas ciberfísicos y la realidad aumentada.

Palabras clave: Tecnologías digitales, economía circular, Industria 4.0.

Abstract:

Digital technologies are becoming increasingly involved with business' operations, organizations, and society at large. Their integration aims to streamline resource allocation, refine process efficiency, and facilitate decision-making processes, with a reduced need for human intervention. In the context of a circular economy, these technologies have the potential to enhance resource distribution practices, diminish waste generation, and enable reutilization and recycling efforts. From this perspective, interest arises in analyzing the evolution of digital technologies and the circular economy, taking into account the scientific and academic publications made in this area worldwide. This research presents an analysis of the most prominent trends in academic literature, focusing on technical and scientific information published in peer-reviewed sources worldwide. To accomplish this, in the study diverse techniques were applied, including bibliographic review, bibliometric analysis, and content analysis. These methodologies were used to evaluate literature published in specialized journals and conferences during the study period from 2018 to 2022. The study's most relevant findings reveal that both the scientific and academic communities are progressively invested in exploring the interplay between digital technologies and the circular economy. These findings indicate

that digital technologies hold immense potential as enablers and drivers of circular economy practices worldwide. For this research digital technologies considered were those related to artificial intelligence, the Internet of Things, blockchain technology, digital twins, additive manufacturing or 3D printing, robotics, big data, cloud computing, machine learning, cyber-physical systems, and augmented reality.

Key words: digital technologies, circular economy, Industry 4.0.

1. Introducción

El modelo económico centrado en el aprovechamiento de recursos y la reutilización de residuos para crear bienes y servicios de consumo masivo se conoce actualmente como economía circular (Bressanelli, Adrodegari, Perona y Sacconi, 2018). Este modelo busca reducir el consumo y la emisión de recursos y residuos con el objetivo de aumentar la vida útil de los productos y servicios, al mismo tiempo que se vuelve amigable con el medio ambiente y optimiza la energía tomada de las diferentes fuentes disponibles. En la evolución de dicho modelo actualmente se aprecia que está siendo notablemente impactado por el uso de las tecnologías digitales, específicamente las denominadas de la cuarta revolución industrial, también denominada Industria 4.0 (I4.0) (Tavera-Romero, Castro, Ortiz, Khalaf y Vargas, 2021).

En cuanto a las tecnologías digitales, específicamente las enmarcadas en la I4.0, estas se refieren a todas aquellas que están transformando la gestión de operaciones en áreas como la automatización y fabricación industrial, gestión de la cadena de suministro, producción ajustada y ágil y gestión de la calidad, entre otras áreas. Estas tecnologías tienen la capacidad de utilizar datos históricos gracias a las cuales es posible mejorar la calidad, detectar comportamientos anormales y ajustar los umbrales de rendimiento en consecuencia (Kristoffersen, Blomsma, Mikalef y Li, 2020).

La economía circular y la I4.0 representan los dos paradigmas industriales más importantes que impulsan la academia y la industria en los últimos años (Suárez-Eiroa, Fernández, Méndez-Martínez y Soto-Oñate, 2019). Ambos campos, economía circular e I4.0, surgieron de forma independiente; sin embargo, existen algunos ejemplos donde se

presentan superposiciones, representados por categorías como la I4.0 circular y la economía circular digital. Los trabajos de investigación coinciden en que los modelos de economía circular en su mayoría intentan diseñar y producir bienes y servicios que reduzcan los desechos, complementados con la implementación de tecnologías digitales que puedan apoyar su desarrollo y actualmente se enmarcan dentro del concepto de la I4.0 (Rosa, Sassanelli, Urbinati, Chiaroni y Terzi, 2020).

En este trabajo se presenta un análisis sobre las tendencias relacionadas con las tecnologías digitales y la economía circular considerando las publicaciones científicas y tecnológicas durante el periodo 2018-2022. El documento está estructurado en las siguientes secciones: Aspectos teóricos, metodología, resultados, discusión de resultados y referencias bibliográficas. Para efectos del desarrollo y fines de este trabajo, las tecnologías digitales contextualizadas dentro de la I4.0 son: inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), cadena de bloques, gemelos digitales, computación en la nube, fabricación aditiva, *big data*, aprendizaje automatizado, robótica, sistemas ciberfísicos y realidad aumentada.

2. Aspectos teóricos

La I4.0, también conocida como la cuarta revolución industrial, surge del gobierno federal alemán en 2011. La I4.0 se define como una iniciativa estratégica alemana para asumir un papel pionero en industrias que actualmente están revolucionando el sector manufacturero (Xu, Xu y Li, 2018). La I4.0 enfatiza la mejora de las capacidades industriales mediante el refuerzo de la industria con aplicaciones tecnológicas y la digitalización (Luthra, Kumar, Zavadskas, Mangla y Garza-Reyes, 2019). Sin embargo, en la literatura aún no existe un consenso sobre cómo categorizar las tecnologías relacionadas con I4.0 (Laskurain-Iturbe, Arana-Landín, Landeta-Manzano y Uriarte-Gallastegi, 2021).

En ese sentido, Sarc, Curtis, Kandlbauer, Khodier, Lorber y Pomberger (2019), argumentan que la IoT está conformada por IoT industrial e IoT para el consumidor; mientras que Rajput y Singh (2019), refiere que I4.0 es una combinación de sistemas ciberfísicos, IoT y computación cognitiva; por otra parte, Dantas, de-Souza, Destro, Hammes, Rodríguez y Soares (2021) afirmó que las tecnologías relacionadas con I4.0

incluyen sistemas ciberfísicos, IoT, *big data* y análisis, fabricación aditiva, Internet de servicios, computación en la nube, realidad aumentada, integración de sistemas, simulación, ciberseguridad y robots autónomos. Además, la digitalización y la robótica inteligente también se consideran nuevos enfoques I4.0, que se han utilizado para desarrollar la gestión de residuos hacia la economía circular (Sarc, Curtis, Kandlbauer, Khodier, Lorber y Pomberger, 2019).

