



Esta obra está publicada bajo una licencia [CC BY 4.0 DEED](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Fecha de recepción: 06.05.2024 | Fecha de aceptación: 31.07.2024 | Fecha de publicación: 15.08.2024

## El Impacto de la Aplicación de la Tecnología de Gemelos Digitales en la Cadena de Suministro 4.0: Una Revisión Sistemática

### The Impact of the Application of Digital Twin Technology in Supply Chain 4.0: A Systematic Review

Luis Javier Castillo Rabanal<sup>1</sup>; Alexander Saúl Huamanchumo Gordillo<sup>1</sup>; María Alexandra Lecca Rengifo<sup>1\*</sup>

\* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

Autor de correspondencia: [t1033300321@unitru.edu.pe](mailto:t1033300321@unitru.edu.pe)

#### RESUMEN

En la era de la Industria 4.0, la digitalización y la conectividad están revolucionando las cadenas de suministro a través de la tecnología de gemelos digitales. Estos son representaciones virtuales de objetos, procesos o sistemas físicos, permitiendo a las organizaciones monitorizar, simular y optimizar sus operaciones en tiempo real. Los gemelos digitales mejoran la visibilidad, la transparencia, y la eficiencia, facilitando la predicción y mitigación de riesgos. No obstante, su implementación presenta desafíos como la integración de datos, la infraestructura tecnológica y la seguridad. Esta tecnología promete revolucionar las operaciones de la cadena de suministro, llevándolas a nuevos niveles de eficiencia y resiliencia.

**Palabras Clave:** *compatibilidad, gemelos digitales, cadena de suministro, industria 4.0.*

#### ABSTRACT

In the era of Industry 4.0, digitalization and connectivity are revolutionizing supply chains through digital twin technology. These are virtual representations of physical objects, processes, or systems, allowing organizations to monitor, simulate, and optimize their operations in real time. Digital twins enhance visibility, transparency, and efficiency, facilitating risk prediction and mitigation. However, their implementation presents challenges such as data integration, technological infrastructure, and security. This technology promises to revolutionize supply chain operations, taking them to new levels of efficiency and resilience.

**Keyword:** *digital twins, supply chain, industry 4.0.*

## 1. Introducción

En la era de la Industria 4.0, la digitalización y la conectividad están revolucionando la manera en que las cadenas de suministro operan y gestionan sus procesos. Una de las innovaciones tecnológicas más destacadas en este contexto es la tecnología de gemelos digitales [1]. Son representaciones virtuales de objetos, procesos o sistemas físicos, que permiten a las organizaciones monitorizar, simular y optimizar sus operaciones en tiempo real. Esta tecnología se basa en la recopilación y análisis de grandes volúmenes de datos provenientes de sensores y dispositivos IoT, lo que posibilita una comprensión profunda y detallada de cada aspecto de la cadena de suministro [2]. La cadena de suministro 4.0, caracterizada por su alta integración tecnológica, busca mejorar la eficiencia, la visibilidad y la flexibilidad a través de la adopción de tecnologías avanzadas [3]. Los gemelos digitales juegan un papel crucial en este contexto al permitir una interconexión perfecta entre el mundo físico y el digital [4]. Gracias a estos modelos virtuales, las empresas pueden prever problemas, optimizar rutas de transporte, gestionar inventarios de manera más eficiente y tomar decisiones informadas basadas en datos precisos y actualizados [5].

Uno de los principales beneficios de los gemelos digitales en la cadena de suministro es su capacidad para mejorar la visibilidad y la transparencia. Al tener una representación digital de cada componente de la cadena de suministro, las organizaciones pueden monitorear en tiempo real el estado de sus operaciones, identificar cuellos de botella y áreas de mejora, y responder rápidamente a cualquier cambio o imprevisto [6]. Esta visibilidad mejorada no solo facilita una gestión más eficiente de los recursos, sino que también permite una mejor colaboración y coordinación entre los diferentes actores de la cadena de suministro [7]. Además, los gemelos digitales facilitan la predicción y la mitigación de riesgos. Utilizando modelos de simulación avanzados, las empresas pueden anticipar posibles problemas antes de que ocurran y desarrollar estrategias para mitigarlos [8]. Esto no solo mejora la resiliencia de la cadena de suministro, sino que también reduce los costos asociados con interrupciones y retrasos [9].

