

ADVANCES IN THE EFFICIENCY OF GREEN SUPPLY CHAINS IN INDUSTRIES, SYSTEMATIC REVIEW

Irene Anggi Sarmiento Castro¹; Miranda Ormeño Nonato²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, irenesarmientocastro27@gmail.com , miranda.or.no@gmail.com

Abstract– Growing concern about the environmental impact of industrial activities has driven the search for sustainable solutions, including implementing green supply chains (GSCM). This systematic review analyzes the efficiency of GSCMs in adopting sustainable practices in their logistics operations, focusing on using renewable energy and machine learning technologies. 80 investigations published between 2019 and 2023 that met the established inclusion criteria were selected from Scopus and Science Direct databases. Results show that Industry 4.0 technologies, such as the Internet of Things (IoT), Big Data analytics, and artificial intelligence, positively impact the efficiency and flexibility of GSCMs. These technologies make it possible to provide accurate data to predict and meet customer demands, leading to better economic performance. The study highlights the importance of considering three dimensions of sustainability (economic, environmental, and social) in the GSCM implementation process. Digitization and big data analytics enable accurate tracking of key performance indicators across each dimension, helping organizations proactively identify and address potential issues and improve overall performance across all business areas. However, implementing GSCM presents challenges, especially in the technological field. Analysis of the database revealed five key categories of challenges: economy, organization, environment, technology, and society. Technology accounted for 38% of the obstacles, underscoring the importance of technological innovation in achieving GSCM implementation. In conclusion, adopting Industry 4.0 technologies, such as IoT, is essential for developing efficient and GSCM. The study highlights the importance of prioritizing technological innovation to overcome the challenges of implementing GSCM and achieving transition toward a more sustainable production system.

Keywords– Green supply chains, industry 4.0, smart technologies, renewable energies, food industry, textile industry.

AVANCES EN LA EFICIENCIA DE LAS CADENAS DE SUMINISTROS VERDES EN LAS INDUSTRIAS: REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Irene Anggi Sarmiento Castro¹; Miranda Ormeño Nonato²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, irenesarmientocastro27@gmail.com, miranda.or.no@gmail.com

Resumen– La creciente preocupación por el impacto ambiental de las actividades industriales ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles, incluyendo la implementación de cadenas de suministro verdes (GSCM). Esta revisión sistemática de la literatura analiza la eficiencia de las GSCM al adoptar prácticas más sostenibles en sus operaciones logísticas, con enfoque en el uso de energías renovables y tecnologías de aprendizaje automático. Se analizó 948 investigaciones publicadas entre 2019 y 2023, en las bases de datos científicas Scopus y Science Direct. Se seleccionaron 80 artículos que cumplieron los criterios de inclusión establecidos. Los resultados muestran que las tecnologías de la Industria 4.0, como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de Big Data y la inteligencia artificial, tienen un impacto positivo en la eficiencia y flexibilidad de las GSCM. Estas tecnologías permiten proporcionar datos precisos para predecir y satisfacer las demandas de los clientes, lo que lleva a un mejor rendimiento económico. El estudio destaca la importancia de considerar las tres dimensiones de la sostenibilidad (económica, ambiental y social) en el proceso de implementación de GSCM. La combinación de la digitalización y el análisis de big data permite un seguimiento preciso de los indicadores clave de rendimiento en cada dimensión, lo que ayuda a las organizaciones a identificar y abordar problemas potenciales de manera proactiva y mejorar el rendimiento general en todas las áreas de la sostenibilidad. Sin embargo, la implementación de GSCM presenta desafíos, especialmente en el ámbito tecnológico. El análisis de la base de datos reveló cinco categorías clave de desafíos: economía, organización, medio ambiente, tecnología y sociedad. Se encontró que la categoría "Tecnología" representa el 38% de los obstáculos, lo que subraya la importancia de la innovación tecnológica para lograr una implementación exitosa de GSCM. En conclusión, la adopción de tecnologías de la Industria 4.0, como el IoT, es fundamental para el desarrollo de cadenas de suministro verdes más eficientes y sostenibles. El estudio destaca la importancia de priorizar la innovación tecnológica para superar los desafíos asociados a la implementación de GSCM y lograr una transición hacia un sistema de producción más sostenible.

Palabras clave– Cadenas de suministro verdes, industria 4.0, tecnologías inteligentes, energías renovables, industria alimentaria, industria textil.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, en el ámbito empresarial y académico se ha incrementado la importancia por el cuidado del medio ambiente y la sostenibilidad. Estas preocupaciones han dado lugar a buscar nuevas formas de reducir la huella medioambiental. Las industrias se ven obligadas a adoptar

nuevas alternativas para sus actividades productivas. Por tal motivo, resulta primordial que las cadenas de suministros adopten prácticas más sostenibles en sus operaciones logísticas [1]. En este contexto, el desafío se encuentra en analizar e investigar cómo lograr implementar cambios significativos en la cadena de suministro que logre aminorar la dependencia del uso de combustibles fósiles que imparten emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos.

La complejidad y los desafíos asociados con la transición de las cadenas de suministro que dependen de combustibles fósiles hacia el uso de energías renovables dentro de ellas queda esclarecida, sin embargo, actualmente ya existen empresas que intentan hacer uso de la industria 4.0 y de nuevas tecnologías dentro de sus procesos productivos, los cuales abarcan a las cadenas de suministro, para el aumento de la eficiencia, en el artículo [2] se aclara que la unión del internet, tecnologías de la nube e inalámbricas, al igual que el análisis predictivo pueden provocar cambios positivos en los procesos que conforman a la cadena de suministros así como generar mayores ingresos a la empresa, por otro lado, la implementación de otras tecnologías como el internet de las cosas o IoT, la digitalización del área logística, análisis de Big Data y el uso de la inteligencia artificial abren las puertas a incrementar los niveles de flexibilidad y eficiencia en las industrias [3]. Los estudios enfocados en la medición y registro de la eficiencia de las cadenas de suministros verdes apoyarán en el planteamiento de mejoras para completar exitosamente su implementación dentro de las industrias, existen fuentes que resaltan la importancia que tiene el combatir la degradación del medio ambiente y darle relevancia a la mejora sobre el impacto negativo en este mismo, esta se convirtió en una de las razones principales por la que en la actualidad las empresas sienten una presión por cambiar el tipo de energía que se usa en sus procesos y gestión.