Con relación a la tecnología IoT, es concebida como un sistema que transfiere datos de productos, servicios, procesos, actividades o tareas en tiempo real, para respaldar la gestión dinámica de la información (De Las Heras, Aguayo-Gonzalez, Córdoba-Roldan, 2018). En el caso de *big data*, se refiere a un alto y variado volumen de datos procesados por un conjunto de herramientas tecnológicas (Rajput y Singh, 2019).

Mientras que la inteligencia artificial, es una ciencia cognitiva que ayuda a tomar mejores decisiones en distintas áreas, tales como, procesamiento de imágenes, procesamiento de lenguaje natural, robótica o máquina aprendizaje (Lee, Davari, Singh y Pandhare, 2018). Computación en la nube, es una infraestructura digital que facilita el acceso a procesamiento, almacenamiento y *software* a través de la red (Lopes de Sousa-Jabbour, Chiappetta-Jabbour, Godinho-Filho y Roubaud, 2018).

Fabricación aditiva, está centrada en el uso de diseños digitales tridimensionales, usando materias primas convencionales que no requieren moldes preconcebidos (Matos-Nascimento, Alencastro, Goncalves-Quelhas, Gusmão-Caiado, Garza-Reyes, Rocha-Lona y Tortorella, 2018).

Por otra parte, la realidad aumentada, permite superponer información digital en el entorno real a través de un dispositivo tecnológico, para recopilar datos de simulaciones para comprender mejor los sistemas del mundo real (Tavera-Romero, Castro, Ortiz, Khalaf y Vargas, 2021).

El aprendizaje automatizado, se centra en el desarrollo de sistemas que pueden aprender y mejorar de forma autónoma sin ser programados explícitamente (Mavropoulos y Waage, 2020).

En relación a Cadena de bloques (*Block Chain*), es una tecnología de registro distribuido que permite almacenar información de forma segura y transparente. La información se

almacena en bloques que están conectados entre sí mediante un algoritmo criptográfico (Tavera-Romero, Castro, Ortiz, Khalaf y Vargas, 2021).

Gemelos digitales (*Digital Twins*), está relacionado con una representación virtual de objetos o sistemas físicos (Tavera-Romero, Castro, Ortiz, Khalaf y Vargas, 2021).

Sistemas ciberfísicos, combinan componentes físicos y digitales para proporcionar una solución integrada de monitoreo y control (Mavropoulos y Waage, 2020).

Robótica que se ocupa del diseño, construcción, operación, aplicación y estudio de los robots con aprendizaje automático aplicados en la industria (Tavera-Romero, Castro, Ortiz, Khalaf y Vargas, 2021).

Con respecto a la economía circular, existe una diversidad de definiciones; Kirchherr, Reike y Hekkert (2017), presentaron un análisis de la literatura publicada y lograron identificar 114 definiciones relacionadas con dicho término; lo cual es un indicador de la diversidad de definiciones que han utilizado los autores para referirse a la economía circular.

También señalan que la definición más utilizada es la de la Fundación Ellen MacArthur, que se refiere a la economía circular como un sistema que deja de producir residuos, basado principalmente en tres principios: eliminar los residuos y la contaminación, circular los productos y materiales (en su valor más alto) y regenerar la naturaleza (Ellen MacArthur Foundation, 2023).

Se han publicado numerosos estudios relacionados con la economía circular; sin embargo, aún no representa un modelo económico debido a que es un tema que sigue siendo muy debatido por los economistas y la academia (Korhonen, Honkasalo, Seppälä, 2018).

El concepto de economía circular no se remonta a una sola fecha o autor, sino a diferentes escuelas de pensamiento, las cuales han desarrollado y perfeccionado dicho concepto (Wautelet, 2018).

En la **Tabla N°1** se presenta un resumen de los diferentes modelos sobre economía circular, principales características y sus respectivos autores.

Tabla N°1. Características de los modelos de economía circular.

Autor/año	Modelo	Características del modelo
John Lyle/1970	Diseño Regenerativo	Todos los sistemas, a partir de la agricultura, podría ser organizado de forma regenerativa. En otras palabras, que los procesos por sí mismos se renueven o regeneren las fuentes de energía y de materiales que consumen
Walter Stahel; Genevieve Reday/1976	Economía del Rendimiento	Los objetivos de este modelo: la extensión de la vida del producto, los bienes de larga duración, las actividades de reacondicionamiento y la prevención de residuos.
Bill Mollison y David Holmgren/1978	Permacultura	Diseño consciente y mantenimiento de ecosistemas agrícolas productivos, que imitan los patrones y las relaciones de la naturaleza, mientras suministran el alimento, fibras y energía para satisfacer las necesidades locales.
Frosch and Gallopoulos/1989	Ecología Industrial	El objetivo es crear procesos de circuito cerrado en el que los residuos sirven de entrada para otro proceso, eliminando la noción de un subproducto no aprovechable. A este marco de trabajo se le denomina a veces «ciencia de la sostenibilidad», por su carácter interdisciplinario y porque sus principios pueden aplicarse también en el sector de los servicios. Con un énfasis en la restauración del capital natural, la ecología industrial también se centra en el bienestar social.
Michael Braungart; Bill McDonough/90	Cradel to Cradle™ (de la cuna a la cuna)	Todo material involucrado en procesos industriales y comerciales son nutriente, de los cuales hay dos categorías principales: técnicas y biológicas. Se centra en el diseño de la eficacia en términos de productos con impacto positivo y la reducción de los impactos negativos del comercio a través de la eficiencia.
Paul Hawken, Amory Lovins y L. Hunter Lovins/1999	Capitalismo Natural	Se refiere a las reservas mundiales de activos naturales, incluidos el suelo, el aire, el agua y todos los seres vivos. Sus cuatro principios son: Incrementar radicalmente la productividad de los recursos naturales; Cambiar a modelos y materiales de producción inspirados biológicamente; Avanzar hacia un modelo de negocio basado en "servicio y flujo" y Reinvertir en el capital natural
Janine Benyus/2009	Biomimesis	Es una nueva disciplina que estudia las mejores ideas de la naturaleza y luego imita estos diseños y procesos para resolver problemas humanos. Se basa en tres principios fundamentales: la naturaleza como modelo, medida y mentor.
Movimiento de código abierto Impulsada por Gunter Pauli en 2012	Economía Azul	Este modelo insiste en soluciones que están determinadas por su entorno local y las características físicas y ecológicas, haciendo hincapié en la gravedad como principal fuente de energía.