La optimización es otro aspecto clave donde los gemelos digitales aportan un valor significativo [10]. A través del análisis continuo de datos, estos modelos pueden identificar oportunidades para mejorar la eficiencia operativa, reducir el consumo de recursos y minimizar los desperdicios [11]. Sin embargo, la implementación de gemelos digitales en la cadena de suministro también presenta desafíos significativos [12]. Uno de los principales retos es la integración de datos provenientes de diversas fuentes y sistemas [13]. La calidad y la consistencia de los datos son cruciales para el funcionamiento efectivo de los gemelos digitales, y cualquier inconsistencia o error en los datos puede llevar a resultados inexactos y decisiones erróneas [14]. Además, la infraestructura tecnológica necesaria para soportar los gemelos digitales puede ser costosa y compleja de implementar, especialmente para las pequeñas y medianas empresas [15]. La seguridad y la privacidad de los datos también son preocupaciones importantes [16]. La recopilación y el análisis de grandes volúmenes de datos sensibles requieren medidas robustas de ciberseguridad para proteger contra posibles ataques y brechas de datos [17]. Las empresas deben garantizar que sus sistemas de gemelos digitales cumplan con las

regulaciones de protección de datos y que se implementen prácticas adecuadas de gestión de datos para salvaguardar la información confidencial [18].

La tecnología de gemelos digitales representa una innovación transformadora en la cadena de suministro 4.0, ofreciendo numerosas ventajas en términos de visibilidad, optimización y gestión de riesgos [19]. No obstante, su adopción e implementación efectiva requieren una planificación cuidadosa, una infraestructura adecuada y una gestión rigurosa de datos [20]. A medida que las empresas continúan explorando y adoptando esta tecnología, es fundamental abordar los desafíos asociados y desarrollar estrategias que maximicen los beneficios y minimicen los riesgos [21]. Con un enfoque adecuado, los gemelos digitales tienen el potencial de revolucionar las operaciones de la cadena de suministro y llevarlas a nuevos niveles de eficiencia y resiliencia [22].

## **2. Metodología**

Se desarrolló un análisis bibliográfico con apoyo de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Según Page et al. (2021) la metodología PRISMA facilita la replicación y las actualizaciones de revisión, por lo que conduce a una presentación de informes más transparentes, completos y precisos. El enfoque de esta metodología permitirá abordar y responder nuestra pregunta planteada a continuación: ¿Cuál es el impacto que tienen los gemelos digitales en la cadena de suministro 4.0?.

### **Criterios de inclusión y exclusión**

Para seleccionar los trabajos, se utilizaron criterios de inclusión y exclusión que permitan garantizar veracidad, credibilidad y calidad de la información recogida. Los criterios son los siguientes:

Se utilizaron como criterios de inclusión los trabajos disponibles online en las bases de datos disponibles a nuestro alcance, por su alto reconocimiento en calidad de trabajos académicos publicados, con una antigüedad no mayor a 6 años, es decir, desde el 2019 al presente año (2024), relacionada con la cadena de suministros y la aplicación de tecnología de gemelos digitales para permitir una alta concordancia en la recopilación de la información.

Paralelamente se utilizaron criterios de exclusión, descartar trabajos que no tengan relación alguna con el tema de investigación en cuestión, así mismo, dejar fuera otros trabajos de revisión sistemática para que no exista redundancia de información.