En la presente revisión se pretende dar a entender las utilidades y ventajas que puede llegar a ofrecer la implementación de una herramienta moderna y amigable con el ambiente para todo tipo de procesos dentro de las industrias de cualquier ámbito. Por esta razón, el objetivo de este documento es conocer de qué manera se demuestra o registra la eficiencia en las cadenas de suministro verde, las mismas que hacen uso de tecnologías de aprendizaje automático que

forman parte de la industria 4.0 convirtiendo a estas cadenas en herramientas novedosas y útiles que pueden llegar a ofrecer crecimiento en la eficiencia en los procesos de todo tipo de industrias.

En relación con esto, la presentación de esta revisión está dada de la siguiente manera, en la segunda parte del documento se describe la metodología y proceso que se llevó a cabo para la búsqueda, limitación y selección de data utilizada para el desarrollo e investigación de esta RSL, continuando con la tercera parte encontraremos el desarrollo del análisis de todos aquellos documentos finalistas sobre el tipo de tecnologías aplicadas al desarrollo de cadenas de suministros verdes y el funcionamiento de estas en los distintos tipos de industrias.

II. METODOLOGÍA

El presente estudio de investigación busca desarrollar una revisión sistemática de la literatura sobre la eficiencia de las cadenas de suministro verdes en el sector industrial, para el desarrollo de esta revisión sistemática (RSL) no se realizó un meta análisis, en su lugar se decidió hacer uso de la metodología PICOC, donde se optó por utilizar cuatro de los cinco componentes, se empezó planteando a la cadena de suministro verde como el problema (P) usando como palabras clave: *green industry*, *circular economy* y *green supply chain*, seguido de la intervención (I) que es la tecnología de aprendizaje automático y se usaron palabras clave como: *machine learning technology*, *research methodology* e *industry 4.0*, continuando con los resultados (O) que se verán reflejados en la eficiencia de la implementación de energías renovables y cuyas palabras claves fueron *sustainable management*, *sustainable manufacturing* y *efficiency improvement*. Finalmente se consideró como contexto (C) la industria manufacturera y la palabra clave utilizada en este último componente fue *industry*.

A partir de lo anterior, se continuó el proceso de la metodología planteando la pregunta PICO principal utilizando todos los componentes excepto la comparación: ¿Qué tecnologías de aprendizaje automático se utilizan para una eficiente implementación de energías renovables dentro de las cadenas de suministro verdes en el sector industrial? Y posteriormente se formularon cuatro sub preguntas, una por cada componente utilizado, la primera pregunta, referida al problema fue: ¿Cómo funciona una cadena de suministro verde? seguida de la pregunta de intervención: ¿En qué consisten las tecnologías de aprendizaje automático aplicadas en las cadenas de suministros verdes?, la penúltima pregunta enfocada a los resultados se planteó de la siguiente manera: ¿Cuáles son los niveles de eficiencia que se han registrado durante el uso de energías renovables en las cadenas de suministros? Y, por último, ¿Qué tipo de industria comúnmente busca la implementación de cadena de suministros verdes? Refiriéndose al contexto aplicado.

El día 29 de abril del 2024 se realizó la búsqueda utilizando las siguientes ecuaciones, para la base de datos Science Direct se empleó: ("circular economy" OR "Green Supply Chain" OR "green industry")("machine learning technology" OR "Research methodology" OR "INDUSTRY 4.0")("Sustainable management" OR "Sustainable Manufacturing" OR "efficiency improvement" OR "industry".

Para la base de datos de Scopus se empleó la siguiente ecuación de búsqueda: "circular economy" OR "Green Supply Chain" OR "green industry" OR "Sustainable management" OR "Sustainable Manufacturing" OR "efficiency improvement" OR "machine learning technology" OR "Research methodology" OR "INDUSTRY 4.0" OR "industry", una vez eliminados los resultados duplicados se obtuvo un resultado total de 922 publicaciones.

Para el proceso de selección de artículos científicos en método PRISMA se establecieron tres criterios de inclusión que permitieron alinear y delimitar la búsqueda con el objetivo de la investigación. Se definió como criterio 1 (CI1) la selección de estudios que describen el funcionamiento de las cadenas de suministro verdes, como criterio 2 (CI2) la selección de estudios que describen el uso de tecnologías de aprendizaje automático en las cadenas de suministro verde y finalmente como criterio 3 (CI3) la selección de estudios que poseen datos estadísticos y/o registros de los niveles de eficiencia durante el uso de las energías renovables en las cadenas de suministro verdes. Asimismo, se plantearon dos criterios de exclusión como parámetros para determinar que estudios no serán incluidos en la revisión sistemática. Como criterio 1 (CE1) se excluyeron artículos de investigación publicados antes del año 2020 y como criterio 2 (CE2), estudios que no corresponden al tipo de investigación de revisiones sistemáticas de literatura.

