

Gemelos digitales aplicados a la robótica agrícola: una revisión bibliográfica de metodologías, aplicaciones y desafíos¹

Septiembre de 2026

Esteban Eduardo Camargo Martínez², Edna Carolina Moriones Polanía³, Estudiante de Ingeniería Mecatrónica; Doctora en Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, estebaneduardo.camargo@ustabuca.edu.co, edna.moriones@ustabuca.edu.co

Resumen - Los gemelos digitales permiten representar, analizar y optimizar sistemas físicos mediante su conexión con entornos virtuales. En la robótica agrícola, apoyan el diseño, la simulación, el monitoreo y la validación de robots y maquinaria. Esta revisión tuvo como objetivo sistematizar el conocimiento científico sobre los gemelos digitales aplicados a la robótica agrícola, con el fin de identificar aplicaciones, tecnologías, enfoques metodológicos y tendencias de investigación. Se realizó una revisión sistemática, descriptiva y analítica, restringiendo la selección de la literatura al periodo 2021-2026. La selección se efectuó mediante el protocolo PRISMA y permitió conformar una muestra de 24 estudios, organizados en una matriz documental. Los resultados evidenciaron aplicaciones en siembra, cosecha, monitoreo, navegación, operación de maquinaria, coordinación y teleoperación, apoyadas en simulación, sensores, visión por computador, Internet de las Cosas, inteligencia artificial, aprendizaje por refuerzo y transferencia Sim2Real. También se identificó una evolución desde el monitoreo y la simulación hacia funciones de predicción, optimización y apoyo a la toma de decisiones. No obstante, persisten desafíos relacionados con la brecha entre simulación y realidad, la generalización, la sincronización, el procesamiento en tiempo real y la falta de estándares. Se concluye que el campo está en expansión, aunque predominan soluciones especializadas y validaciones limitadas a tareas, cultivos o entornos específicos.

Palabras claves: gemelos digitales, robótica agrícola, agricultura de precisión, simulación, sistemas ciberfísicos.

Digital Twins Applied to Agricultural Robotics: A Literature Review of Methodologies, Applications, and Challenges

Abstract - Digital twins enable the representation, analysis, and optimization of physical systems through their

connection with virtual environments. In agricultural robotics, they support the design, simulation, monitoring, and validation of robots and machinery. This review aimed to systematize the scientific knowledge on digital twins applied to agricultural robotics to identify their applications, enabling technologies, methodological approaches, and research trends. A systematic, descriptive, and analytical review was conducted, restricting the literature search to studies published between 2021 and 2026. The study selection process followed the PRISMA guidelines and resulted in a sample of 24 studies, which were organized in a document analysis matrix. The results revealed applications in planting, harvesting, monitoring, navigation, machinery operation, coordination, and teleoperation, supported by simulation, sensors, computer vision, the Internet of Things, artificial intelligence, reinforcement learning, and Sim2Real transfer. The findings also indicated a shift from monitoring and simulation toward prediction, optimization, and decision-support functions. Nevertheless, challenges remain regarding the simulation-to-reality gap, generalization, synchronization, real-time processing, and the lack of standards. It is concluded that the field is expanding, although specialized solutions and validations limited to specific tasks, crops, or environments continue to predominate.

Keywords: digital twins, agricultural robotics, precision agriculture, simulation, cyber-physical systems.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta el desafío de aumentar la productividad para responder a la demanda de alimentos y a las transformaciones de los sistemas productivos [1]. A esta situación se suma el envejecimiento de la población agrícola y la dificultad para atraer nuevas generaciones de trabajadores, lo que reduce la disponibilidad de mano de obra para actividades repetitivas o físicamente exigentes [2]. Este panorama ha impulsado la incorporación de tecnologías orientadas a automatizar operaciones, aprovechar mejor los recursos y facilitar la gestión de procesos agrícolas cada vez más complejos.

En este contexto, la robótica agrícola se ha desarrollado como una alternativa para realizar tareas de siembra, monitoreo, aplicación de insumos, navegación y cosecha [3]. Sin embargo, el diseño y la validación de estos sistemas están condicionados por la variabilidad del terreno, los cambios ambientales, la diversidad de los cultivos y la interacción con

¹ Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico.