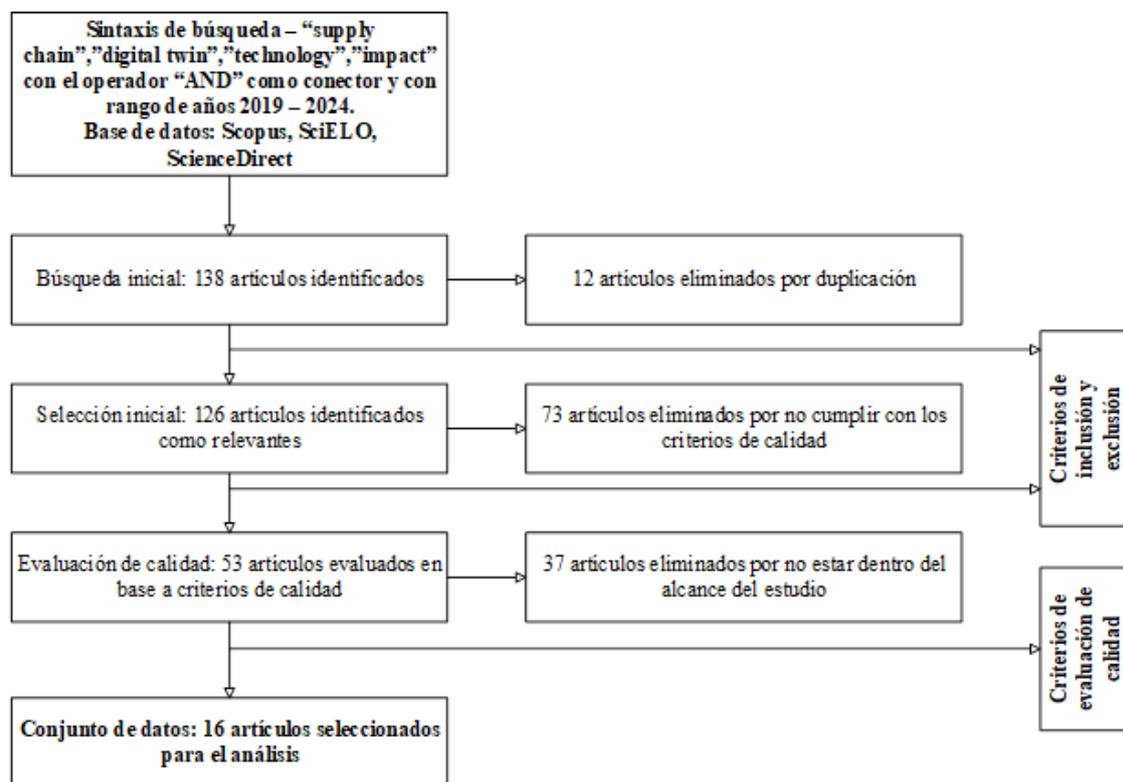
### **Estrategia de búsqueda**

Para buscar, encontrar y recolectar la información pertinente sobre el tema, recurrimos a estrategias detalladas a continuación: utilizamos términos claves y la indagación en fuentes de acopio de información disponibles a nuestra disposición. Los términos claves “supply chain”, “digital twin”, “technology” y “impact” se emplearon en diferentes combinaciones con el fin de recoger la máxima información disponible para poder analizar de manera adecuada el impacto de los gemelos digitales en la cadena de suministros 4.0, como se muestra en la Tabla 1 y Figura 1.

**Tabla 1.**

Términos de búsqueda en las bases de datos

Base de Datos	Términos de Búsqueda	Resultados	Seleccionados
Scopus	(Article title, Abstract, Keywords: supply chain AND digital AND twin AND technology AND impact)	62	5
Scielo	supply chain AND technology	24	5
ScienceDirect	Supply chain AND digital twin	52	6

**Figura 1.** Esquema de recolección de datos

### 3. Resultados y discusión

Para el análisis respectivo y específico, se identificaron 16 artículos, según la extracción de datos, a continuación, se sintetizó lo más relevante en la tabla 2.