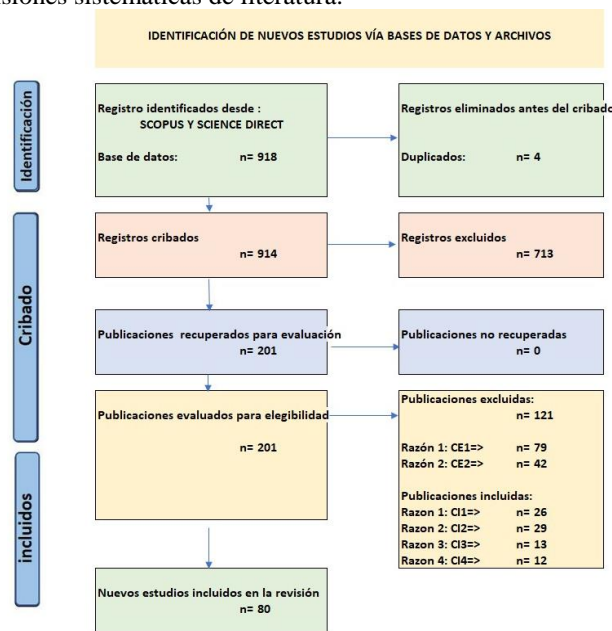


Fig. 1. Diagrama PRISMA

II. RESULTADOS

Para este estudio se empleó el modelo de revisión sistemática PRISMA. Se recopilaron un total de 922 artículos de investigación publicados en bases de datos científicas de alto impacto como Scopus y Science Direct, de las cuales se excluyeron 4 artículos por duplicidad. Los 914 estudios restantes pasaron un proceso de cribado mediante una lectura minuciosa del título y resumen para determinar la utilidad de la fuente en la investigación. En este proceso se excluyeron 713 estudios que no cumplieron con las consideraciones necesarias para la revisión sistemática.

Posteriormente, se validó la disponibilidad y recuperación del texto completo de los 201 artículos restantes. Para lo cual, se aplicaron los criterios de elegibilidad: cuatro criterios de inclusión, donde se identificaron 80 artículos que cumplieron con los criterios indicados (CI1=26, CI2=29, CI3=13, CI4=12) y de igual forma para los dos de exclusión, que permitieron eliminar 125 artículos: (CE1=79, CE2=46). Finalmente, tras esta selección preliminar, se obtuvieron un total de 80 artículos base para el análisis de la eficiencia de la cadena de suministro verde.

En la figura 2 se presenta la distribución geográfica de las publicaciones en relación a la gestión de las cadenas de suministro verde durante los últimos cinco años. En ese escenario, China destaca como líder en la investigación de integrar prácticas sostenibles, representando el 18% del total de las publicaciones. En comparación, países como Canadá, Estados Unidos, Colombia, Taiwán, Bangladesh, Chile, Finlandia, Alemania, Italia y Reino Unido representan únicamente el 0.3% del total indicando una menor participación en la investigación.

La figura 3 evidencia el número de investigaciones sobre la implementación de la GSCM publicadas entre 2019 y 2023. Se observa que el número de publicaciones ha aumentado significativamente en los últimos cinco años, alcanzando un máximo de once publicaciones en 2022. Esto sugiere una creciente conciencia ambiental global y la necesidad de prácticas sostenibles con tecnologías limpias en el entorno industrial.

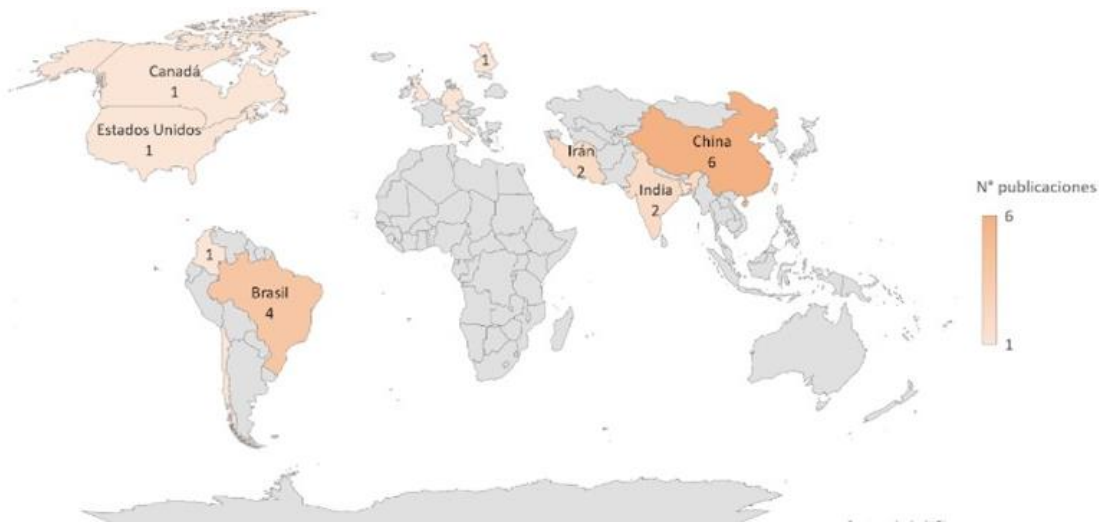


Fig. 2. Publicaciones de GSCM por país

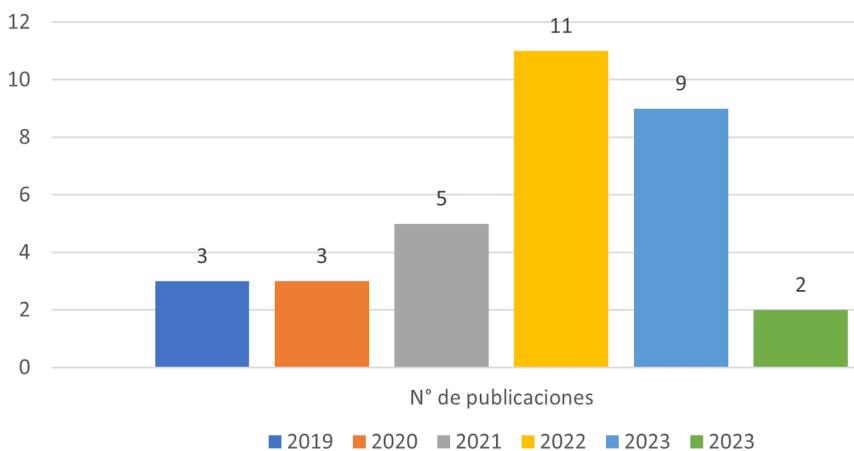


Fig. 3. Publicaciones de GSCM por año (2019-2023)