Fuente: Aponte (2022).

3. Metodología

Para realizar este trabajo se utiliza la técnica de la revisión bibliográfica en conjunto con el análisis bibliométrico y de contenido para procesar y analizar la información recuperada en el periodo 2018-2022 en el área objeto de estudio.

La búsqueda de información se realizó en el sistema *Lens.org*, el cual es una fuente de información multidisciplinaria que indiza más de 254 millones de documentos publicados en distintas revistas y congresos especializados.

La estrategia de búsqueda empleada para recuperar los documentos se presenta en la **Tabla N°2**. Dicha estrategia permitió recuperar un total de 2104 documentos en el periodo seleccionado.

Para el procesamiento de la información se utilizó la herramienta *Analysis* del sistema *Lens.org*, que es una aplicación de software que permite procesar estadísticamente la

información obtenida, una vez eliminado los repetidos y aquellos documentos no relevantes al tema de interés, se obtuvo la cantidad de 1659 documentos los cuales fueron procesados para mostrar su distribución a través de los diferentes campos de estudio (Lens, 2023).

Los datos obtenidos mediante la herramienta antes mencionada se interpretaron haciendo uso de la técnica de análisis bibliométrico que permite estudiar la evolución de la ciencia y la tecnología mediante la producción de las publicaciones científicas en el tiempo (Universidad de Málaga, 2023).

Tabla N°2. Estrategia de búsqueda utilizada.

Tipo de publicación	Estrategia aplicada	Campos de búsqueda	Periodo de tiempo
Artículos publicados en revistas especializadas y congresos	“circular economy” AND (“industry 4.0” OR “fourth industry revolution” OR “Internet of things” OR “IoT” OR “Additive Manufacturing” OR “Big Data” OR “Cloud computing” OR “artificial intelligence” OR “3d printing” OR “Cyber-Physical Systems” OR “blockchain” OR “machine learning” OR “Augmented Reality” OR “Autonomous Robots” OR “Digital Twin”)	Título (TI), Resumen (AB), Palabras clave (KW), campo de estudio (FS)	2018-2022

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de este trabajo, se evaluaron los siguientes campos: la evolución en el tiempo de las publicaciones, los principales países y organizaciones, las áreas con mayor relevancia por tipo de tecnología; así como también las publicaciones más importantes, complementando con un análisis de contenido de los trabajos de mayor impacto.

4. Resultados

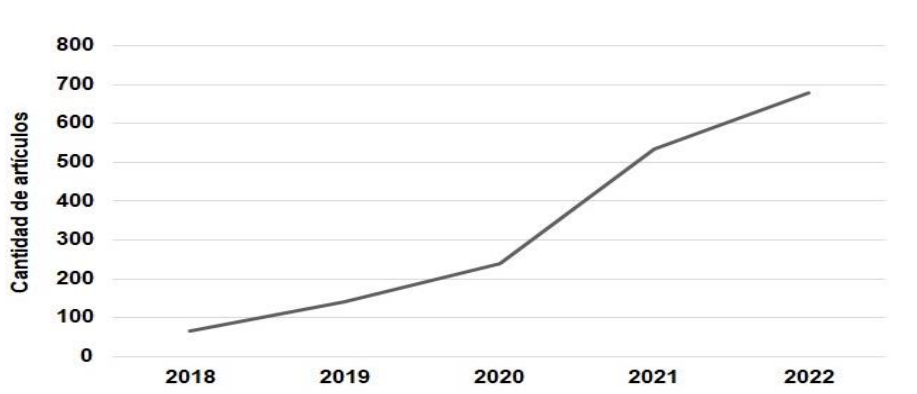
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de este trabajo, una vez aplicada la metodología explicada en la sección 3.

4.1 Evolución de las tecnologías en el tiempo

El universo de información recuperado del sistema Lens.org de las publicaciones especializadas (artículos de revistas y congresos) durante el periodo 2018-2022, representó un total de 1659 documentos, relacionados con el área de las tecnologías digitales de la I4.0 y la economía circular.

La evolución de dichos documentos en el período estudiado se muestra en la **Figura N°1**.