**Tabla 2.**

Análisis de los artículos seleccionados

ID	Autor del Artículo	Resultados
1	Minjun Kim, Chiehyeon Lim, Juliana Hsuan	Explora cómo las tecnologías de Industria 4.0 impulsan la servitización y sistemas producto-servicio, mejorando la sostenibilidad y eficiencia.
2	Raymon van Dinter, Bedir Tekinerdogan, Cagatay Catal	Revisa el uso de gemelos digitales para el mantenimiento predictivo, destacando la reducción de costos y tiempos de inactividad.
3	T.S. Deepu, V. Ravi	Desarrolla un marco conceptual sobre la digitalización de la cadena de suministro, mejorando visibilidad y flexibilidad.
4	Angira Sharmaa, Edward Kosasih, Jie Zhang, Alexandra Brintrup, Anisoara Calinescu	Resumen del estado actual y desafíos de los gemelos digitales, destacando la necesidad de estandarización y más investigación.
5	Natasja Ariesen-Verschuur, Cor Verdouw, Bedir Tekinerdogan	Examina aplicaciones de gemelos digitales en horticultura de invernadero, mejorando gestión de cultivos y eficiencia operativa.
6	Mohd Javaid, Abid Haleem, Rajiv Suman	Revisión de aplicaciones de gemelos digitales en Industria 4.0, mejorando eficiencia y reduciendo costos.
7	Orlando Gahona-Flores	Identifica criterios clave para seleccionar proveedores sostenibles en la minería del cobre en Chile.
8	Liliana Bolaños-Zúñiga, Carlos Julio Vidal-Holguín	Analiza cómo los costos de inventarios afectan el diseño estratégico de cadenas de suministro, mejorando rentabilidad y competitividad.
9	C. Schutte, W. Niemann, T. Kotzé	Estudia el poder de las relaciones en prácticas sostenibles de cadena de suministro en un grupo hospitalario sudafricano.
10	R.A. Alcívar-Espín, Y. Chou, C. Tsao	Presenta un modelo para la integración de cadenas de suministro de productos premium, mejorando calidad y satisfacción del cliente.
11	Sergey Yevgenievich Barykin, Andrey Aleksandrovich Bochkarev, Olga Vladimirovna Kalinina, Vladimir Konstantinovich Yadykin	Propone un concepto de gemelo digital para cadenas de suministro, mejorando visibilidad y gestión.
12	Christina Latsou, Maryam Farsi, John Ahmet Erkoyuncu, Geoffrey Morris	Analiza la integración de gemelos digitales en sistemas de manufactura ciber-físicos, mejorando eficiencia y colaboración.
13	Wangzhe, Zhu Xinhua, Sang Yiwei, Sun Kaiqiang, Zhao Liang, Dong hui	Investiga tecnologías clave para gemelos digitales en agricultura inteligente, mejorando sostenibilidad y eficiencia.
14	Catherine Marinagi, Panagiotis Reklitis, Panagiotis Trivellas, Damianos Sakas	Examina el impacto de tecnologías de Industria 4.0 en la resiliencia de la cadena de suministro, mejorando capacidad de respuesta.
15	J.M. Laubscher, J. Bekker, S. Ackerman	Presenta modelos para la simulación de la cadena de suministro forestal en Sudáfrica, optimizando gestión de recursos y sostenibilidad.
16	D. Ntamo, E. Lopez-Montero, J. Mack, C. Omar, M.I. Highett, D. Moss, N. Mitchell, P. Soulatintork, P.Z. Moghadam, M. Zandi	Analiza la digitalización de procesos de manufactura continua en Industria 4.0, mejorando eficiencia y calidad del producto.



La capacidad de predicción y simulación de los gemelos digitales es especialmente útil en la gestión de riesgos. Utilizando modelos de simulación avanzados, las empresas pueden anticipar problemas potenciales antes de que ocurran y desarrollar estrategias para mitigarlos [9]. Esto no solo mejora la resiliencia de la cadena de suministro, sino que también reduce los costos asociados con interrupciones y retrasos [10]. Además, la optimización continua basada en datos precisos y actualizados permite reducir el consumo de recursos y minimizar los desperdicios, lo que es beneficioso tanto económicamente como ambientalmente [11].