La revisión de los artículos publicados de forma cronológica demuestra cómo la definición de una cadena de suministro verde o sostenible ha evolucionado a lo largo del tiempo. La figura 4 ilustra cómo los artículos leídos que incluyen estos avances se distribuyen en diferentes años de publicación. Se ha registrado una evolución en la cadena de suministros a lo largo de estos últimos años junto al uso o implementación de nuevas herramientas digitales [4,5] asimismo, se han ido implementando estrategias que ayudan a minimizar el daño y desperdicios que puedan causar las industrias en sus procesos, a su vez, estos últimos necesitan ser evaluados [6,7]. A través del tiempo se fueron implementando herramientas de última tecnología ayudando a monitorear tiempos, condiciones operativas, recursos de la producción, entre otros factores que ayudan a agilizar procesos industriales [8–10]. Al mismo tiempo, en [11–16] se deja claro que el uso y la madurez que puedan llegar a tener las nuevas tecnologías ayuda a preservar la sostenibilidad en los procesos que

conlleva la cadena de suministros verdes, así como la importancia que tienen las instituciones con perspectivas más amplias para tocar el aspecto de la mejora y preocupación por el cuidado del ambiente, a pesar de estos avances registrados, la falta de comprensión por ciertos procesos dentro de la industria aún está presente. Según [17,18] además de aclarar que la gestión de residuos forma parte de la lista de problemas o desafíos para una correcta implementación de la cadena de suministros sostenible, las soluciones a problemas como el mencionado anteriormente se encuentra en manos de la evolución en tecnologías o fabricación de nuevas herramientas que ayuden al crecimiento o mantenimiento de la sostenibilidad. En [19] se apoya y reitera la idea de que el uso de las tecnologías puede ayudar a desarrollar cadenas de suministros no solo amigables con el ambiente si no más confiables con la gestión de los procesos en las industrias que busquen implementarlas.

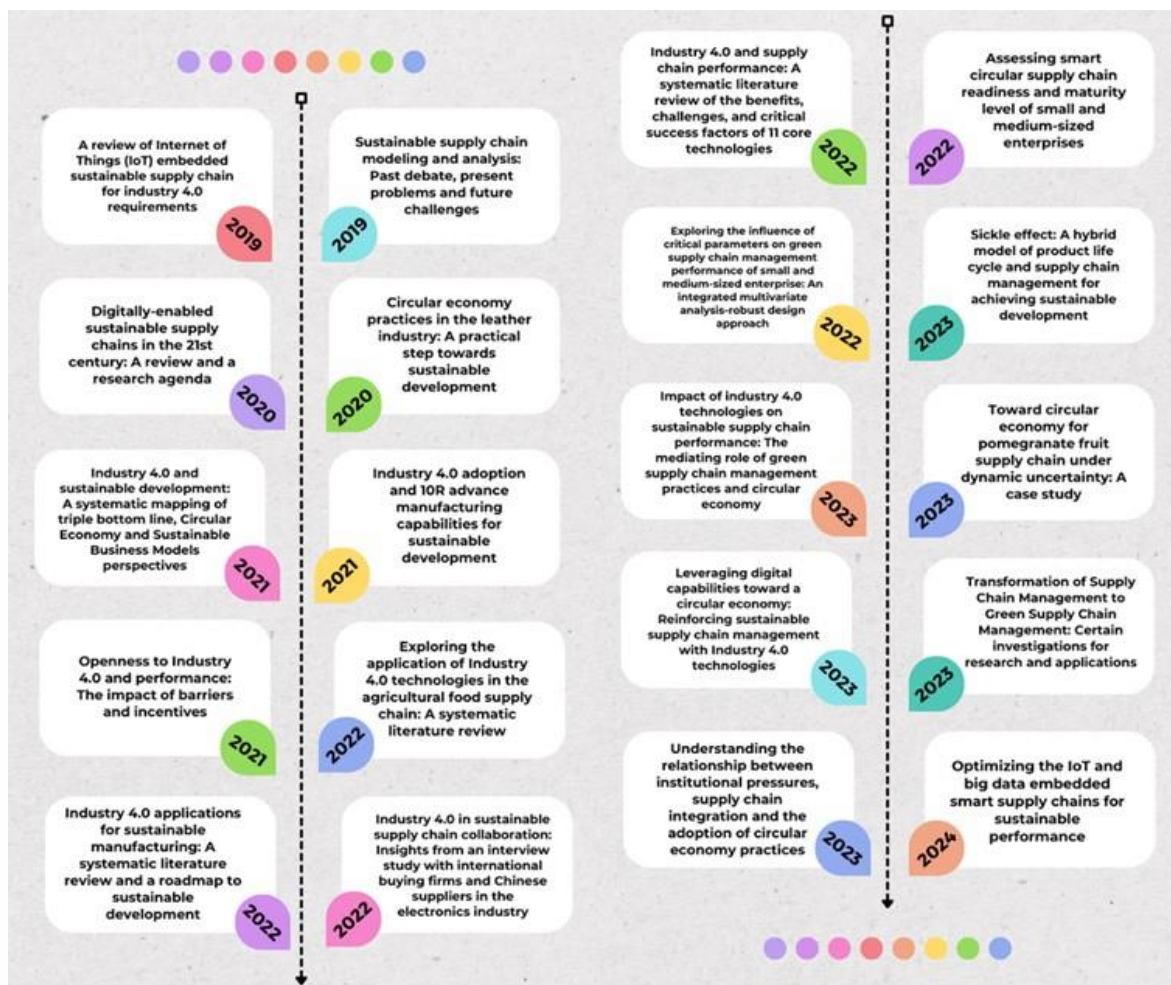


Fig. 4. Cronología de publicaciones sobre GSCM

La implementación de las cadenas de suministro verdes se caracteriza por la utilización de nuevas tecnologías. Por medio del análisis de los artículos leídos se reconoció a la tecnología IoT como la más utilizada en la implementación de las cadenas de suministros verdes, que sugiere una mayor adopción de esta en el sector industrial y al mismo tiempo se evidencia que el

aprendizaje automático es la tecnología menos utilizada en el desarrollo de esta herramienta en diversos procesos (ver figura 5). La implementación de nuevas tecnologías también implica desafíos y para esto se requiere desarrollar herramientas que ayuden a obtener en conjunto una buena gestión e implementación de la cadena de suministros verde [20].