² Autor de contacto: Esteban Eduardo Camargo Martínez. Estudiante de Ingeniería Mecatrónica y de la Especialización en Automatización Industrial de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, con interés académico en automatización, control, robótica y tecnologías aplicadas a sistemas agrícolas.

³ Director: Edna Carolina Moriones Polanía. Doctora en Ingeniería Agrícola con énfasis en Máquinas Agrícolas/Robótica y Magíster en Ingeniería de Control Industrial. Docente de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, vinculada a la Facultad de Ingeniería Mecatrónica, con experiencia en automatización, control y robótica aplicada.

elementos biológicos. A ello se añaden los costos, los tiempos y las dificultades logísticas de las pruebas en campo [4]. Estas condiciones han favorecido el uso de herramientas digitales que permiten analizar y validar los sistemas antes de su implementación y durante su operación.

Entre estas herramientas se encuentran los gemelos digitales, entendidos como representaciones virtuales vinculadas con sistemas físicos mediante el intercambio de datos. Esta conexión permite supervisar el estado del sistema, analizar su comportamiento y apoyar la optimización de los procesos agrícolas [5]. En la robótica agrícola, los gemelos digitales pueden utilizarse para simular entornos, validar trayectorias, supervisar maquinaria y probar estrategias de control con menor exposición a riesgos operativos [6]. Su funcionamiento se complementa con tecnologías como el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial, la visión por computador y los sistemas ciberfísicos, que facilitan la conexión y el procesamiento de información entre los componentes físicos y virtuales [7].

Las aplicaciones reportadas en la literatura muestran que los gemelos digitales se han incorporado en campos específicos de la robótica agrícola. En siembra y trasplantes automatizados, Chen *et al.* [8] desarrollaron un modelo de cinco dimensiones para monitorear una trasplantadora; en cosecha y manipulación de productos agrícolas, Lang *et al.* [9] emplearon un entorno digital para planificar la recolección autónoma de tomates; y, en monitoreo y fenotipado de cultivos, Liu *et al.* [10] generaron imágenes sintéticas para mejorar la detección de cultivos e hileras con el robot MARS. Además, en navegación y movilidad autónoma, Zhao *et al.* [11] construyeron un simulador para validar vehículos agrícolas autónomos, mientras que, en operación y optimización de maquinaria agrícola, Yin *et al.* [12] desarrollaron un sistema para monitorear y predecir el desempeño de una cosechadora. También se identificaron aplicaciones en gestión y coordinación de sistemas robóticos agrícolas, mediante la planificación de labores de deshierbe y pulverización propuesta por van Evert *et al.* [13], y en teleoperación y control remoto, con el sistema de Bua *et al.* [14] orientado a mejorar la teleoperación de un brazo robótico en invernadero. Estos casos reflejan el uso de gemelos digitales en tareas de supervisión, planificación, entrenamiento, predicción y optimización.

Varias de estas implementaciones se apoyaron en herramientas y entornos de desarrollo abierto. ROS y ROS 2 se utilizaron para gestionar la comunicación, la navegación y el intercambio de datos en robots de monitoreo, vehículos autónomos y sistemas coordinados, mientras que Gazebo permitió simular plataformas y escenarios agrícolas antes de las pruebas físicas. Rodríguez-Nieto *et al.* [15] integraron Python, MQTT y FIWARE para comunicar el robot de siembra con su representación virtual, y Fernández *et al.* [16] incorporaron ROS 2 en una arquitectura para la automatización de labores hortícolas. Estas tecnologías favorecen el desarrollo modular y la interoperabilidad entre los componentes físicos y virtuales.

A pesar de estos avances, la literatura reúne diferentes plataformas robóticas, tecnologías, metodologías y niveles de integración, lo que dificulta comparar las propuestas y establecer con claridad sus aportes, limitaciones y grado de

desarrollo. Purcell y Neubauer [17] relacionan esta dificultad con la diversidad conceptual y tecnológica de los gemelos digitales en agricultura. Asimismo, el crecimiento reciente de las publicaciones exige organizar los hallazgos para reconocer los enfoques predominantes, los desafíos pendientes y las oportunidades de investigación [18]. Por ello, resulta pertinente una revisión centrada en la robótica agrícola que permita integrar las aplicaciones orientadas a la simulación, el monitoreo, la validación, la transferencia Sim2Real, la optimización y la operación de sistemas robóticos.

