





Technological Tools in Industry 4.0 for the Continuity of Agricultural Processes: A Systematic Literature Review





Jean Paul Uriarte Torres¹ , Jheremy Jesus Melendez Burgos¹ , Felix Pucuhuayla-Revatta, Dr.¹ , Jesús Zamora Mondragón, Dr. 

¹ Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú, 1121086@utp.edu.pe, u21201951@utp.edu.pe, c18883@utp.edu.pe, c20295@utp.edu.pe

Abstract- Agriculture faces challenges in ensuring the continuity of its processes due to the lack of advanced technological tools for Industry 4.0. The problem is that a large portion of agricultural areas still rely on traditional methods and lack intelligent systems that allow for real-time data analysis and decision optimization, which limits their productivity, sustainability, and adaptability to climate change. To address this problem, a Systematic Literature Review was conducted using the PRISMA protocol and the PICO approach, analyzing 45 articles selected from a total of 154 found in the ScienceDirect database (2023–2025). The results show that tools such as Machine Learning (ML), Geographic Information Systems (GIS), and Digital Twins (DTT) make it possible to locate new productive fields, simulate agricultural environments, and optimize decisions. However, their integration into Precision Agriculture is still limited. Furthermore, benefits such as disease detection, predictive maintenance, and increased productivity were identified. The purpose of this paper is to propose the integration of tools such as Deep Learning and Federated Learning, combined with sensors and IoT, to achieve more autonomous, sustainable, and data-secure agriculture. It concludes that these technologies are essential for modernizing agriculture, especially in countries like Peru, where they can improve productivity, decision-making, and the resilience of the agricultural sector.

Keywords- Precision Agriculture, Geographic Information Systems, Machine Learning, Industry 4.0, Industry 4.0.

Herramientas Tecnológicas en la Industria 4.0 para la Continuidad de Procesos Agrícolas: Una Revisión Sistemática de la Literatura

Jean Paul Uriarte Torres¹ , Jheremy Jesus Melendez Burgos¹ , Felix Pucuhuayla-Revatta, Dr.¹ , Jesús Zamora Mondragón, Dr. 

¹ Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú, 1121086@utp.edu.pe, u21201951@utp.edu.pe, c18883@utp.edu.pe, c20295@utp.edu.pe

Resumen- La agricultura se enfrenta a dificultades para garantizar la continuidad de sus procesos debido a la falta de herramientas tecnológicas avanzadas propias de la Industria 4.0. El problema es que gran parte de las zonas agrícolas todavía dependen de métodos tradicionales, carecen de sistemas inteligentes que permitan analizar datos en tiempo real y optimizar decisiones, lo que limita su productividad, sostenibilidad y capacidad de adaptación frente al cambio climático. Para abordar este problema, se realizó una Revisión Sistemática de la Literatura bajo el protocolo PRISMA y el enfoque PICO, analizando 45 artículos seleccionados de un total de 154 encontrados en la base ScienceDirect (2023–2025). Los resultados muestran que herramientas como Aprendizaje Automático (ML), Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Gemelos Digitales (GD) permiten localizar nuevos campos productivos, simular entornos agrícolas y optimizar decisiones. Sin embargo, su integración en la Agricultura de Precisión es aún limitada. Además, se identificaron beneficios como detección de enfermedades, mantenimiento predictivo y aumento de productividad. El propósito del trabajo es proponer la integración de herramientas como Deep Learning y Federated Learning, combinadas con sensores e IoT, para lograr una agricultura más autónoma, sostenible y segura en el manejo de datos. Se concluye que estas tecnologías son esenciales para modernizar el agro, especialmente en países como Perú, donde pueden mejorar la productividad, la toma de decisiones y la resiliencia del sector agrícola.

Palabras clave- Agricultura de Precisión, Sistemas de Información Geográfica, Machine Learning, Industria 4.0, Gemelos Digitales.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tecnología de Gemelo Digital (GD) se consolida como herramienta clave en la transición hacia la Industria 4.0 (I4.0). Un GD consiste en una representación digital de un activo físico, integrando modelos matemáticos basados en algoritmos y datos en tiempo real recopilados a través de sensores conectados mediante el Internet de las Cosas (IoT) o el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) [1]. Por consiguiente, la incorporación de datos tanto en tiempo real como históricos al modelo del GD no solo incrementa su flexibilidad y confiabilidad, sino que también permite una representación integral y precisa del medio en que se trabaja [2]. Además, estos modelos se actualizan constantemente con datos reales y ayudan a tomar decisiones importantes, lo que genera beneficios, como en la toma de decisiones que genera valor [3]. Por ello, se consolida como un componente importante dentro del marco de la Industria, facilitando la implementación de tecnologías, asociadas con la recolección y gestión eficiente de datos en el sector agrícola [4]. En la industria actual, la optimización de GD es una herramienta que ayuda a tomar decisiones, donde se ha vuelto cada vez más importante mejorar el rendimiento en estos entornos. Un sistema de fabricación se entiende como una parte clave dentro de la cadena de suministro

de una industria, ya que es responsable de generar valor mediante las actividades de producción continua para nuevos negocios (Blockchain) [5]. La integración del aprendizaje automático (ML) resulta clave para optimizar procesos industriales, garantizando la continuidad de la producción dentro de la cadena de suministro. Del mismo modo, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son fundamentales, ya que permiten superponer capas de datos de suelo, clima y topografía para evaluar terrenos agrícolas; combinados con el ML y los Gemelos Digitales, facilitan una toma de decisiones precisa sobre la selección de campos alternos. Cabe destacar que la mayoría de los entornos relacionados con la I4.0 ya cuentan con herramientas digitales concretas [6]. Por ejemplo, un artículo, centrado en el uso de datos hiperespectrales e incluir temas como la gestión de cultivos, el monitoreo de su crecimiento, el control de malezas y aplicaciones industriales [7]. En los últimos años, gracias al avance de las técnicas con aprendizaje automático, han demostrado ser fundamentales para mejorar el rendimiento de los cultivos, garantizar la seguridad alimentaria y resiliencia contra los efectos del cambio climático sobre la producción agrícola [8].