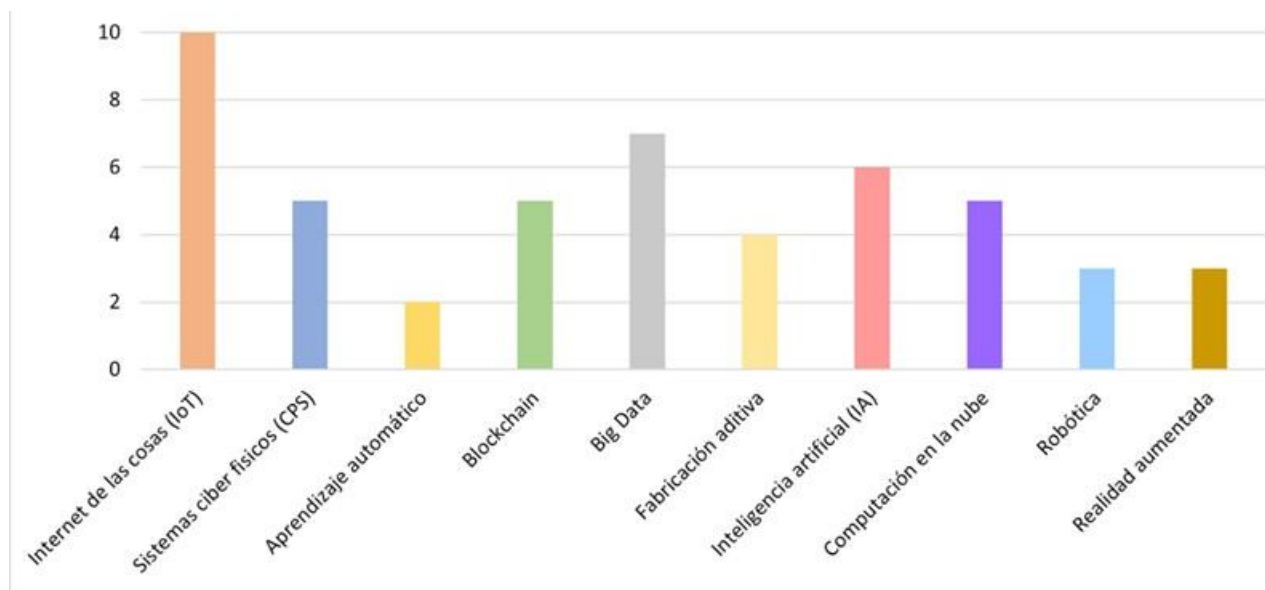


Fig. 5. Tendencias tecnológicas en GSCM

A continuación, se presenta la frecuencia de implementación de cadenas de suministro verdes en diferentes industrias. La industria manufacturera abarca toda la producción para el consumo y presenta el mayor índice de adopción con un 24,24%. La industria cosmética y la automotriz cuentan con un 3,03% y muestran una menor tasa de implementación debido a la dificultad de integrar prácticas ecológicas en sus procesos. Sin embargo, se observa un esfuerzo creciente por desarrollar cadenas de suministro verdes en estas industrias (Ver figura 6). El fomentar la implementación de herramientas digitales por parte de todos los tipos de industrias en sus cadenas de suministros sostenible puede provocar el aumento de ganancias para todas ellas y a sus proveedores a nivel mundial [21].

El análisis de la base de datos permitió identificar y agrupar la información en cinco categorías clave que reflejan los desafíos de la implementación de GSCM: economía, organización, medio ambiente, tecnología y sociedad. Se

revela que la implementación de cadenas de suministro verdes exige una transformación profunda, incluyendo la adopción de tecnologías avanzadas, la gestión de la sostenibilidad, la colaboración entre las empresas, el cambio cultural y la gestión de la incertidumbre. La figura 8 muestra que la categoría más desafiante para la implementación de GSCM es la Tecnología, representando el 38% de los desafíos. Este hallazgo sugiere que las empresas deben priorizar los cambios tecnológicos para lograr una implementación exitosa de las cadenas de suministro verdes, lo que confirma la importancia de la innovación tecnológica para alcanzar los objetivos de sostenibilidad en la cadena de suministro (Ver figura 7 y 8). Además, se tiene que considerar a las cadenas de suministros verdes como una herramienta que ayuda a la mejora de la economía, medio ambiente y sociedad, a su vez, apoya a la optimización del flujo de información mejorando la coordinación en los procesos [22].