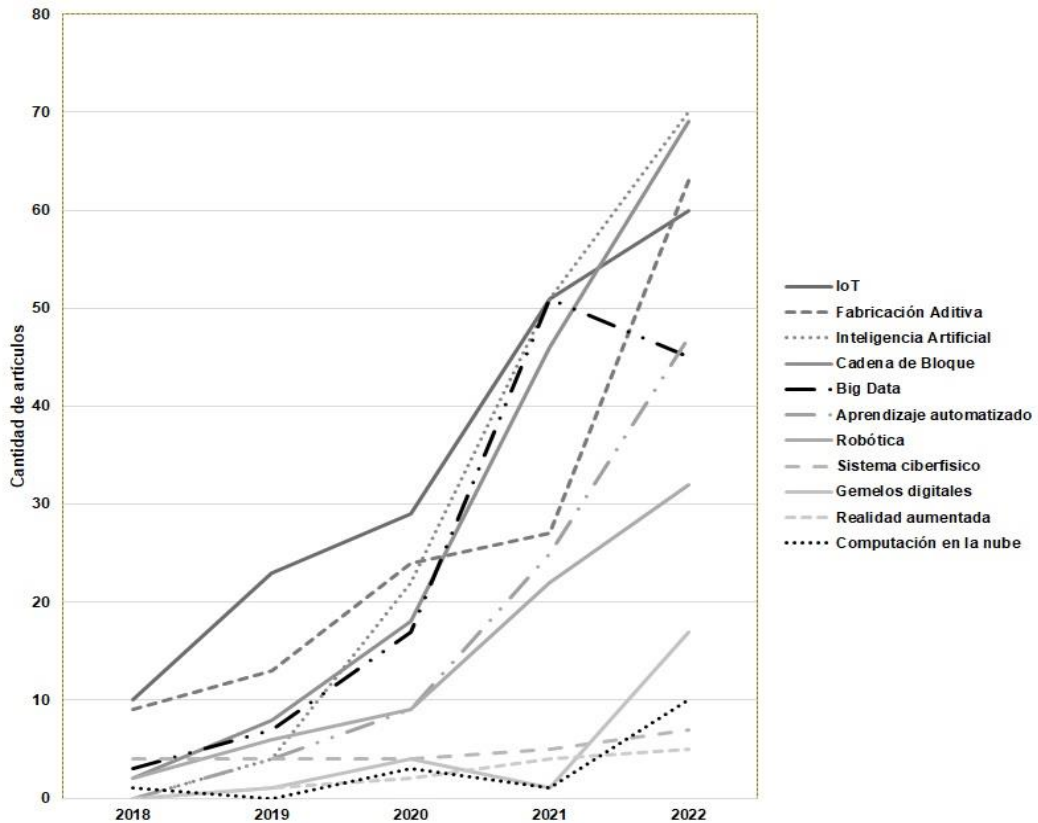
Figura N°1. Evolución de las publicaciones.



Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura N°2**, se observa la evolución de dichas publicaciones (artículos de revistas y congresos) en el periodo analizado para cada tecnología involucrada con economía circular.

Figura N°2. Evolución de las publicaciones por tecnología.

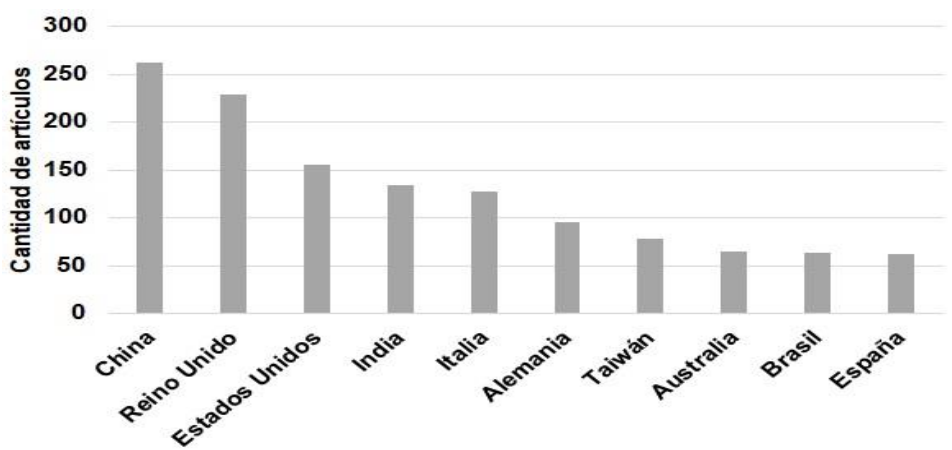


Fuente: Elaboración propia.

4.2 Esfuerzos de publicación por país

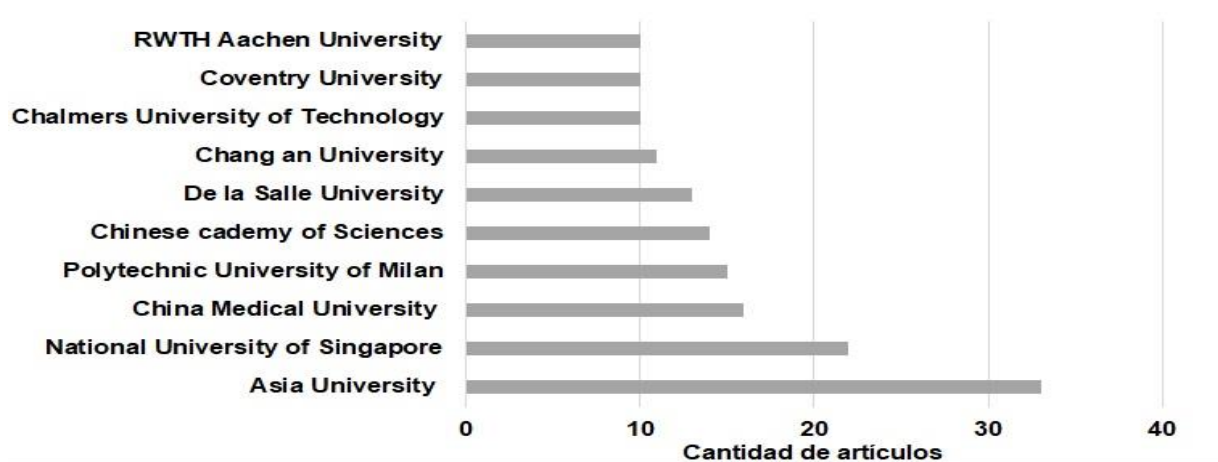
La distribución geográfica de las publicaciones se presenta en la **Figura N°3**, donde se observan los principales países con mayor cantidad de publicaciones en las áreas de estudio; así mismo en la **Figura N°4**, se observan las principales organizaciones con mayor cantidad de documentos publicados.