En la Tabla 1, el estado del arte combina tecnologías emergentes de ML, que transforman los procesos, en una propuesta de valor [9]. Además, los sensores de bajo consumo permiten detectar y recopilar datos en tiempo real y almacenarlos de manera de poder entenderlas con los métodos “Learning”. Estas capacidades han sido fundamentales para establecer los primeros pilares de esta transformación tecnológica [10].

TABLA I
BIBLIOMETRÍA CONJUNTO DE “LEARNING”

Autor	Aplicación	Referencia
[8]	Aprendizaje Automático (ML)	Técnicas y atributos en la predicción del rendimiento de cultivos.
[10]	Aprendizaje Federado (FL)	Revisión comparativa de métodos de agregación para avanzar en FL.
[13]	Aprendizaje Automático (ML)	Manejo de enfermedades en árboles frutales
[21]	Aprendizaje Automático (ML)	Recomendaciones para implementar AA con resultados claros e interpretables.

[22]	Aprendizaje Profundo (DL) y Aprendizaje Automático (ML)	Taxonomía y análisis de técnicas de datos aplicadas en ML y DL.
[23]	Aprendizaje Profundo (DL) y Aprendizaje Federado (FL)	Evaluación de algoritmos ML para seguridad en SI y sus ventajas/limitaciones.
[24]	Aprendizaje Federado (FL)	Mejora de eficiencia, privacidad y seguridad en FL.
[25]	Aprendizaje Federado (FL)	Procesos de entrenamiento e implementación de FL.
[26]	Aprendizaje Profundo (DL)	Sinergias entre la robótica colaborativa, los gemelos digitales
[28]	Aprendizaje Automático (ML)	Estudios empíricos y direcciones de investigación
[31]	Aprendizaje Automático (ML)	Gemelos digitales en ciudades inteligentes
[38]	Aprendizaje Automático (ML)	Robótica e inteligencia artificial en la industria

La tabla presenta un análisis bibliométrico que resume las aplicaciones de las tecnologías de Aprendizaje Automático (ML), Aprendizaje Profundo (DL) y Aprendizaje Federado (FL) en el contexto de la Industria 4.0. Esta tabla ilustra la diversidad de su uso en el sector agrícola, destacando su relevancia en la predicción del rendimiento de cultivos. En este sentido, el análisis cuantitativo realizado constituye un aporte relevante al identificar el papel de los Gemelos Digitales, cuya presencia en títulos y resúmenes, detallada en la Tabla 2, revela su creciente aplicación en la Industria 4.0, la manufactura inteligente y la agricultura de precisión, entre otros sectores.

TABLA 2
CIENCIOMETRÍA DE “GEMELO DIGITAL”

Autor	Aplicación
[1]	Uso de gemelos digitales para optimizar procesos en acuicultura.
[2]	Creación de modelos digitales tridimensionales en entornos industriales.
[3]	Progreso y desafíos de los gemelos digitales dentro de la ingeniería.
[4]	Análisis de la inteligencia aplicada en el ámbito de la Agricultura 4.0.
[5]	Mejora de simulaciones productivas mediante tecnologías de la Industria 4.0.
[11]	Integración cognitiva entre humanos y máquinas mediante gemelos digitales en la Industria 5.0.
[12]	Implementación de modelado 3D para el desarrollo de gemelos digitales industriales.

[14]	Aplicaciones avanzadas de imágenes hiperespectrales en procesos industriales. potenciando la gestión de operaciones
[17]	implementación y las dimensiones operativas de la digitalización
[20]	descripción general de los avances recientes en imágenes hiperespectrales en la industria
[26]	Sinergias entre la robótica colaborativa, los gemelos digitales
[27]	La integración hombre-máquina en los albores de la industria 5.0
[29]	Pruebas basadas en gemelos digitales para sistemas ciberfísicos
[30]	Aplicación de gemelos digitales en el área automotriz.
[31]	Revisión del papel de los gemelos digitales en el desarrollo de ciudades inteligentes.
[32]	Transformando las prácticas de gestión empresarial a través de tecnologías de metaverso
[35]	Interoperabilidad y retos de los gemelos digitales en sistemas ciberfísicos.
[39]	La generación de modelos digitales 3D para gemelos digitales en entornos industriales

Nota Los títulos explican la intención para con los “Gemelos Digitales”

La Tabla 2 muestra un análisis cuantitativo específico sobre los Gemelos Digitales (GD). La información recopilada en esta tabla evidencia la creciente importancia y la amplia gama de aplicaciones de los GD, no solo en la agricultura 4.0, sino también en sectores como la manufactura inteligente, la acuicultura y las ciudades inteligentes.

Los datos presentados refuerzan la propuesta de este estudio al demostrar que los Gemelos Digitales son una herramienta fundamental para la gestión de datos y la integración de información. Su uso permite replicar modelos productivos, identificar campos agrícolas alternos y planificar operaciones industriales, lo que contribuye directamente a la continuidad y optimización de los procesos agrícolas.

II. METODOLOGÍA

Se realizó la búsqueda en ScienceDirect, utilizando la ecuación: ("geographic computer system" AND "machine learning") OR "precision agriculture" OR "industry 4.0". Se identificaron 154 documentos. El estudio se desarrolló bajo el enfoque PRISMA, siguiendo una estructura mediante PICO. Este estudio emplea una Revisión Sistemática de Literatura para analizar la integración de SIG y ML en una herramienta tecnológica para la continuidad de procesos agrícolas.

A. Componentes PICO y Pregunta de Investigación

¿Cómo influye la implementación de herramientas tecnológicas (I) en el desarrollo de campos alternos (O) en zonas agrícolas (P), en el contexto de la transición hacia la Industria 4.0 (C)?

TABLA 3
COMPONENTES PICO Y PALABRA CLAVE

Componente	Descripción	Palabras Clave
Población (P)	Zonas agrícolas a nivel mundial con potencial de transformación tecnológica	"agricultural areas" OR "precision agriculture" OR "smart agriculture"
Intervención (I)	Implementación de Herramientas Tecnológicas	"SIG" OR "Aprendizaje Automático" OR "agricultura de precisión" OR "análisis espacial"
Comparación (C)	Comparación entre enfoque Industria 4.0 en la agricultura	"Industria 4.0" OR "IoT" OR "gemelos digitales" OR "agricultura inteligente" OR "automatización"
Resultado (O)	Influencia sobre el desarrollo de nuevos campos productivos y toma de decisiones basada en datos	"Productividad agrícola" OR "optimización del uso del suelo" OR "toma de decisiones" OR "agricultura de precisión"

Nota La búsqueda de vacíos teóricos con respecto a la pregunta de Investigación, condensa nuestras expectativas.