En respuesta a esta necesidad, el objetivo principal fue identificar aplicaciones, enfoques tecnológicos y tendencias de investigación, con el propósito de establecer el estado actual de desarrollo de los gemelos digitales en la robótica agrícola.

II. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE DATOS

La presente investigación corresponde a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo y analítico sobre los gemelos digitales aplicados a la robótica agrícola. La unidad de análisis estuvo constituida por artículos de investigación, revisiones bibliográficas y publicaciones en conferencias indexadas relacionadas con esta temática, sobre los cuales se realizó un análisis documental de las aplicaciones, tecnologías, enfoques metodológicos y principales hallazgos reportados en la literatura. La información se obtuvo mediante la consulta en las bases de datos especializadas como son Scopus e IEEE Xplore. Se consideraron publicaciones escritas en inglés o español y para su recuperación, se emplearon dos ecuaciones booleanas.

Ecuación booleana de búsqueda 1 → La primera estrategia de búsqueda se estructuró para identificar literatura relacionada con gemelos digitales aplicados a robots agrícolas autónomos, robótica de campo y agricultura de precisión durante el periodo 2021–2026:

```
TITLE-ABS-KEY (
  ("digital twin" OR "digital twins")
  AND
  ("agricultural robot*" OR "agricultural
  robotics" OR "farm robot*"
  OR "field robot*" OR agrobot* OR
  "autonomous agricultural vehicle*"
  OR "harvesting robot*" OR "weeding robot*"
  OR "spraying robot*")
  AND
  ("agriculture" OR "precision agriculture"
  OR "smart farming")
)
AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027
```

Ecuación booleana de búsqueda 2 → La segunda estrategia amplió los términos asociados a robots móviles agrícolas y tareas específicas del ciclo productivo, incluyendo cosecha, deshierbe, aspersión, siembra, invernaderos, huertos y viñedos:

```

TITLE-ABS-KEY (
  ("digital twin" OR "digital twins")
  AND
  ("harvesting robot*" OR "fruit picking
  robot*" OR "weeding robot*"
  OR "spraying robot*" OR "planting
  robot*" OR "seeding robot*"
  OR "autonomous mobile robot*" OR
  "mobile agricultural robot*"
  OR "orchard robot*" OR "vineyard
  robot*" OR "greenhouse robot*")
  AND
  (agriculture OR farming OR crop* OR
  horticulture OR greenhouse
  OR "precision agriculture" OR "smart
  farming")
)
AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027

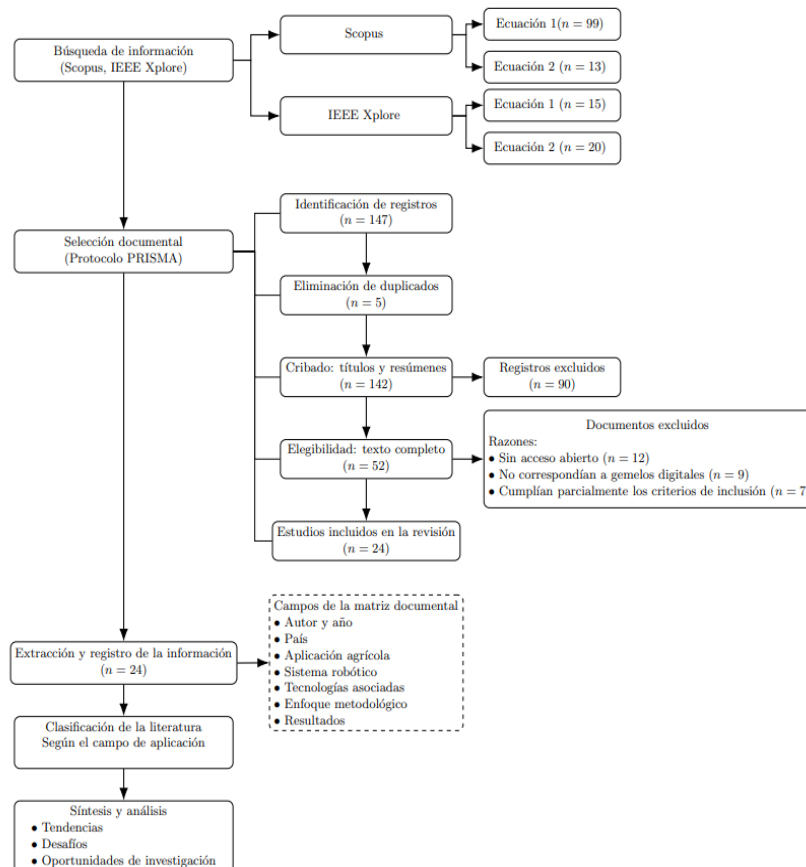
```