Figura N°3. Principales países con mayor cantidad de publicaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°4. Principales organizaciones con mayor cantidad de publicaciones.



Fuente: Elaboración propia.

4.3. Principales áreas por tecnología

Por cada una de las tecnologías digitales consideradas se obtuvo una distribución de los trabajos publicados por área de aplicación (ver **Tabla N°3**).

Tabla N°3. Principales áreas por tipo de tecnología.

Tecnología	Publicaciones totales	Área de influencia	Cantidad de artículos
IoT	173	<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	47
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	32
		Geografía, planificación y desarrollo	25
		Ingeniería, industria y manufactura	32
		Estrategia y gestión	22
Fabricación aditiva	176	Ingeniería, industria y manufactura	32
		Ciencia de los materiales	24
		<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	20
		Estrategia y gestión	15
Inteligencia artificial	147	Química	15
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	29
		<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	28
		Geografía, planificación y desarrollo	19
Cadena de bloques	143	Edificaciones y construcción	18
		Estrategia y gestión	15
		<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	34
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	32
<i>Big data</i>	123	Geografía, planificación y desarrollo	28
		Ingeniería, industria y manufactura	19
		Edificaciones y construcción	18
		Estrategia y gestión	15
Aprendizaje automatizado	85	<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	24
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	23
		Gestión de tecnologías e innovación	22
		Negocios y gestión internacional	20
		Geografía, planificación y desarrollo	18
Robótica	70	<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	18
		Edificaciones y construcción	12
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	12
		Disposición y gestión de desechos	12
Sistemas ciberfísicos	24	Geografía, planificación y desarrollo	9
		Ingeniería, industria y manufactura	17
		<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	13
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	11
Gemelos digitales	33	Geografía, planificación y desarrollo	10
		Edificaciones y construcción	9
		<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	7
		Estrategia y gestión	7
Realidad aumentada	12	Ciencias ambientales	5
		Ingeniería, industria y manufactura	5
		Negocios y gestión internacional	3
		Edificaciones y construcción	6
Computación en la nube	15	<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	6
		Ingeniería civil y estructural	4
		Geografía, planificación y desarrollo	4
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	4
		<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	5
		Estrategia y gestión	3
		Tecnologías de energía y electricidad	2
		Tecnologías de combustibles	2
		Ciencias ambientales	2
		<i>Energía renovable, sustentabilidad y ambiente</i>	8
		Gestión, monitoreo, políticas y leyes	6
		Geografía, planificación y desarrollo	5
		Edificaciones y construcción	3
		Ciencias ambientales	3

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Principales países y organizaciones por tecnología

En la **Tabla N°4**, se presentan los principales países y organizaciones por cada tecnología digital objeto de estudio.

Tabla N°4. Principales países y organizaciones por tecnología.

Tecnología	Países	Organizaciones
Fabricación aditiva	Reino Unido, EE.UU., Italia	Michigan Technological University
Big data	China y Reino Unido	University of Jonannesburg y Hong Kong Polytechnic University
Cadena de bloque	Reino Unido, EE.UU.	Worcester Polytechnic Institute
Inteligencia artificial	China, Italia, Reino Unido	National University of Singapore, University of Bologna, University of Johannesburg
IoT	Reino Unido, China, Italia	Bournemouth University
Sistemas ciberfísicos	España, Reino Unido	University of Sevilla
Computación en la nube	Italia; Reino Unido	Federal University of Sao Carlos; Universal Engineering; University of Bleggrade; University of Nottingham; University of Salenta
Robótica	Alemania, España	University of Birmingham
Gemelos digitales	Australia, Alemania	Delft University of Technology, Technische Universitat Munchen, University of New South Wales
Aprendizaje automatizado	EE.UU. y Reino Unido	National University of Singapore
Realidad aumentada	España y Brasil	No existe una organización líder en esta área.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Investigaciones con mayor relevancia por tecnología

Con referencia a los trabajos publicados que han tenido mayor impacto, tomando en cuenta el indicador de cantidad de citas, en cada una de las áreas estudiadas (ver **Tabla N°5**), se destaca en el área de la fabricación aditiva la investigación de los autores Matos-Nascimento Alencastro, Goncalves-Quelhas, Gusmão-Caiado, Garza-Reyes, Rocha-Lona y Tortorella (2018) con 435 citas, seguida por la publicación de los autores Tseng, Tan, Chiu, Chien y Kuo (2018) con 305.

Tabla N°5. Artículos más relevantes por tipo de tecnología.