La Tabla 3 menciona los componentes PICO y Palabras Claves que organizan los elementos fundamentales para estructurar la pregunta de investigación utilizando el enfoque PICO (Población, Intervención, Comparación y Resultado).

B. Estrategia de Búsqueda

* Tipo de Documento: Revisión de artículos originales (excluyendo revisiones, actas de conferencias y capítulos de libros).

* Año de publicación: 2023–2025, porque reflejan el apogeo de la cantidad de artículos de revisión sobre Industria 4.0 en los últimos años (Figura 2).

* Área Temática: Ciencias de la Computación,

* Conteniendo 157 artículos de revisión.

C. Criterios de Inclusión y Exclusión

TABLA 4
CRITERIOS DE INCLUSION Y EXCLUSION

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
CI1: Estudios centrados en aplicaciones de Herramientas Tecnológicas en agricultura	CE1: Estudios que no aborden Herramientas Tecnológicas en la agricultura
CI2: Título que abordan casos exitosos de la Industria	CE2: Estudios que no aborden la aplicabilidad o escalabilidad en contextos rurales o de pequeña/mediana agricultura.
CI3: Estudios que comparen con herramientas de la Industria 4.0	CE3: Estudios que Optimicen usos de los gemelos digitales
CI4: Estudios publicados entre 2023 y 2025	CE4: Estudios que se enfoquen en Robótica-Humano
CI5: Estudios con evidencia empírica o estudios de caso	CE5: Estudios no empíricos (ej., artículos teóricos, editoriales)

La Tabla 4 resume los criterios utilizados para seleccionar los estudios analizados. En ella se especifican, por un lado, las condiciones que deben cumplir los artículos para ser incluidos y por otro lado, las razones por las que se excluyen (no abordar herramientas tecnológicas, falta de aplicabilidad en agricultura

pequeña/mediana, enfoque en robótica-humano o gemelos digitales, o ser artículos teóricos sin datos empíricos).

D. Subpreguntas de variables PICO

TABLA 5
SUB-PREGUNTAS DE LOS COMPONENTES PICO

Subpregunta	Ítems para Extracción de Datos
RQ1: ¿Cuáles son los principales desafíos de la agricultura de precisión?	Dificultad para compartir datos y baja inversión en producción
RQ2: ¿Cómo contribuyen los SIG y ML a la industrialización agrícola?	Métodos y herramientas SIG/ML aplicando con evidencia el impacto industrial.
EQ3: ¿Los GD, como herramienta de la Industria 4.0, superan o complementan a SIG+ML en la búsqueda de campos alternos?	Comparación entre enfoques tradicionales y tecnologías 4.0.
RQ4: ¿Cuáles son los resultados de implementar una herramienta tecnológica (SIG+ML) y/o GD en la agricultura?	Mejoras en productividad, uso del suelo, toma de decisiones y limitaciones encontradas

Nota Búsqueda de una herramienta tecnológica que analice los datos en zonas rurales.

La Tabla 5 presenta los criterios de selección de artículos, cuyos filtros se detallan en la Figura 1, donde se ilustra la depuración de 45 estudios seleccionados entre 154 documentos identificados.

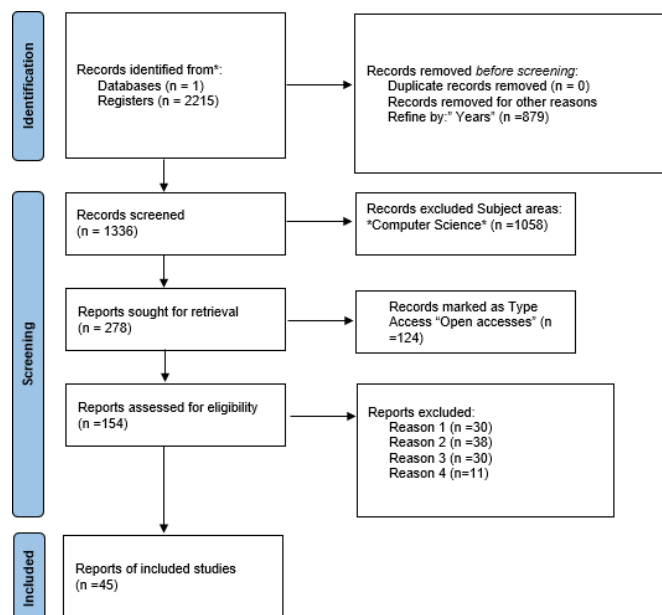


Fig. 1 Diagrama de Flujo PRISMA

Se muestra el proceso siguiendo con los lineamientos del protocolo PRISMA. El diagrama detalla cada etapa: identificación, cifrado, elegibilidad e inclusión final de artículos, especificando el número de documentos considerados en cada fase y los criterios aplicados para su exclusión.

III. RESULTADOS

El análisis de los 45 artículos seleccionados se estructura en tres hallazgos principales que delinean las tendencias tecnológicas en la agricultura. Primero, una revisión bibliométrica revela la importancia de los algoritmos de aprendizaje en la conexión entre la Agricultura de Precisión (AP) y la Industria 4.0 (I4.0). Se identificaron 12 artículos, equivalentes al 26.67% del total, centrados en técnicas como el Aprendizaje Automático (ML), Aprendizaje Profundo (DL) y Aprendizaje Federado (FL). A continuación, un análisis cuantitativo determina que "gemelo digital" es la palabra clave predominante, apareciendo en 18 artículos (40.0%). Este hallazgo subraya la consolidación del Gemelo Digital (GD) como una herramienta central y emergente dentro de la I4.0, funcionando como una plataforma que integra datos y algoritmos de aprendizaje para simular y optimizar procesos. Finalmente, el estudio aborda la relación entre los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Gemelos Digitales. Apesar de que los SIG se mencionan en 19 artículos (42.22%), su aplicación directa en la AP para la búsqueda y evaluación de terrenos es notablemente baja, con solo 3 artículos (6.67%) enfocados en este uso. Esta brecha evidencia un cruce temático aún incipiente y resalta el valor estratégico de integrar de manera más robusta los Gemelos Digitales y los SIG para potenciar la búsqueda de campos agrícolas alternos y asegurar la continuidad de los procesos productivos en el desarrollo agrícola moderno.