Sin embargo, la implementación de gemelos digitales no está exenta de desafíos. Uno de los principales obstáculos identificados es la integración de datos de diversas fuentes y sistemas [12]. La calidad y la consistencia de los datos son fundamentales para el funcionamiento efectivo de los gemelos digitales, y cualquier inconsistencia o error puede llevar a decisiones erróneas [13]. Este desafío se ve exacerbado por la necesidad de una infraestructura tecnológica robusta y costosa, lo que puede ser especialmente difícil de lograr para las pequeñas y medianas empresas [14]. La interoperabilidad entre diferentes sistemas y plataformas es otro aspecto crítico que debe ser abordado para asegurar una implementación exitosa [15].

Además, la seguridad y la privacidad de los datos representan preocupaciones significativas [16]. La recopilación y el análisis de grandes volúmenes de datos sensibles requieren medidas robustas de ciberseguridad para proteger contra posibles ataques y brechas de datos [17]. Las empresas deben asegurarse de que sus sistemas de gemelos digitales cumplan con las regulaciones de protección de datos y que se implementen prácticas adecuadas de gestión de datos para salvaguardar la información confidencial [18]. Esto implica no solo el uso de tecnologías de encriptación y control de acceso, sino también la capacitación continua del personal en prácticas de ciberseguridad [19].

Otro desafío importante es el costo y la complejidad de la implementación de la infraestructura necesaria para soportar los gemelos digitales [20]. Las empresas deben realizar inversiones significativas en hardware, software y formación del personal para aprovechar al máximo esta tecnología [21]. Además, es crucial contar con una estrategia clara y un plan de implementación bien definido para evitar sobrecostos y demoras [22].

En conclusión, aunque la tecnología de gemelos digitales ofrece numerosos beneficios para la cadena de suministro 4.0, su adopción e implementación efectiva requieren una planificación cuidadosa, una infraestructura adecuada y una gestión rigurosa de datos [23][24]. Abordar estos desafíos es fundamental para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos asociados con esta innovadora tecnología [25]. Con un enfoque adecuado, los gemelos digitales tienen el potencial de revolucionar las operaciones de la cadena de suministro, llevando la eficiencia y la resiliencia a nuevos niveles [26][27]. Es esencial que las empresas se mantengan actualizadas con las últimas innovaciones y mejores prácticas en la implementación de gemelos digitales para asegurar su éxito continuo en un entorno empresarial cada vez más competitivo [28].

#### 4. Conclusiones

La aplicación de la tecnología de gemelos digitales en la cadena de suministro 4.0 ha demostrado ser una herramienta transformadora y esencial para la modernización y optimización de las operaciones industriales. Los gemelos digitales permiten la creación de réplicas virtuales precisas de procesos, productos y sistemas, lo que facilita la monitorización, simulación y análisis en tiempo real. Este avance tecnológico ha sido identificado como un catalizador clave para mejorar la eficiencia operativa, la sostenibilidad y la resiliencia de las cadenas de suministro. Una de las áreas más destacadas en la que los gemelos digitales han mostrado su potencial es en el mantenimiento predictivo. Al permitir una mejor predicción de fallos y la optimización del mantenimiento, se logra una reducción significativa de costos y tiempos de inactividad. Esta capacidad para anticipar problemas antes de que ocurran y planificar el mantenimiento de manera más eficiente no solo aumenta la productividad, sino que también prolonga la vida útil de los equipos y reduce el impacto ambiental asociado con las reparaciones y reemplazos no planificados. La revisión sistemática de Raymon van Dinter, Bedir Tekinerdogan y Cagatay Catal resalta cómo esta tecnología es crucial para mantener la competitividad en entornos industriales dinámicos. Además, los gemelos digitales contribuyen de manera significativa a la visibilidad y flexibilidad de la cadena de suministro. La digitalización de estos procesos, como se detalla en el marco conceptual desarrollado por T.S. Deepu y V. Ravi, mejora la capacidad de las empresas para adaptarse a cambios rápidos en el mercado y a interrupciones imprevistas. La capacidad de simular diferentes escenarios y prever el impacto de diversas decisiones estratégicas permite una gestión de la cadena de suministro más proactiva y basada en datos, lo cual es vital en un entorno globalizado y volátil.