Tecnología	Título del artículo	Cantidad de citas	Organización/País	Referencia
Fabricación aditiva	Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal	435	Federal Fluminense University; Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro University of Derby/Reino Unido CINVESTAV/México Universidade Federal de Santa Catarina/ Brasil	De Mattos Nascimento <i>et al.</i> (2019)
Big data	Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis?	305	Asia University (Taiwan); De La Salle University; (Filipinas) Tsinghua University; (Taiwan) Chung Yuan Christian University (Taiwan)	Tseng <i>et al.</i> (2018)
Cadena de bloques	How blockchain improves the supply chain: case study alimentary supply chain	294	University of Salamanca/España Universiti Malaysia Kelantan/Malasia Osaka Institute of Technology/Japón	Casado-Vara <i>et al.</i> (2018)
Inteligencia artificial	Connecting circular economy and industry 4.0	289	Indian Institute of Technology Delhi/India	Rajput & Singh (2019)
IoT	Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies	284	University of Brescia/Italia	Bressanelli, <i>et al.</i> (2018)
Robótica	How 2D semiconductors could extend Moore's law	184	Corporate Research at the Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (Taiwan)	Li <i>et al.</i> (2019).
Sistemas ciberfísicos	Industry 4.0 - challenges to implement circular economy	100	Indian Institute of Technology/India	Rajput & Singh (2021)
Computación en la nube	Data-driven sustainable intelligent manufacturing based on demand response for energy-intensive industries	82	Northwestern Polytechnical University/China Linköping University/Suecia University of Vaasa/Finlandia Guangdong University of Technology/China Chang'an University/China School of Modern Post, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an/China	Ma & Zhang (2020)
Aprendizaje automatizado	Waste generation, wealth and GHG emissions from the waste sector: Is Denmark on the path towards circular economy?	76	Roma Tre University (Italia) University of Teramo (Italia) Pantheon-Sorbonne University (Francia) Paris-Sorbonne University (Francia) Nord University (Noruega)	Magazzino <i>et al.</i> (2021)
Gemelos digitales	Integrating Virtual Reality and Digital Twin in Circular Economy Practices: A Laboratory Application Case	74	Politécnico di Milano/Italia	Rocca <i>et al.</i> (2020)
Realidad aumentada	Information and Communication Technology Solutions	58	National Technical University of Athens/Grecia	Demestichas & Daskalakis (2020)

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Principales áreas de aplicación por tecnología

Para cada una de las tecnologías objeto de estudio se obtuvo las principales áreas de aplicación relacionadas con la economía circular (ver **Tabla N°6**).

Tabla N°6. Principales áreas de aplicación por tecnología digital.

Tecnología	Principales áreas de aplicación como habilitadores
Cadena de bloques	Prácticas en fabricación sostenible; cadena de suministro; organización industrial; modelo de toma de decisiones; gestión de cuarta generación; control de producción industria electrónica.
Fabricación aditiva	Procesos de rociado en frío, deposición de energía directa y fusión de lecho de polvo en entornos industriales en el marco de las 9R; gestión de materiales (reuso, reparación, mantenimiento); cadena de suministro; manufactura de nuevos productos a partir de desechos plásticos; reciclado de materiales de desecho.
Big data	Cadena de suministro; gestión de cuarta generación; ecodiseño circular Sector salud; cadena de suministro; toma de decisiones; diseño de productos y eficiencia de recursos.
IoT	Cadenas de suministro; seguridad operacional; control de producción industria electrónica; separación de desechos domésticos; eliminación de residuos sanitarios; toma de decisiones; Arquitecturas integrales circulares; reconfiguración de procesos de producción; diseño de productos y eficiencia de recursos; calidad de servicio.
Gemelos digitales	Cadena de suministro
Aprendizaje automatizado	Problemas de comunicación en las organizaciones; operaciones de atornillado y desatornillado
Inteligencia artificial	Gestión de cuarta generación; clasificación de residuos municipales; gestión de energía sustentable; diseño de productos sustentables; manufactura ágil; reciclado de desechos; optimización de componentes de diseño.
Computación en la nube	Gestión de cuarta generación; cadena de suministro; calidad de servicio.
Sistemas ciberfísicos	Incrementar eficiencia y reducción de desechos; gerencia de operaciones.
Realidad aumentada	Participación ciudadana en la economía circular.

Fuente: Elaboración propia.

5. Discusión

La tendencia creciente acelerada que muestra la distribución de las publicaciones relacionadas con las tecnologías digitales y la economía circular en el periodo estudiado refleja la relevancia que cada vez más guardan estas dos áreas entre sí; donde los trabajos de investigación están agrupados en tres grandes segmentos por tecnología. El primer segmento conformado por: inteligencia artificial, cadena de bloques, internet de las cosas y *big data*, como aquellas que presentan la mayor cantidad de publicaciones relacionadas con economía circular. Un segundo segmento que incluye la fabricación

aditiva, el aprendizaje automatizado y la robótica y, finalmente, un tercer segmento, las tecnologías con menos relación con el concepto de economía circular son los sistemas ciberfísicos, los gemelos digitales, la realidad aumentada y la computación en la nube.

Asimismo, desde el punto de vista geográfico, se observa que los países que han dedicado mayor esfuerzo en publicar y, por ende, son dominantes en publicaciones en el tema analizado, durante el periodo estudiado, son China y Reino Unido; donde las principales organizaciones están representadas por universidades asiáticas, como es el caso de Asia University de Taiwán, quien tiene el liderazgo entre las primeras diez universidades.

Al efectuar el análisis sobre las áreas en las cuales están mayormente enfocados los trabajos de investigación publicados en las distintas tecnologías digitales estudiadas y su relación con la economía circular, se observa que están principalmente focalizados en la energía renovable, sustentabilidad y ambiente y en el caso de la fabricación aditiva y robótica, en la ingeniería, industria y manufactura. Por otra parte, cuando se analiza la participación por tecnología digital y país, se observa que el Reino Unido es el país con mayor presencia en trabajos académicos y científicos en las diferentes áreas de estudio durante el periodo estudiado. De estas tecnologías, se destaca en el área de fabricación aditiva la investigación de los autores Matos-Nascimento, Alencastro, Goncalves-Quelhas, Gusmão-Caiado, Garza-Reyes, Rocha-Lona y Tortorella (2018), relacionada con la integración de las tecnologías emergentes de la Industria 4.0 con las prácticas de economía circular para establecer un modelo comercial que reutilice y recicle material de desecho, como chatarra o desechos electrónicos.