En el análisis de la transformación digital durante el periodo 2023-2025, se evidencia un aumento significativo en la producción científica vinculada al uso de tecnologías emergentes como Gemelos Digitales (40%), Industria 4.0 (35.56%), Learning (26.67%), Agricultura de Precisión (6.67%) y SIG (42.22%), según la distribución de artículos recopilados. En contraste, los Gemelos Digitales alcanzan 18 artículos (40%), consolidándose como una de las temáticas con mayor proyección y, al mismo tiempo, como un vacío teórico relevante. Pese a su creciente visibilidad, todavía falta una consolidación conceptual que permita articular de manera más sólida su utilidad en la digitalización de procesos productivos y su integración con la Industria 4.0 y los SIG. De este modo, el caso de países como Arabia Saudita, Irán e India demuestra que incluso en contextos con limitaciones económicas, la adopción de Gemelos Digitales y SIG constituye una vía estratégica para alcanzar niveles más altos de eficiencia, sostenibilidad y competitividad tecnológica. Este panorama confirma que, además de su aplicabilidad práctica, los Gemelos Digitales representan un vacío teórico aún en construcción, cuya consolidación académica y metodológica resulta esencial para comprender y potenciar su papel en la transformación digital global. En consecuencia, se abre un campo de investigación prometedor que permitirá no solo fortalecer el marco conceptual, sino también guiar la implementación efectiva de estas tecnologías en sectores críticos a nivel internacional.



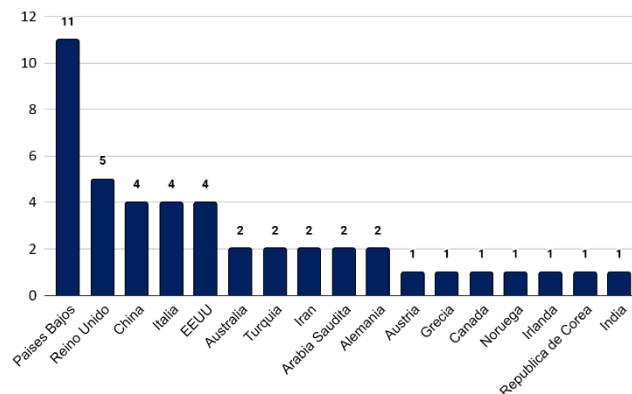
Adopción de herramientas tecnológicas en la I4.0 y AP
Fig. 2 Cantidad de artículos publicados en los últimos años

Es crucial en la Figura 2, que la idea global a nivel mundial impulsa una necesidad sin precedentes de adaptación para la continuidad de procesos en todos los sectores. Por otro lado, en la figura 3 podemos observar la distribución de los tipos de publicaciones incluidas en la RSL.



Distribución cuantitativa
Fig. 3 Distribución de tipos de publicaciones encontradas.

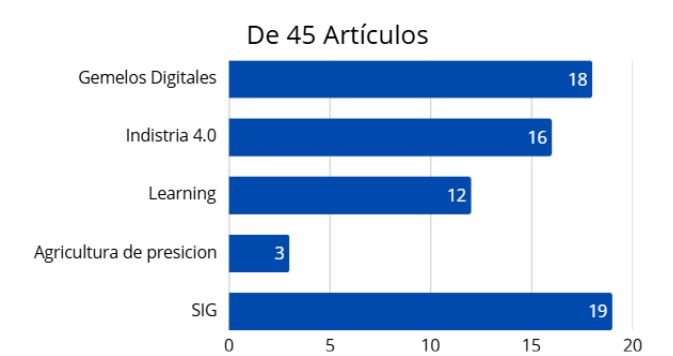
La Fig. 3 muestra los diferentes tipos de artículos analizados. La mayoría corresponde a investigaciones originales, que representan el 58% del total. En segundo lugar, se encuentran los trabajos clasificados como "Propuestas de Modelo", con un 18% de las publicaciones. Las encuestas ocupan la tercera posición, con un 13% de los estudios. Finalmente, las revisiones cualitativas y cuantitativas representan el 4% y 7% respectivamente del total examinado.



Conjunto de artículos
Fig. 4 Cantidad de Artículos seleccionados por países

Por otro lado, se identificaron los países que más contribuyeron con artículos de revisión entre los 60 seleccionados. Como se muestra en la Figura 4, los Países Bajos lideran con el 24.44% de los aportes, seguidos por Reino Unido con el 11.11%. China, Estados Unidos e Italia comparten el tercer lugar, cada uno con un 8.89% de participación.

Por último, se evaluó las palabras claves encontradas en los artículos, para dar detalle del aporte en todos los artículos como muestra la figura 5, destacando “Gemelo Digital” en los estudios de manera general. "Aprendizaje automático" ocupa el segundo lugar, reflejando el uso generalizado de algoritmos de aprendizaje en diversos aspectos de la recolección de datos.



Distribución agrupada y cuantitativa
Fig. 5: Distribución de tipos de publicaciones encontradas.

Estas palabras claves predominantes (Gemelos Digitales y Localización), demostraran el enfoque que combina en tecnologías avanzadas, específicamente de la I4.0 para la gestión de campos de agrícolas alternos; se explica que los SIG y métodos “Learning” en el contenedor GEMELOS DIGITALES agrupadas en la Tabla 6. Además, las herramientas que se generan a partir del modelamiento de datos permiten generar importancia en la implementación para campos agrícolas alternos.