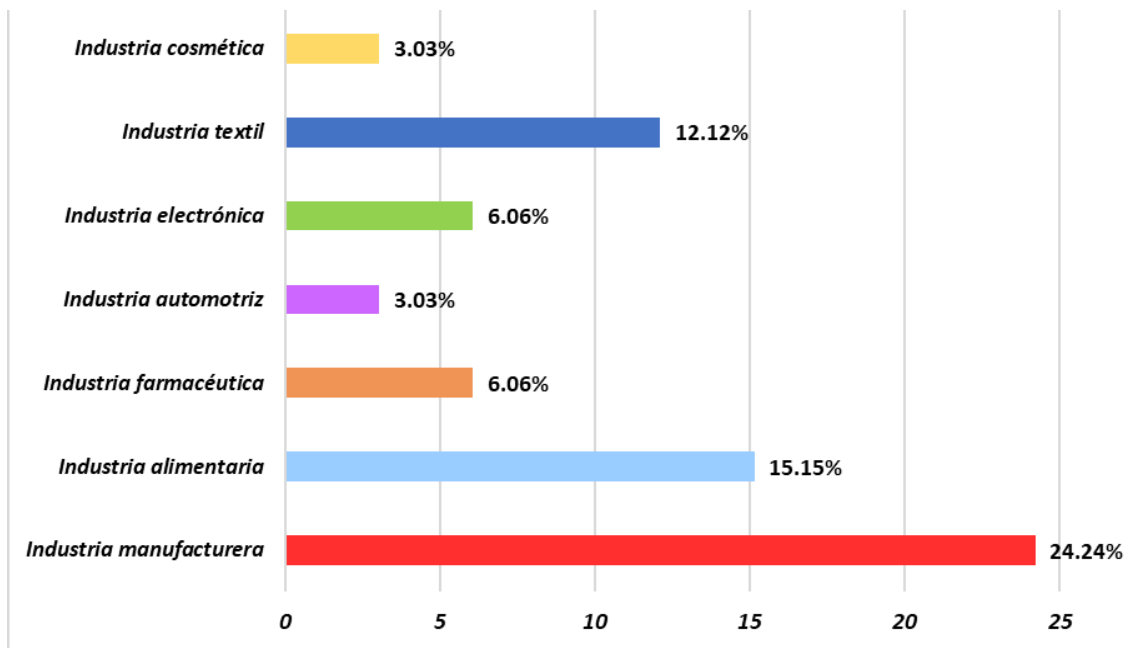


Fig. 6. Adopción de prácticas de cadenas de suministros verde por sector

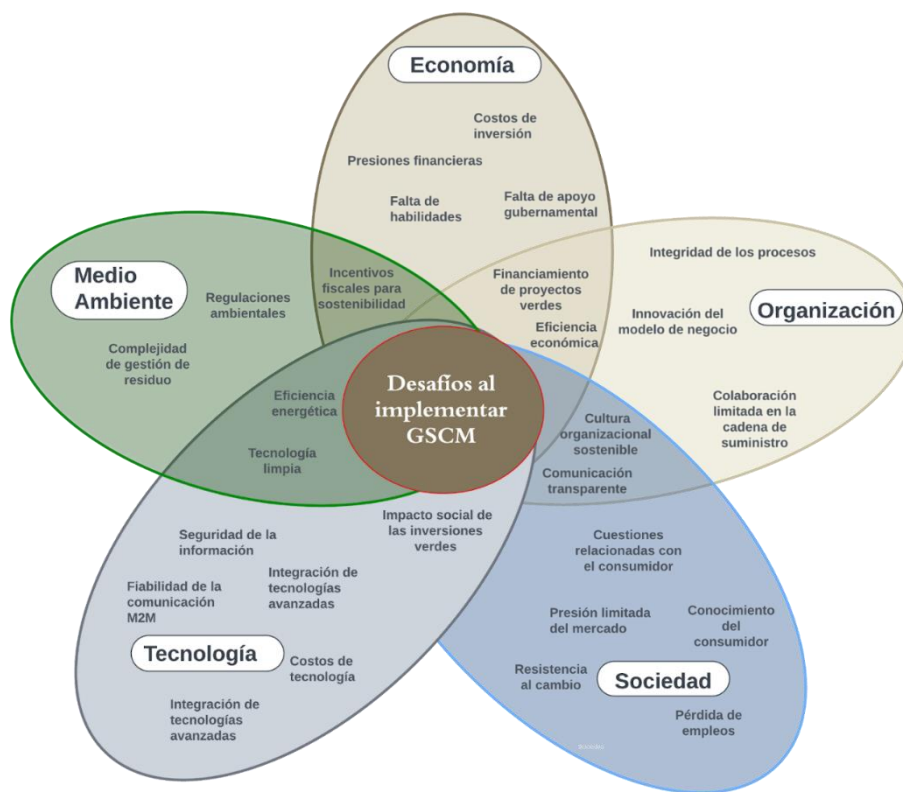


Fig. 7. Principales desafíos para la implementación GSCM

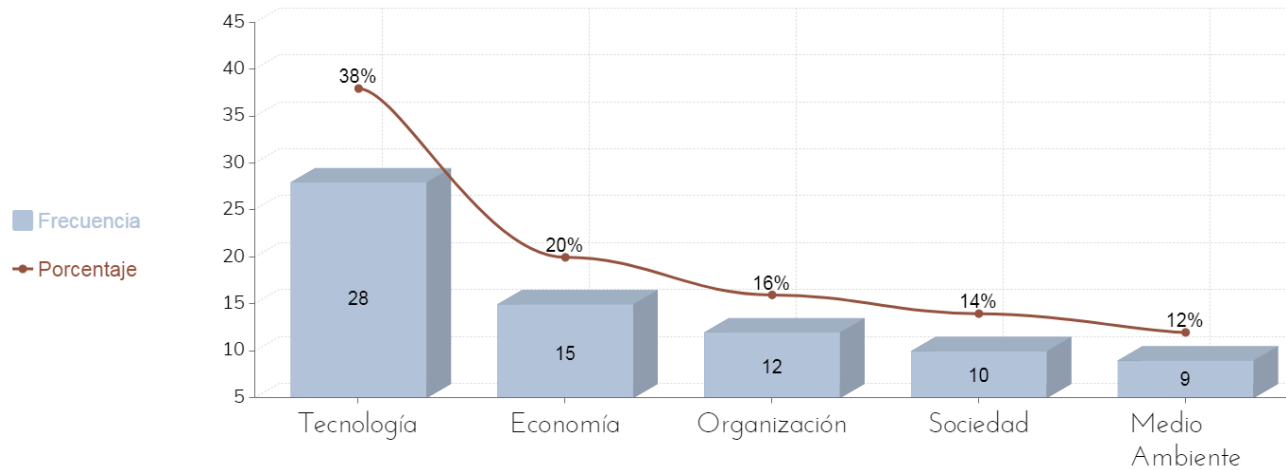


Fig. 8. Desafíos de la GSCM por categoría

El diagrama de flujo (ver figura 9) permite destacar las dos etapas cruciales para la aplicación de una cadena de suministro verde: se visualiza GSCM en el contexto actual y la preparación empresarial hacia una implementación de la cadena de suministro verde. Además, se visualiza un proceso

de transformación gradual hacia la cadena de suministro verde, compuesto por etapas de evaluación de la preparación empresarial. Este análisis resalta la importancia de la evaluación de la preparación empresarial para alcanzar los objetivos de sostenibilidad en la cadena de suministro.