Mientras que en el caso de *big data* se presenta como la tecnología de mayor relevancia vinculada con las soluciones de optimización basadas en datos operativos y de reciclaje, reducción y reutilización, que pueden ser los componentes clave de las prácticas de simbiosis industrial (Tseng, Tan, Chiu, Chien y Kuo, 2018).

Para la tecnología de cadena de bloques, el trabajo de Casado-Vara, Prieto, De la Prieta, y Corchado (2018), referido a las mejoras obtenidas en una cadena de suministro alimentario aplicando dicha tecnología que logra un nuevo modelo para coordinar el seguimiento de alimentos en la cadena de suministro agrícola, representa la investigación

con mayor cantidad de citas en esta área. Mientras que el artículo de Rajput y Singh (2019) sobre la vinculación de la economía circular con la I4.0 que trata sobre cómo analizar las conexiones no visibles entre ambas áreas en el contexto de la cadena de suministro, mediante el estudio de la perspectiva de los habilitadores y las barreras, representa el trabajo más citado.

En relación con internet de las cosas, resalta la investigación fundamentada en la exploración sobre cómo los modelos comerciales centrados en el uso permiten la implementación de la economía circular a través de tecnologías digitales con la finalidad de mejorar el diseño del producto, atraer clientes objetivo, monitorear y rastrear la actividad del producto, brindar soporte técnico, proporcionar servicios preventivos y predictivos (Bressanelli, Adrodegari, Perona y Sacconi, 2018).

En el área de robótica, el estudio de Li, Su, Philip-Wong, y Li (2019) sobre cómo los semiconductores 2D podrían extender la ley de Moore es el de mayor relevancia; mientras que en el campo de los sistemas ciberfísicos sobresale el trabajo sobre los retos de la I4.0 para ser implementada en la economía circular del Instituto Tecnológico de la India (Rajput y Singh, 2021).

Con referencia a la computación en la nube, se distingue el artículo sobre la fabricación inteligente sostenible impulsada por datos basada en la respuesta a la demanda para industrias de uso intensivo de energía (Ma, Zhang, Liu, Yang, Lv y Ren, 2020). En aprendizaje automatizado, predomina la investigación sobre la relación entre la generación de residuos, la riqueza y las emisiones de gases de efecto invernadero enmarcado en la economía circular en Dinamarca (Magazzino, Mele, Schneider y Sarkodie, 2021).

En lo que a los gemelos digitales se refiere, el trabajo más importante está relacionado con un caso de aplicación de laboratorio que muestra cómo las tecnologías basadas en I4.0 pueden respaldar las prácticas de economía circular probando virtualmente la configuración de una planta de desmontaje de residuos de equipos eléctricos y electrónicos a través de un conjunto de herramientas de simulación (Rocca, Rosa, Sassanelli, Fumagalli y Terzi, 2020).

En cuanto a la realidad aumentada, el trabajo más relevante es el de Demestichas y Daskalakis (2020) que plantea un enfoque novedoso, que se centra tanto en el aspecto tecnológico de las soluciones (por ejemplo, comunicaciones, informática, análisis de datos, etc.) como en los principales conceptos de economía circular empleados (reducir, reutilizar, reciclar y restaurar).

Con respecto a la reutilización, recuperación y reciclaje, la robótica está integrando actividades que conducen a optimizar la clasificación de materiales, las cuales favorecen principalmente la recuperación y el reciclaje y en menor medida la reutilización (Laskurain-Iturbe, Arana-Landín, Landeta-Manzano y Uriarte-Gallastegi, 2021). Además, debido a una mayor constancia y uniformidad en el trabajo de los robots, se reduce la generación de residuos al alargar la vida útil de las herramientas, disminuir la proporción de productos defectuosos y aprovechar mejor el material en determinados procesos (Laskurain-Iturbe, Arana-Landín, Landeta-Manzano y Uriarte-Gallastegi, 2021).

Por último, en relación con las principales áreas de aplicación de las tecnologías digitales en la economía circular, el área de cadena de suministros es una de las más favorecidas por dichas tecnologías, ya que la aplicación de las mismas mejora la visibilidad, la coordinación y colaboración entre los distintos actores de la cadena; ello ayuda a reducir los tiempos de entrega, mejorar la eficiencia y reducir los costos. La otra área importante es la gestión de residuos de cuarta generación que se ve reflejada en la trazabilidad digital para rastrear los residuos desde su origen hasta su destino final y también en la participación ciudadana que utiliza las tecnologías digitales para involucrar a los consumidores en la gestión de residuos.

Es importante mencionar que tanto el área de tecnologías digitales como la economía circular se encuentran en plena evolución, desarrollo e implementación a nivel mundial por lo que es necesario continuar realizando investigación con la finalidad de monitorear los cambios que se vayan produciendo y valorar, entre otros aspectos, las barreras y oportunidades de dichas tecnologías en el modelo de economía circular.

6. Conclusiones

Las comunidades académicas y científica internacional muestran cada día mayor interés en investigar la relación entre las tecnologías digitales y la economía circular, así lo

demuestra la evolución de las publicaciones en el periodo 2018-2022 con una tendencia creciente acelerada; donde la inteligencia artificial, cadena de bloques, internet de las cosas y *big data* son las que presentan mayor cantidad de publicaciones durante el periodo analizado.