Autor	Aplicación	Análisis de datos	Búsqueda de terrenos
[1], [7], [13]	Agricultura de precisión (AP)	-----	SIG
[3], [11], [17]	Industria 4.0 (I4.0)	GEMELO DIGITAL	-----
[4], [5]	Industria 4.0 (I4.0)	GEMELO DIGITAL	SIG
[6], [34], [42], [44], [45]	Industria 4.0 (I4.0)	-----	SIG
[9], [36], [38], [40], [41], [43]	Industria 4.0 (I4.0)	-----	-----

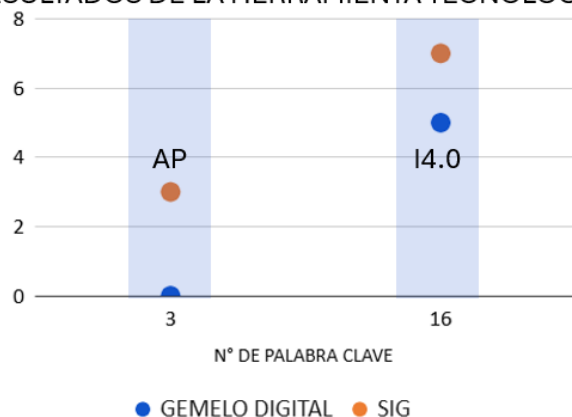
El análisis presentado en la Tabla 6 destaca la identificación de dos palabras clave vinculadas a herramientas tecnológicas dentro de artículos que comparan la Agricultura de Precisión (AP) con la Industria 4.0 (I4.0). Se evidencia que dichas herramientas tecnológicas tienen una presencia concreta únicamente en el contexto de I4.0, con 2 sobre 19 artículos que representan el 21.05% de los temas relacionados con ambas tecnologías, enfocados en la búsqueda de campos agrícolas alternos para la continuidad de los procesos productivos. Este hallazgo abre paso a la inclusión de la inteligencia de ciberamenazas en infraestructuras digitales agrícolas, aportando prácticas concretas para fortalecer la ciberseguridad en sistemas agrícolas inteligentes [4]. En paralelo, el uso de metodologías como la “Optimización por Simulación” actúa como una herramienta clave de soporte a la toma de decisiones, particularmente en entornos de manufactura donde la Programación de Producción (PS) y la estructura jerárquica de decisiones refuerzan la eficiencia del sistema desde el nivel operativo hasta el estratégico [5]. En conjunto, tanto la inteligencia de ciberamenazas como la optimización por simulación aplicada a la producción representan tecnologías fundamentales dentro del ecosistema de la Industria 4.0, al ofrecer capacidades avanzadas para fortalecer la seguridad, mejorar la eficiencia y sostener la continuidad de procesos agrícolas en escenarios cada vez más digitalizados y complejos. En este marco, los estudios [4, 5], evidencian cómo los Sistemas de Información, combinados con técnicas de aprendizaje automático, permiten fortalecer la toma de decisiones basadas en datos, a través del uso de Gemelos Digitales.

F. Respuestas a las Subpreguntas PICO

RQ1: ¿Cuáles son los principales desafíos de la agricultura de precisión?

El desafío principal es el integrar algoritmos como se representa en la Figura 6, que identifica el uso de la palabra clave AP en los artículos: [1, 7, 13] relacionado con la herramienta tecnológica SIG, en un 100%, por otro lado, su desafío es el de integrar técnicas que desarrollen su evolución en la industria de la agricultura, para hallar campos agrícolas alternos de acuerdo con la intención del estudio, que no cumple con métodos ML y tampoco con GD. Por ello, se resalta la importancia de las herramientas tecnológicas de la I4.0 que integran SIG con 43.75%, además la relación con GD es de 31.25%, que mejora las aplicaciones, al permitir que dispositivos individuales aprendan de modelos compartidos. Esto requiere diversas condiciones de comunicación y capacidades computacionales variables [2]. Además, la colaboración humano-robot (HRC) en la I4.0 es un campo interdisciplinario que explora la interacción entre humanos y robots en un espacio de trabajo compartido [12].

RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA TECNOLÓGICA



Distribución de cantidad de artículos
Fig. 6 Distribución separada en AP VS I4.0

Dentro de la evolución de los paradigmas industriales, es evidente que el enfoque se ha centrado en el desarrollo tecnológico para aumentar el rendimiento de las herramientas tecnológicas. Por ende, el desafío de la AP estaría en la adaptabilidad de algoritmos como mínimo sobre ML para el modelado de campos agrícolas alternos.

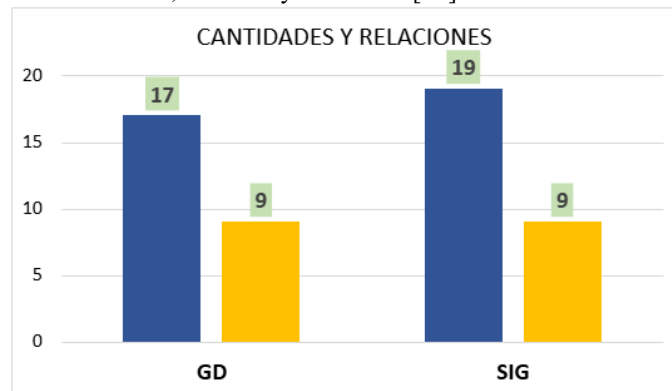
RQ2: ¿Cómo contribuyen los SIG y ML a la industrialización agrícola?

Los SIG y el Machine Learning (ML) integrados en el marco de los Gemelos Digitales (GD) desempeñan un papel central en la industrialización agrícola, ya que permiten mapear, monitorear y optimizar procesos clave. La sinergia de estas tecnologías se puede observar cuantitativamente en la Figura 7. Este gráfico muestra que, si bien los SIG tienen un mayor número de menciones totales con 19 artículos frente a los 17 de los Gemelos Digitales, ambas tecnologías comparten un núcleo idéntico de 9 artículos "relacionados". Esta comparación en los estudios interconectados sugiere una fuerte relación complementaria y subraya que el verdadero potencial de estas herramientas.