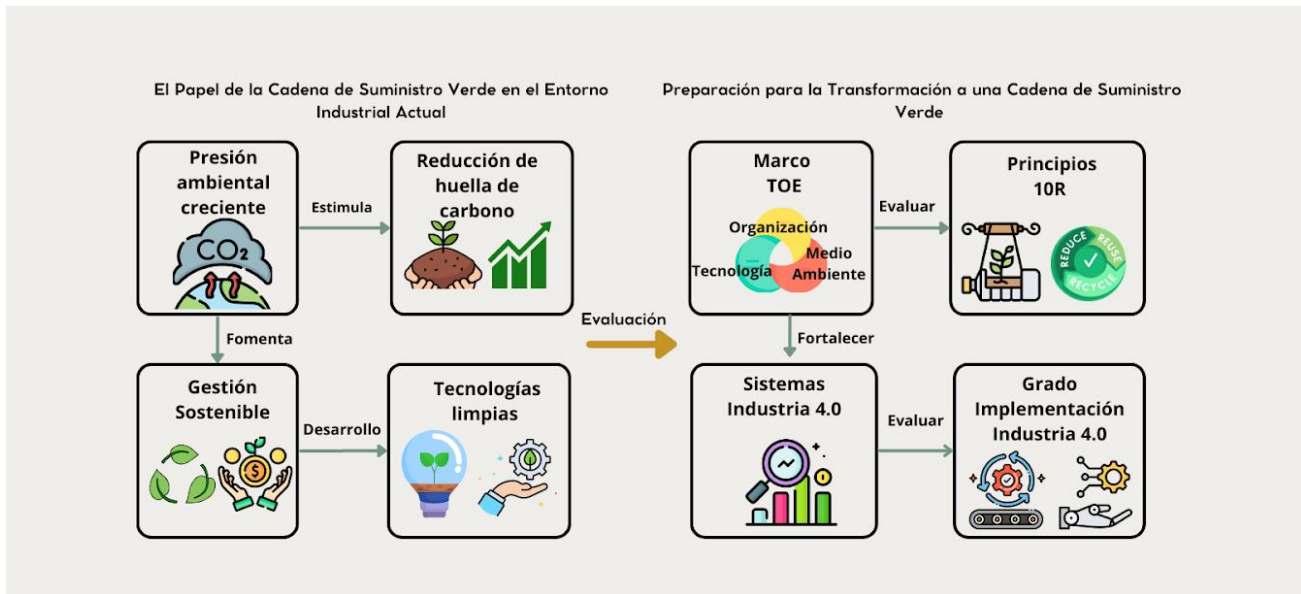


Fig. 9. Transformación hacia la cadena de suministros verde

II. DISCUSIÓN

Los resultados de la investigación revelan la influencia positiva de la industria 4.0 y las nuevas tecnologías, como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de Big Data y la inteligencia artificial, para la mejora de la eficiencia y flexibilidad de las cadenas de suministro verdes. Estos hallazgos subrayan que las tecnologías digitales pueden mejorar el rendimiento de la GSCM al proporcionar datos

abundantes del mercado y de los productos, lo que permite a las empresas predecir y satisfacer con precisión las demandas de los clientes, mejorando así el rendimiento económico.

Las investigaciones coinciden que la información y la conectividad proporcionadas por las tecnologías digitales, como el IoT permiten a las empresas optimizar la gestión de la cadena de suministro, reducir el inventario y los costes de transporte, mejorando la eficiencia en la utilización de los recursos. Sin embargo, [23] también destaca la importancia de

considerar las tres dimensiones de la sostenibilidad: económica, ambiental y social. La digitalización, combinada con el análisis de big data, permite un seguimiento preciso de los indicadores clave de rendimiento en cada una de estas dimensiones, lo que permite a las organizaciones abordar los problemas potenciales de manera proactiva y mejorar el rendimiento general.

Si bien los estudios revisados ofrecen una visión optimista sobre el potencial de la industria 4.0 para mejorar la sostenibilidad, es importante destacar que es crucial considerar las limitaciones. Por ejemplo, estudios se enfocan en el contexto chino, por lo que sus resultados podrían no ser generalizables a otros países. Además, se requiere investigación adicional para evaluar el impacto a largo plazo de estas tecnologías y para analizar la viabilidad económica de su implementación en diferentes sectores y tamaños de empresas. En suma, los estudios analizados sugieren que la industria 4.0 tiene un papel fundamental en el desarrollo de cadenas de suministro verdes más eficientes y sostenibles. Sin embargo, es necesario seguir investigando para comprender mejor las implicaciones de esta tecnología en el contexto global y para asegurar que se aproveche al máximo su potencial para promover la sostenibilidad y el bienestar de las personas y el planeta.

II. CONCLUSIÓN

La presente investigación se centró en realizar una revisión sistemática de la literatura sobre la eficiencia de las cadenas de suministro verdes (GSCM) en las industrias. Los resultados revelan un creciente interés en la implementación de GSCM evidenciado por el aumento de publicaciones sobre el tema entre 2019 y 2023. En ese frente, China lidera la investigación en este campo, y la tecnología IoT se posiciona como la más utilizada en la implementación de GSCM, mientras que el aprendizaje automático presenta una menor adopción. El principal desafío para la implementación de GSCM reside en la tecnología, seguida de la gestión de la sostenibilidad y la colaboración entre empresas. Estos resultados proporcionan una visión global sobre la eficiencia de las GSCM en las industrias permitiendo a las empresas comprender el panorama actual y tomar decisiones informadas sobre su implementación.