Los países con mayor cantidad de publicaciones en el área de tecnologías digitales y economía circular son China y Reino Unido; destacando como líder la organización Asia University con mayor cantidad de publicaciones. Así mismo, el área con mayor aplicación de las tecnologías digitales es la de energía renovable, sustentabilidad y ambiente y el trabajo con mayor impacto es el relacionado con una propuesta de modelo de negocio mediante la exploración de las tecnologías de la I4.0 para permitir prácticas de economía circular en un contexto de fabricación, con un total de 435 citas.

El valor agregado que resulta de la aplicación de las tecnologías digitales en la eficiencia de los recursos y, por tanto, en el establecimiento de la economía circular, se traduce, principalmente, en la reducción de los tiempos de producción, la integración en la cadena de suministro, la flexibilidad de los procesos productivos, la reducción de residuos, la gestión de cuarta generación, reciclado de materiales de desechos y procesos de toma de decisiones, entre los más importantes.

Referencias

Aponte, G. (2022). Panorama internacional de la economía circular a través del análisis de la producción científica y tecnológica. *Revista Tekhné*, 25(1). 18-30.

<https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/5419>

Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M. y Sacconi, N. (2018). Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies.

Sustainability, 10(3), 639, 2-21. <https://doi.org/10.3390/su10030639>

Casado-Vara, R., Prieto, J., De la Prieta, F. y Corchado, J. M. (2018). How blockchain improves the supply chain: case study alimentary supply chain. *Procedia Computer Science*, 134, 393–398.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.193>

Dantas, T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodríguez, C. y Soares, S. R. (2021). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213-227.

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>

De Las Heras, A., Aguayo-Gonzalez, F., Córdoba-Roldan, A. (2018). Propuesta de marco de trabajo para la evaluación de la sostenibilidad de productos desde el paradigma de la economía circular basada en industria 4.0 (parte 1). *Rev. DYNA*, 93(4), 360-364. <https://doi.org/10.6036/8631>

Demestichas, K. y Daskalakis, E. (2020). Information and Communication Technology Solutions for the Circular Economy. *Sustainability*, 12(18), 7272. <https://doi.org/10.3390/su12187272>

Ellen Macarthur Foundation. (2023). *Circular economy introduction*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

Kirchherr, J., Reike, D. y Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Korhonen, J., Honkasalo, A. y Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P. y Li, J. (2020). The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Business Research*, 120, 241-261. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>

Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Landeta-Manzano, B. y Uriarte-Gallastegi, N. (2021). Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128944>

Lee, J., Davari, H., Singh, J. y Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>

Lens.org (2023). *About Lens*. <https://about.lens.org/>

Li, M. Y., Su, S. K., Philip-Wong, H. S. y Li, L. J. (2019). How 2D semiconductors could extend Moore's law. *Nature*, 567, 169-170. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00793-8>

Lopes de Sousa-Jabbour, A. B., Chiappetta-Jabbour, C. J., Godinho-Filho, M. y Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270, 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>

Luthra, S., Kumar, A., Zavadskas, E. K., Mangla, S. K. y Garza-Reyes, J. A. (2019). Industry 4.0 as an enabler of sustainability diffusion in supply chain: an analysis of influential strength of drivers in an emerging economy. *International Journal of*

Production Research, 58(5), 1505-1521.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1660828>

Ma, S., Zhang, Y., Liu, Y. Yang, H., Lv, J. y Ren, S. (2020). Data-driven sustainable intelligent manufacturing based on demand response for energy-intensive industries. *Journal of Cleaner Production*, 274(20), 123-155.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123155>

Magazzino, C, Mele, M, Schneider, N-. y Sarkodie, S. A. (2021). Waste generation, wealth and GHG emissions from the waste sector: Is Denmark on the path towards circular economy? *Science of the Total Environment*, 755, 142510.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142510>

Matos-Nascimento, D. L, Alencastro, V., Goncalves-Quelhas, O. L., Gusmão-Caiado, R. G., Garza-Reyes, J. A., Rocha-Lona, L. y Tortorella, G. (2018). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), 607-627. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0071>

Mavropoulos, A. y Waage, A. (2020). *Industry 4.0 and circular economy: Towards a Wasteless Future or a Wasteful Planet?* John Wiley & Sons Ltd. Croydon, United Kingdom.

Rajput, S. y Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49, 98–113.

<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002>

Rajput, S. y Singh, S. P. (2021). Industry 4.0 – challenges to implement circular economy. *Benchmarking: An International Journal*, 28(5), 1717-1739.

<https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2018-0430>

Rocca, R., Rosa, P., Sassanelli, C., Fumagalli, L. y Terzi, S. (2020). Circular Economy Practices: A Laboratory Application Case. *Sustainability*, 12(6), 2286.

<https://doi.org/10.3390/su12062286>

Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D. y Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662–1687.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>

Sarc, R., Curtis, A., Kandlbauer, L., Khodier, K., Lorber, K. E. y Pomberger, R. (2019). Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented. Waste Management -A review. *Waste Management*, 95, 476-492.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.035>

Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G. y Soto-Oñate, D. (2019). Operational Principles of Circular Economy for Sustainable Development: Linking

Theory and Practice. *Journal of Cleaner Production*, 214, 952-961.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.271>

Tavera-Romero, C. A., Castro, D. F., Ortiz, J. H., Khalaf, O. I. y Vargas, M. A. (2021). Synergy between Circular Economy and Industry 4.0: A Literature Review. *Sustainability*, 13(8), 4331. <https://doi.org/10.3390/su13084331>

Tseng, M. L., Tan, R., Chiu, S. F., Chien, C. F. y Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, 131,146-147. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.028>

Universidad de Málaga. (2023). *Bibliometría*. <https://biblioguias.uma.es/Bibliometria>

Wautelet, H. (2018). *The Concept of Circular Economy: its Origins and its Evolution*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17021.87523>

Xu, L. D., Xu, E. L. y 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>