Uno, tripletes digitales y nuevas interfaces: Se plantea un enfoque que va más allá de los gemelos digitales, incorporando realidades extendidas y tecnologías de interacción humano-máquina para su aplicación en el metaverso industrial [27]. Dos, transformación de datos en información útil: Los sistemas digitales avanzados convierten datos físicos en información comprensible y accionable, lo que favorece una gestión inteligente y decisiones mejor fundamentadas en entornos agrícolas [29]. Tres, optimización de cadenas de valor: Los Gemelos Digitales permiten mejorar la eficiencia operativa, aumentar la resiliencia y habilitar la producción personalizada, ofreciendo monitorización en tiempo real y apoyo a la toma de decisiones adaptativa [32]. Cuatro, interoperabilidad de Gemelos Digitales: Se resalta la necesidad de definir niveles de integración que faciliten el funcionamiento simultáneo de múltiples gemelos digitales en entornos digitales inteligentes [35]. Y por último cinco, mantenimiento predictivo y nube: Una arquitectura basada en gemelos digitales facilita la

programación de mantenimiento predictivo, potenciando el uso de ML e IA a través de la computación en la nube [38, 43].

En este sentido, los SIG contribuyen con la capacidad de identificar y visualizar información geoespacial. Por su parte, el ML transforma grandes volúmenes de datos en conocimiento práctico, apoyando decisiones estratégicas para optimizar las operaciones agrícolas y avanzar hacia una agricultura más industrializada, eficiente y sostenible [14].



Distribución relacional
Fig. 7 Distribución de cantidad de publicaciones de publicaciones encontradas.

RQ3: ¿Los GD, como herramienta de la Industria 4.0, superan o complementan a SIG+ML en la búsqueda de campos alternos?

En la I4.0, un gemelo digital, permite simular escenarios agrícolas mediante modelos dinámicos que integran datos en tiempo real, lo cual facilita la selección inteligente de terrenos agrícolas basándose en análisis algorítmicos, predicciones y retroalimentación continua del entorno físico.

Frente a estas limitaciones, tecnologías como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Aprendizaje Automático (Machine Learning, ML) ofrecen una alternativa mucho más robusta y precisa para la evaluación de nuevos terrenos agrícolas. Un sistema SIG puede almacenar, buscar, procesar y mostrar una gran variedad de datos relevantes para la tierra agrícola, como imágenes satelitales, datos de sensores, datos climáticos [15], [13]. Por otro lado, el ML proporciona la capacidad de analizar grandes volúmenes de estos datos complejos y heterogéneos [15]. Los algoritmos de ML se utilizan en agricultura para diversas tareas analíticas aplicadas a datos espaciales.

La combinación de SIG y ML/GD es muy útil para analizar espacios y tomar mejores decisiones en la agricultura.

RQ4: ¿Cuáles son los resultados de implementar una herramienta tecnológica (SIG+ML) y/o GD en la agricultura?

- Aumento de la productividad a través de la detección y clasificación de enfermedades: Se ha investigado el uso de redes neuronales convolucionales (CNN) para

la detección y clasificación de enfermedades en cultivos de tomate, con el objetivo de aumentar la productividad en el proceso de cultivo [34, 36].

- La implementación de ML permite monitorear y optimizar el proceso de producción, lo que conduce a una mayor eficiencia y productividad.
- Mantenimiento Predictivo: El ML es clave para prevenir fallas en las máquinas, reducir el tiempo de inactividad y extender la vida útil de los equipos, lo que mejora la fiabilidad general de los sistemas de producción [36].

IV. DISCUSIÓN

Los Sistemas de Información (SI) y el Aprendizaje Automático (ML) presentan niveles de adopción superiores al 90 %, destacando su impacto en la eficiencia operativa y la optimización de procesos mediante recolección de datos. En aplicaciones que emplean algoritmos avanzados, los resultados fueron óptimos al integrarse con modelos de Gemelos Digitales. La transformación digital obedece a la integración de sistemas inteligentes, dispositivos inteligentes, métodos de comunicación inteligentes y sistemas analíticos avanzados, lo cual permite la toma de decisiones informadas [16]. En este contexto, se han desarrollado herramientas digitales específicas, como software para la gestión de la cadena de suministro (SCD), que incorporan tecnologías digitales adoptadas por las organizaciones, mejorando así el rendimiento de las cadenas de suministro. Este proceso favorece la creación de áreas funcionales más interconectadas dentro de todo el ecosistema empresarial, generando un valor agregado [17]. La trazabilidad se ha convertido en un requisito esencial para las operaciones comerciales modernas en las cadenas de suministro, y la tecnología blockchain se perfila como una solución prometedora [18]. Además de la trazabilidad, blockchain aporta transparencia a los sistemas de información tradicionales, facilitando la continuidad de las cadenas de suministro mediante el seguimiento exhaustivo a lo largo de la cadena de valor. Esto la posiciona como una tecnología preferente para contrarrestar la asimetría de la información [19]. La limitada información sobre el impacto de integrar herramientas tecnológicas con sistemas municipales evidencia una brecha en la implementación. En este sentido, se plantea el aprovechamiento de terrenos alternos como estrategia para mantener la continuidad de los procesos agrícolas. Tecnologías como la imagen hiperespectral (HSI) permiten caracterizar elementos naturales mediante atributos físicos, geométricos e internos [20], facilitando la identificación de campos similares integrados en un Gemelo Digital. Por ejemplo, en algunas ciudades de China, la implementación de sistemas de detección basados en sensores IoT, combinados con el uso de Gemelos Digitales, ha demostrado elevada eficacia. No obstante, los altos costos iniciales asociados a la infraestructura siguen constituyendo una barrera considerable, especialmente en zonas rurales. Asimismo, el impacto ambiental de estos sistemas resulta significativo. La optimización del uso del suelo y la

disminución de la dependencia de áreas rurales mal planificadas permiten superar el modelo tradicional. Esta transformación no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también reduce los costos de transporte y fomenta modelos de negocio que facilitan la comercialización directa de los productos en el lugar de origen. En contraposición, se plantea la adopción de una agricultura inteligente fundamentada en la recolección intensiva y en el análisis inteligente de datos a través del Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA). Esta estrategia resulta crucial para elevar la eficiencia productiva, la productividad y la sostenibilidad de la cadena agroalimentaria. El IoT, concebido como una red de dispositivos, sensores y software interconectados, posibilita el monitoreo y la optimización en tiempo real de los procesos. Sin embargo, los datos generados por los sensores IoT pueden resultar complejos de gestionar y analizar manualmente, debido al elevado volumen de información [36, 37]. Estos datos obtenidos constituyen el insumo principal para los Sistemas de Información (SI) y los algoritmos de Aprendizaje Automático (ML). La transición desde una recolección de datos empírica hacia un enfoque basado en IoT y agricultura inteligente constituye el pilar fundamental para transformar la agricultura de precisión en un modelo predictivo, eficiente y resiliente, y avanzar así hacia su industrialización.