La selección de los documentos se realizó mediante el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), considerando las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión [19]. Durante la fase de identificación se consolidaron los registros recuperados y se eliminaron los documentos duplicados. Posteriormente, se revisaron títulos, resúmenes y palabras clave para determinar su pertinencia con la temática de

estudio. La evaluación de elegibilidad se efectuó mediante la lectura completa de los documentos preseleccionados, aplicando como criterios de inclusión publicaciones realizadas entre 2021 y 2026 que reportaban el desarrollo, la implementación, la validación o la aplicación de gemelos digitales en sistemas de robótica agrícola. Se excluyeron estudios fuera del periodo establecido y aquellos que no reportaban una aplicación de gemelos digitales en este contexto. Los documentos que cumplieron los criterios definidos conformaron la muestra documental.

La información de los documentos seleccionados se registró en una matriz documental que incluyó campos como autor y año de publicación, país de procedencia, tipo de documento, aplicación agrícola abordada, sistema robótico analizado, función desempeñada por el gemelo digital, tecnologías asociadas, enfoque metodológico utilizado, principales resultados, beneficios reportados, limitaciones identificadas y oportunidades de investigación futura. Adicionalmente, los estudios se clasificaron de acuerdo con su campo de aplicación y posteriormente se realizó una síntesis narrativa de los hallazgos reportados en la literatura, con el fin de identificar tendencias, desafíos y oportunidades de investigación en este campo.

Figura 1. Procedimiento metodológico para la búsqueda, selección, extracción y análisis de literatura sobre gemelos digitales aplicados a la robótica agrícola.



La Fig. 1 resume el procedimiento metodológico seguido para la identificación, selección, extracción y análisis de la literatura. En primer lugar, se presenta la estrategia de búsqueda aplicada en Scopus e IEEE Xplore mediante dos ecuaciones booleanas, lo que permitió recuperar un total inicial de 147 registros. Posteriormente, los documentos fueron depurados mediante el protocolo PRISMA, eliminando 5 duplicados y dejando 142 registros para el cribado por título y resumen; en esta fase se excluyeron 90 documentos, por lo que 52 pasaron a lectura completa. Durante la evaluación de elegibilidad se excluyeron 28 estudios: 12 por no contar con acceso abierto, 9 por no corresponder a aplicaciones de gemelos digitales y 7 por cumplir parcialmente los criterios de inclusión, obteniendo finalmente 24 estudios seleccionados para la revisión.

Además, ofrece una visión integrada y secuencial del curso seguido en la revisión. Su organización permite comprender cómo se relacionan la búsqueda y depuración de los registros, la conformación de la muestra documental y el análisis de los estudios seleccionados. De esta manera, el diagrama sintetiza el procedimiento mediante el cual los registros iniciales se convirtieron en una base organizada para interpretar las aplicaciones, tecnologías, tendencias, desafíos y oportunidades de investigación sobre gemelos digitales aplicados a la robótica agrícola.

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la revisión bibliográfica mediante la caracterización de los estudios seleccionados, su clasificación según los campos de aplicación, las tecnologías y los enfoques metodológicos, y la síntesis de las tendencias, los desafíos y las oportunidades reportados en la literatura.