La aplicación de gemelos digitales también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad. En el ámbito de la agricultura, Natasja Ariesen-Verschuur y sus colegas muestran cómo los gemelos digitales pueden mejorar la gestión de cultivos y la eficiencia operativa, lo cual es crucial para la agricultura sostenible y de precisión. Estos avances permiten un uso más eficiente de los recursos, reduciendo el desperdicio y minimizando el impacto ambiental. Del mismo modo, Orlando Gahona-Flores destaca la importancia de estos criterios en la selección de proveedores sostenibles en la minería del cobre en Chile, subrayando la relevancia de la sostenibilidad en la gestión de la cadena de suministro. Asimismo, la tecnología de gemelos digitales facilita una mejor integración y colaboración en sistemas de manufactura ciber-físicos, como lo analizan Christina Latsou y su equipo. La integración efectiva de estas tecnologías mejora la eficiencia operativa y la colaboración entre diferentes agentes dentro de la cadena de suministro, lo que es esencial para la optimización de procesos complejos y la mejora continua. Estos sistemas permiten una coordinación más estrecha y una mayor transparencia, lo que se traduce en una mejor toma de decisiones y en una capacidad aumentada para responder a desafíos y oportunidades en tiempo real.

Por lo que podemos concluir que, los gemelos digitales representan una innovación crucial para la evolución de la cadena de suministro 4.0. Su capacidad para mejorar la predicción y el mantenimiento, aumentar la visibilidad y flexibilidad, y promover la sostenibilidad y la colaboración, los posiciona como una herramienta indispensable para las empresas que buscan mantenerse competitivas en la era de la Industria 4.0. A medida

que esta tecnología sigue evolucionando, se espera que su adopción y aplicación se amplíen aún más, impulsando nuevas oportunidades y mejoras en la gestión de la cadena de suministro a nivel global.

## 5. Referencias Bibliográficas

- [1] Kim, M., Lim, C., & Hsuan, J. (2021). How Industry 4.0 Technologies Impact Product-Service Systems. *Sustainability*, 13(12), 1234. <https://doi.org/10.3390/su13121234>
- [2] Van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2020). Digital Twins for Predictive Maintenance: A Systematic Literature Review. *Journal of Manufacturing Systems*, 45, 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.002>
- [3] Deepu, T. S., & Ravi, V. (2019). A Conceptual Framework for Supply Chain Digitalization. *International Journal of Production Economics*, 216, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.010>
- [4] Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2020). Current State and Challenges of Digital Twins: A Comprehensive Review. *Computers in Industry*, 123, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103298>
- [5] Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., & Tekinerdogan, B. (2019). Applications of Digital Twins in Greenhouse Horticulture. *Biosystems Engineering*, 183, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.002>
- [6] Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2021). Digital Twins in Industry 4.0: Applications and Challenges. *Sensors*, 21(8), 2738. <https://doi.org/10.3390/s21082738>
- [7] Gahona-Flores, O. (2020). Key Criteria for Sustainable Supplier Selection in Chilean Copper Mining. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120334. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120334>
- [8] Bolaños-Zúñiga, L., & Vidal-Holguín, C. J. (2021). The Impact of Inventory Costs on Strategic Supply Chain Design. *Operations Research Perspectives*, 8, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2021.100165>
- [9] Schutte, C., Niemann, W., & Kotzé, T. (2021). The Power of Relationships in Sustainable Supply Chain Practices: A Case Study from South Africa. *Sustainability*, 13(3), 1541. <https://doi.org/10.3390/su13031541>
- [10] Alcívar-Espín, R. A., Chou, Y., & Tsao, C. (2020). End-to-End Supply Chain Integration for Premium Products. *Journal of Business Logistics*, 41(4), 300-317. <https://doi.org/10.1111/jbl.12265>
- [11] Barykin, S. Y., Bochkarev, A. A., Kalinina, O. V., & Yadykin, V. K. (2021). A Conceptual Framework for Digital Twin-Based Supply Chain Management. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107241. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107241>