V. CONCLUSIÓN

- El análisis muestra un gran y creciente interés global en aplicar la Industria 4.0 a la agricultura. Esto significa que se necesita urgentemente usar tecnologías más inteligentes para identificar y adaptar nuevos terrenos que permitan seguir produciendo alimentos de manera continua, especialmente frente a los desafíos actuales.
- Liderazgo de los Gemelos Digitales como Tecnología Emergente y Central: La Figura 5 ("Distribución de tipos de publicaciones encontradas") y la mención de su presencia en el 40% de los artículos confirman a "Gemelo Digital" como la palabra clave más prominente. Esto subraya su consolidación como la herramienta tecnológica emergente y central en la Industria 4.0 para la agricultura, dada su capacidad de integrar datos y algoritmos de "Learning" para la gestión de campos agrícolas alternos.
- Rol de los Sistemas de Información Geográfica (SIG): Aunque ampliamente conocidos, los SIG muestran todavía un nivel limitado de aplicación directa en la agricultura de precisión. Esto revela la necesidad de promover un uso más activo y específico en tareas como localización, evaluación y selección de terrenos idóneos, fundamentales para la expansión o reubicación productiva.
- Perspectiva Global y Economías Emergentes: La mayor parte de los avances provienen de países con alto nivel de desarrollo tecnológico, que han sentado bases metodológicas para la optimización agrícola. Sin embargo, el caso de naciones con recursos económicos más limitados, como Arabia Saudita, Irán e India, demuestra que los Gemelos Digitales y los SIG pueden ser adoptados de

manera estratégica y accesible, acelerando la transformación digital, promoviendo la sostenibilidad y aumentando la competitividad.

- Los Gemelos Digitales emergen no solo como una herramienta tecnológica clave, sino también como un campo de estudio en construcción, cuyo fortalecimiento teórico y metodológico será determinante para guiar la próxima etapa de innovación agrícola a nivel global.

REFERENCIAS

- [1] Føre, M., Alver, M. O., Alfredsen, J. A., Rasheed, A., Hukkelås, T., Bjelland, H. V., Su, B., Ohrem, S. J., Kelasidi, E., Norton, T., & Papandroulakis, N. (2024). Digital Twins in intensive aquaculture — Challenges, opportunities and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218(108676), 108676. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108676>
- [2] Kamali, M., Atazadeh, B., Rajabifard, A., & Chen, Y. (2024). Advancements in 3D digital model generation for digital twins in industrial environments: Knowledge gaps and future directions. *Advanced Engineering Informatics*, 62(102929), 102929. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102929>
- [3] Iranshahi, K., Brun, J., Arnold, T., Sergi, T., & Müller, U. C. (2025). Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems with Applications*, 26(200516), 200516. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516>
- [4] Bui, H. T., Aboutorab, H., Mahboubi, A., Gao, Y., Sultan, N. H., Chauhan, A., Parvez, M. Z., Bewong, M., Islam, R., Islam, Z., Camtepe, S. A., Gauravaram, P., Singh, D., Ali Babar, M., & Yan, S. (2024). Agriculture 4.0 and beyond: Evaluating cyber threat intelligence sources and techniques in smart farming ecosystems. *Computers & Security*, 140(103754), 103754. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103754>
- [5] Ghasemi, A., Farajzadeh, F., Heavey, C., Fowler, J., & Papadopoulos, C. T. (2024). Simulation optimization applied to production scheduling in the era of industry 4.0: A review and future roadmap. *Journal of Industrial Information Integration*, 39(100599), 100599. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100599>
- [6] Li, P., Wu, W., Zhao, Z., & Huang, G. Q. (2024). Indoor positioning systems in industry 4.0 applications: Current status, opportunities, and future trends. *Digital Engineering*, 3(100020), 100020. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2024.100020>
- [7] Centorame, L., Ilari, A., Del Gatto, A., & Foppa Pedretti, E. (2024). A systematic review on precision agriculture applied to sunflowers, the role of hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 222(109097), 109097. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109097>
- [8] Shawon, S. M., Ema, F. B., Mahi, A. K., Niha, F. L., & Zubair, H. T. (2025). Crop yield prediction using machine learning: An extensive and systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 10(100718), 100718. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100718>
- [9] Kim, M., Lim, C., & Hsuan, J. (2023). From technology enablers to circular economy: Data-driven understanding of the overview of servitization and product-services systems in Industry 4.0. *Computers in Industry*, 148(103908), 103908. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103908>
- [10] Nanayakkara, S. I., Pokhrel, S. R., & Li, G. (2024). Understanding global aggregation and optimization of federated learning. *Future Generations Computer Systems: FGCS*, 159, 114–133. <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.05.009>
- [11] Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2023). Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*, 3, 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>
- [12] Dhanda, M., Rogers, B. A., Hall, S., Dekoninck, E., & Dhokia, V. (2025). Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93(102937), 102937. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>
- [13] Yang, Y., Mali, P., Arthur, L., Molaei, F., Atsyo, S., Geng, J., He, L., & Ghatrehsamani, S. (2025). Advanced technologies for precision tree fruit disease management: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229(109704), 109704. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109704>
- [14] Rezaee, N., Zanjirchi, S. M., Jalilian, N., & Bamakan, S. M. H. (2023). Internet of things empowering operations management; A systematic review based on bibliometric and content analysis. *Telematics and Informatics Reports*, 11(100096), 100096. <https://doi.org/10.1016/j.teler.2023.100096>
- [15] Chamorro-Padial, J., García, R., & Gil, R. (2024). A systematic review of open data in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219(108775), 108775. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108775>
- [16] Habbal, A., Hamouda, H., Alnajim, A. M., Khan, S., & Alrifai, M. F. (2024). Privacy as a Lifestyle: Empowering assistive technologies for people with disabilities, challenges and future directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 36(4), 102039. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102039>
- [17] Deepu, T., & Ravi, V. (2023). A review of literature on implementation and operational dimensions of supply chain digitization: Framework development and future research directions. *International Journal Of Information Management Data Insights*, 3(1), 100156. <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2023.100156>
- [18] Payandeh, R., Delbari, A., Fardad, F., Helmzadeh, J., Shafiee, S., & Ghatari, A. R. (2025). Unraveling the potential of blockchain technology in enhancing supply chain traceability: A systematic literature review and modeling with ISM. *Blockchain: Research and Applications*, 6(1), 100240. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2024.100240>
- [19] Stopfer, L., Kaulen, A., & Purfürst, T. (2024). Potential of blockchain technology in wood supply chains. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216(108496), 108496. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108496>
- [20] Ahmed, M. W., Khaliduzzaman, A., Emmert, J. L., & Kamruzzaman, M. (2025). An overview of recent advancements in hyperspectral imaging in the egg and hatchery industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230(109847), 109847. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109847>
- [21] Daghigh, V., Daghigh, H., Lacy, T. E., & Naraghi, M. (2024). Review of machine learning applications for defect detection in composite materials. *Machine Learning With Applications*, 100600. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2024.100600>