A. Caracterización de la literatura seleccionada

Como resultado del proceso de selección documental, se obtuvo una muestra final de 24 estudios científicos relacionados con el uso de gemelos digitales en sistemas de robótica agrícola. Las publicaciones se concentraron principalmente entre 2023 y 2026 y muestran una transición desde propuestas orientadas al monitoreo y la simulación hacia enfoques relacionados con optimización operativa, transferencia Sim2Real, aprendizaje por refuerzo, navegación autónoma y coordinación de sistemas robóticos. La Tabla 1 presenta la caracterización general de los estudios incluidos, considerando el país de procedencia, el título y una síntesis de su aporte principal.

Tabla 1. Caracterización de los estudios incluidos en la revisión bibliográfica.

Referencia	Título	País o región	Descripción del estudio
Chen <i>et al.</i> [8]	Digital Twins in Plant Factory: A Five-Dimensional Modeling Method for Plant Factory Transplanter Digital Twins	China	Propone un gemelo digital para monitorear y optimizar el proceso de trasplante con una trasplantadora automatizada.
Pincheira <i>et al.</i> [20]	Overcoming Limitations of IoT Installations: Active Sensing UGV for Agricultural Digital Twins	Italia	Presenta un vehículo robótico para recopilar datos agrícolas destinados a la construcción de gemelos digitales para cultivos.
Wu <i>et al.</i> [21]	Development of an Automatic Agricultural Fruit Bagging Robot	Taiwán	Desarrolla un robot para el embolsado automático de frutos con apoyo de un gemelo digital.
Zhao <i>et al.</i> [11]	Digital Twins in Smart Farming: An Autoware-Based Simulator for Autonomous Agricultural Vehicles	China	Desarrolla un simulador de gemelo digital para validar la navegación de tractores agrícolas autónomos.
Almeida <i>et al.</i> [22]	Avaliação de um Sistema Robótico para Identificação Automática de Ervas Daninhas Utilizando Visão Computacional	Brasil	Implementa un gemelo digital para apoyar la detección automática de malezas mediante un robot agrícola tipo FarmBot.
Guo <i>et al.</i> [23]	Online Optimization of Adjustable Settings for Agricultural Machinery Assisted by Digital Twin	China	Propone un gemelo digital para optimizar los parámetros operativos de maquinaria agrícola durante la cosecha.
Liu <i>et al.</i> [10]	Digital Twin/MARS-CycleGAN: Enhancing Sim-to-Real Crop/Row Detection for MARS Phenotyping Robot Using Synthetic Images	Estados Unidos	Propone un gemelo digital para mejorar la transferencia Sim2Real en la detección de cultivos mediante un robot de fenotipado.
Rana <i>et al.</i> [24]	Towards Digital Twin of Off-Road Vehicles Using Robot Simulation Frameworks	Italia	Evalúa entornos de simulación para desarrollar gemelos digitales de vehículos agrícolas todoterreno.
Van Evert <i>et al.</i> [13]	Implementing a Digital Twin for Flexible Operation of Agricultural Robotics	Europa	Implementa un gemelo digital para coordinar y optimizar la operación de robots agrícolas en deshierbe y pulverización.
Yin <i>et al.</i> [12]	Construction Method and Case Study of Digital Twin System for Combine Harvester	China	Desarrolla un gemelo digital para monitorear el desempeño de una cosechadora combinada.
Bua <i>et al.</i> [14]	Reinforcement Learning-Driven Digital Twin for Zero-Delay Communication in Smart Greenhouse Robotics	Italia	Desarrolla un gemelo digital con aprendizaje por refuerzo para mejorar la teleoperación de un brazo robótico en