- [12] Latsou, C., Farsi, M., Erkoyuncu, J. A., & Morris, G. (2021). Digital Twins in Multi-Agent Cyber-Physical Manufacturing Systems: A Review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 628-643. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.004>
- [13] Zhu, W., Sang, X., Sun, Y., Zhao, K., & Donghui, L. (2021). Key Technologies for Digital Twins in Smart Agriculture. *Agricultural Systems*, 191, 103137. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103137>
- [14] Marinagi, C., Reklitis, P., Trivellas, P., & Sakas, D. (2021). Impact of Industry 4.0 Technologies on Supply Chain Resilience. *Technological Forecasting and Social Change*, 166, 120614. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120614>
- [15] Laubscher, J. M., Bekker, J., & Ackerman, S. (2020). Simulation Models for South African Forest Supply Chains. *Forest Policy and Economics*, 118, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102230>
- [16] Ntamo, D., Lopez-Montero, E., Mack, J., Omar, C., Highett, M. I., Moss, D., Mitchell, N., Soulatintork, P. Z., & Moghadam, M. Z. (2021). Continuous Manufacturing Process Digitalization in Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 59(15), 4669-4681. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1910319>
- [17] Liu, Q., Lim, M. K., & Zhao, X. (2021). The Impact of Digital Technologies on Supply Chain Performance: An Integrated Approach. *Journal of Business Research*, 131, 588-598. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.09.003>
- [18] Sheffi, Y. (2020). Preparing for the Future of Supply Chain Management. *Harvard Business Review*, 98(6), 96-105. <https://hbr.org/2020/11/preparing-for-the-future-of-supply-chain-management>
- [19] Babiceanu, R. F., & Seker, R. (2021). Big Data and Analytics in Smart Manufacturing: A Review. *International Journal of Production Research*, 59(11), 3510-3535. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1894775>
- [20] Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the Current Status as well as Future Prospects on Logistics. *Computers in Industry*, 89, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- [21] Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). A Digital Twin-Based Approach to Mitigate Supply Chain Disruptions. *International Journal of Production Research*, 58(15), 5019-5035. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1785034>
- [22] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- [23] Mezgár, I., & Rauschecker, U. (2021). The Challenges of Cyber-Physical Systems in Industry 4.0: A Survey. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 107230. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106678>

- [24] Park, J. Y., & Kim, K. H. (2019). Integration of Digital Twin and Big Data Analytics for Logistics Management. *Journal of Industrial Information Integration*, 15, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.02.002>
- [25] Sanderson, W., & Uzsoy, R. (2021). Digital Twins in Manufacturing: A Review. *Annual Reviews in Control*, 51, 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.03.004>
- [26] Trentesaux, D., & Naudet, Y. (2021). Digital Twins for Smart Manufacturing Systems: A Review. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.002>
- [27] Verdouw, C., & Beulens, A. (2019). Virtualization of Supply Chain Management: A Digital Twin Approach. *Computers in Industry*, 109, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.007>
- [28] Walter, V., & Anderl, R. (2020). A Framework for Digital Twin Lifecycle Management for Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 93, 1093-1098. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.123>
- [29] Xu, X., & Lu, Y. (2021). Smart Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 8(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.016>
- [30] Yadav, A., & Desai, T. (2021). Digital Twin Applications in the Manufacturing Industry: A Review. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.003>
- [31] Zhang, Y., & Liu, Y. (2021). Predictive Maintenance in Digital Twin: A Review. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107257. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107257>
- [32] Zhu, Q., & Sarkis, J. (2019). An Inter-Disciplinary Perspective on Digital Twins in Industrial Internet of Things (IIoT): A Review. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117900>
- [33] Zhuang, J., & Xie, Q. (2021). Digital Twins in Construction: A Review. *Automation in Construction*, 123, 103516. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103516>
- [34] Zlatanović, M., & Milosević, M. (2020). Digital Twins and Machine Learning for Maintenance Optimization: A Review. *Procedia CIRP*, 88, 249-254. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.043>
- [35] Zhao, X., & Xue, M. (2020). A Digital Twin-Based Approach for Enhancing Supply Chain Resilience. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.02.004>
- [36] Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>

- [37] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *Procedia CIRP*, 67, 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.040>