La investigación presenta ciertas limitaciones, como la exclusión de estudios publicados antes del año 2020. Adicionalmente, se recomienda explorar otras tecnologías emergentes y su impacto en las cadenas de suministro verdes, realizar estudios longitudinales que analicen el impacto a largo plazo de las energías renovables y tecnologías de aprendizaje automático, e investigar la viabilidad económica y los desafíos de integración de estas tecnologías en pequeñas y medianas empresas. El estudio realizado destaca la importancia de las GSCM para la sostenibilidad y la competitividad en las industrias. Por ello, es fundamental seguir investigando y desarrollando estrategias para superar los desafíos y

aprovechar las oportunidades que ofrece la implementación de GSCM.

REFERENCIAS

- [1] Bernal JPG, Castro JAO, Mantilla CEM. The Sustainable Supply Chain: Concepts, Optimization and Simulation Models, and Trends. Vol. 25, Ingeniería (Colombia). Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas; 2020. p. 355–77.
- [2] Manavalan E, Jayakrishna K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Comput Ind Eng.* 2019 Jan 1;127:925–53.
- [3] Abideen AZ, Pyeman J, Sundram VPK, Tseng ML, Sorooshian S. Leveraging capabilities of technology into a circular supply chain to build circular business models: A state-of-the-art systematic review. Vol. 13, Sustainability (Switzerland). MDPI AG; 2021.
- [4] Nara EOB, da Costa MB, Baierle IC, Schaefer JL, Benitez GB, do Santos LMAL, et al. Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of Brazil's plastic industry. *Sustain Prod Consum* [Internet]. 2021;25:102–22. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550920305212>
- [5] Ghadimi P, Wang C, Lim MK. Sustainable supply chain modeling and analysis: Past debate, present problems and future challenges. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2019;140:72–84. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134491830332X>
- [6] Moktadir MdA, Ahmadi HB, Sultana R, Zohra FT, Liou JJH, Rezaei J. Circular economy practices in the leather industry: A practical step towards sustainable development. *J Clean Prod* [Internet]. 2020;251:119737. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619346074>
- [7] Yadav VS, Singh AR, Raut RD, Mangla SK, Luthra S, Kumar A. Exploring the application of Industry 4.0 technologies in the agricultural food supply chain: A systematic literature review. *Comput Ind Eng* [Internet]. 2022;169:108304. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835222003631>
- [8] Ching NT, Ghobakhloo M, Iranmanesh M, Maroufkhani P, Asadi S. Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: A systematic literature review and a roadmap to sustainable development. *J Clean Prod* [Internet]. 2022;334:130133. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621042992>
- [9] Kunkel S, Matthess M, Xue B, Beier G. Industry 4.0 in sustainable supply chain collaboration: Insights from an interview study with international buying firms and Chinese suppliers in the electronics industry. *Resour Conserv Recycl* [Internet]. 2022;182:106274. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922001227>
- [10] Rad FF, Oghazi P, Palmié M, Chirumalla K, Pashkevich N, Patel PC, et al. Industry 4.0 and supply chain performance: A systematic literature review of the benefits, challenges, and critical success factors of 11 core technologies. *Industrial Marketing Management* [Internet]. 2022;105:268–93. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001985012200147X>
- [11] Kayikci Y, Kazancoglu Y, Gozacan-Chase N, Lafci C, Batista L. Assessing smart circular supply chain readiness and maturity level of small and medium-sized enterprises. *J Bus Res* [Internet]. 2022;149:375–92. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014829632200474X>
- [12] Ghosh S, Chandra Mandal M, Ray A. Exploring the influence of critical parameters on green supply chain management performance of small and medium-sized enterprise: An integrated multivariate analysis-robust design approach. *Cleaner Logistics and Supply Chain* [Internet]. 2022;4:100057. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390922000300>
- [13] Rahul V, Rajan U. Sickle effect: A hybrid model of product life cycle and supply chain management for achieving sustainable development.

- Mater Today Proc [Internet]. 2023; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323034326>
- [14] Karmaker CL, Aziz R Al, Ahmed T, Misbauddin SM, Moktadir MdA. Impact of industry 4.0 technologies on sustainable supply chain performance: The mediating role of green supply chain management practices and circular economy. *J Clean Prod* [Internet]. 2023;419:138249. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623024071>
- [15] Kalantari Khalil Abad AR, Barzinpour F, Pishvaei MS. Toward circular economy for pomegranate fruit supply chain under dynamic uncertainty: A case study. *Comput Chem Eng* [Internet]. 2023;178:108362. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135423002326>
- [16] Liu L, Song W, Liu Y. Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Comput Ind Eng* [Internet]. 2023;178:109113. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835223001377>
- [17] Saini N, Malik K, Sharma S. Transformation of Supply Chain Management to Green Supply Chain Management: Certain investigations for research and applications. *Cleaner Materials* [Internet]. 2023;7:100172. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397623000059>
- [18] Calzolari T, Bimpizas-Pinis M, Genovese A, Brint A. Understanding the relationship between institutional pressures, supply chain integration and the adoption of circular economy practices. *J Clean Prod* [Internet]. 2023;432:139686. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623038441>
- [19] Pratap S, Jauhar SK, Gunasekaran A, Kamble SS. Optimizing the IoT and big data embedded smart supply chains for sustainable performance. *Comput Ind Eng* [Internet]. 2024;187:109828. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835223008525>
- [20] Chiappetta Jabbour CJ, Fiorini PDC, Ndubisi NO, Queiroz MM, Piató ÉL. Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Science of The Total Environment* [Internet]. 2020;725:138177. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720316909>
- [21] Agarwal A, Ojha R. Prioritizing implications of Industry-4.0 on the sustainable development goals: A perspective from the analytic hierarchy process in manufacturing operations. *J Clean Prod* [Internet]. 2024;444:141189. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262400636X>
- [22] Rajput S, Singh SP. Connecting circular economy and industry 4.0. *Int J Inf Manage* [Internet]. 2019;49:98–113. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401218311599>
- [23] Tao Z, Chao J. Unlocking new opportunities in the industry 4.0 era, exploring the critical impact of digital technology on sustainable performance and the mediating role of GSCM practices. *Innovation and Green Development* [Internet]. 2024 Sep 1;3(3):100160. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2949753124000377>