- [22] Kareem Thajeel Thajeel, I., Samsudin, K., Jahari Hashim, S., & Hashim, F. (2023). Machine and deep learning-based XSS detection approaches: A systematic literature review. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 101628, 101628. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101628>
- [23] Gugueoth, V., Safavat, S., & Shetty, S. (2023). Security of Internet of Things (IoT) using federated learning and deep learning — Recent advancements, issues and prospects. *ICT Express*, 9(5), 941–960. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2023.03.006>
- [24] Xu, C., Qu, Y., Xiang, Y., & Gao, L. (2023). Asynchronous federated learning on heterogeneous devices: A survey. *Computer Science Review*, 50(100595), 100595. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100595>
- [25] Qi, P., Chiaro, D., & Piccialli, F. (2025). Small models, big impact: A review on the power of lightweight Federated Learning. *Future Generations Computer Systems: FGCS*, 162(107484), 107484. <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.107484>
- [26] Zafar, M. H., Langâs, E. F., & Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89(102769), 102769. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102769>
- [27] Alimam, H., Mazzuto, G., Tozzi, N., Emanuele Ciarapica, F., & Bevilacqua, M. (2023). The resurrection of digital triplet: A cognitive pillar of human-machine integration at the dawn of industry 5.0. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 35(10), 101846. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101846>
- [28] Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2023). Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*, 3, 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>
- [29] Somers, R. J., Douthwaite, J. A., Wagg, D. J., Walkinshaw, N., & Hierons, R. M. (2023). Digital-twin-based testing for cyber–physical systems: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 156(107145), 107145. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107145>
- [30] Deng, S., Ling, L., Zhang, C., Li, C., Zeng, T., Zhang, K., & Guo, G. (2023). A systematic review on the current research of digital twin in automotive application. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.004>
- [31] Huzzat, A., Anpalagan, A., Khwaja, A. S., Woungang, I., Alnoman, A. A., & Pillai, A. S. (2025). A comprehensive review of Digital Twin technologies in smart cities. *Digital Engineering*, 4(100040), 100040. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040>
- [32] Raman, R., Mandal, S., Gunasekaran, A., Papadopoulos, T., & Nedungadi, P. (2025). Transforming business management practices through metaverse technologies: A Machine Learning approach. *International Journal of Information Management Data Insights*, 5(1), 100335. <https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2025.100335>
- [33] Ahmad, R., Hämäläinen, M., Wazirali, R., & Abu-Ain, T. (2023). Digital-care in next generation networks: Requirements and future directions. *Computer Networks*, 224(109599), 109599. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109599>
- [34] Isoko, K., Cordiner, J. L., Kis, Z., & Moghadam, P. Z. (2024). Bioprocessing 4.0: a pragmatic review and future perspectives. *Digital Discovery*, 3(9), 1662–1681. <https://doi.org/10.1039/d4dd00127c>
- [35] Acharya, S., Khan, A. A., & Päiväranta, T. (2024). Interoperability levels and challenges of digital twins in cyber–physical systems. *Journal of Industrial Information Integration*, 42(100714), 100714. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100714>
- [36] Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>
- [37] Li, Y., Xie, S., Wan, Z., Lv, H., Song, H., & Lv, Z. (2023). Graph-powered learning methods in the Internet of Things: A survey. *Machine Learning with Applications*, 11(100441), 100441. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100441>
- [38] Brunello, A., Fabris, G., Gasparetto, A., Montanari, A., Saccomanno, N., & Scalera, L. (2025). A survey on recent trends in robotics and artificial intelligence in the furniture industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93(102920), 102920. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102920>
- [39] Kamali, M., Atazadeh, B., Rajabifard, A., & Chen, Y. (2024). Advancements in 3D digital model generation for digital twins in industrial environments: Knowledge gaps and future directions. *Advanced Engineering Informatics*, 62(102929), 102929. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102929>
- [40] Nikiforidis, K., Kyrtsoglou, A., Vafeiadis, T., Kotsiopoulos, T., Nizamis, A., Ioannidis, D., Votis, K., Tzovaras, D., & Sarigiannidis, P. (2024). Enhancing transparency and trust in AI-powered manufacturing: A survey of explainable AI (XAI) applications in smart manufacturing in the era of industry 4.0/5.0. *ICT Express*. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2024.12.001>
- [41] Zhou, Y. (2025). AI-driven digital circular economy with material and energy sustainability for industry 4.0. *Energy and AI*, 20(100508), 100508. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100508>
- [42] Eichelberger, H., Sauer, C., Ahmadian, A. S., & Kröher, C. (2025). Industry 4.0/IIoT Platforms for manufacturing systems — A systematic review contrasting the scientific and the industrial side. *Information and Software Technology*, 179(107650), 107650. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2024.107650>
- [43] Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in Industry 4.0: A review. *Data Science and Management*, 7(1), 47–63. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2023.10.006>
- [44] Busboom, A. (2024). Automated generation of OPC UA information models — A review and outlook. *Journal of Industrial Information Integration*, 39(100602), 100602. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100602>
- [45] Schlemitz, A., & Mezhyuev, V. (2024). Approaches for data collection and process standardization in smart manufacturing: Systematic literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, 38(100578), 100578. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100578>