Referencia	Título	País o región	Descripción del estudio
			invernaderos.
Chang <i>et al.</i> [25]	Shifting Strategy for Power Shift Tractors Based on Digital Twin-Driven Reinforcement Learning	China	Desarrolla un gemelo digital con aprendizaje por refuerzo para optimizar el cambio de marchas en tractores agrícolas.
Fernández <i>et al.</i> [16]	DigiHortiRobot: An AI-Driven Digital Twin Architecture for Hydroponic Greenhouse Horticulture with Dual-Arm Robotic Automation	España	Presenta una arquitectura de gemelo digital para automatizar las labores de siembra y cosecha con un robot móvil de doble brazo.
Guo <i>et al.</i> [26]	Digital Twin for Monitoring Threshing Performance of Combine Harvesters	China	Desarrolla un gemelo digital para monitorear y optimizar el proceso de trilla de una cosechadora combinada.
Lang <i>et al.</i> [9]	Digital Twin-Driven System for Efficient Tomato Harvesting in Greenhouses	China	Presenta un gemelo digital para optimizar la cosecha de tomate en invernaderos con un robot cosechador autónomo.
Mirbod <i>et al.</i> [27]	From Simulation to Field Validation: A Digital Twin-Driven Sim2Real Transfer Approach for Strawberry Fruit Detection and Sizing	Estados Unidos	Implementa un enfoque Sim2Real basado en un gemelo digital para detectar y medir fresas en un robot agrícola.
Sibona <i>et al.</i> [28]	A Framework to Enable Eco-Cyber-Physical Systems for Robotics-Focused Digital Twins in Smart Farming	Australia	Propone un marco de gemelo digital para apoyar la gestión inteligente del pastoreo mediante un robot terrestre autónomo.
Silva <i>et al.</i> [29]	Development and Experimental Analysis of a Robotic System for Automated Vegetable Planting Utilizing Precision Agriculture and Computer Vision	Brasil	Desarrolla un sistema robótico con gemelo digital para automatizar la siembra, el riego y el control de malezas.
Smith <i>et al.</i> [30]	Orchard Digital Twin: A Prototype for Smart Agricultural Monitoring	Italia	Presenta un gemelo digital georreferenciado para el monitoreo inteligente de huertos mediante un vehículo autónomo.
Wang <i>et al.</i> [31]	Online Prediction Method for Greenhouse Operation Chassis Driving Status by Digital Twins-Driven	China	Desarrolla un gemelo digital para monitorear el funcionamiento de una plataforma robótica utilizada en invernaderos.
Kusper <i>et al.</i> [32]	Digital-Twin-Oriented Virtual Training Environment for Agricultural Robot Navigation: A Vineyard Rover Case Study	Hungría	Desarrolla un entorno virtual de gemelo digital para entrenar la navegación autónoma de un rover agrícola en viñedos.
Rodríguez-Nieto <i>et al.</i> [15]	Digital Twin of a Dual-Arm Autonomous Seeding Robot for Hydroponic Greenhouses	España	Desarrolla un gemelo digital para automatizar las operaciones de siembra mediante un robot autónomo de doble brazo en invernaderos hidropónicos.
Siripin <i>et al.</i> [33]	You Only Grasp Once: Human-Inspired Benign Grasping for Agricultural Products	Tailandia y Japón	Presenta un gemelo digital para planificar el agarre de productos agrícolas delicados con un brazo robótico y un gripper biomimético.
Taitou y Fujinaga [34]	Evaluation of an Optimal Approach Direction for a Tomato-Harvesting Robot Using a Digital Twin	Japón	Evalúa un gemelo digital para optimizar la aproximación de un robot cosechador de tomate en invernaderos.

Los estudios incluidos presentaron una mayor concentración en los años 2025 y 2026, lo que indica que la aplicación de gemelos digitales en la robótica agrícola constituye una línea de investigación reciente y en expansión. Este crecimiento podría estar relacionado con la necesidad de automatizar la producción y la cosecha de alimentos en condiciones ambientales variables, así como de mejorar la precisión, la seguridad y la continuidad de las operaciones agrícolas. En cuanto a la distribución geográfica, China reunió el mayor número de investigaciones, seguida de Italia, España, Brasil y Estados Unidos; también se identificaron estudios de Australia, Hungría, Japón y Taiwán, además de una colaboración entre Tailandia y Japón. La mayor presencia de China y Europa podría asociarse con su capacidad tecnológica y con el apoyo financiero de políticas y programas públicos

orientados a la agricultura inteligente, la automatización y la transformación digital del sector.

B. Clasificación de la literatura

1) Campo de aplicación agrícola

Con el propósito de organizar la literatura seleccionada, los estudios se clasificaron de acuerdo con el campo de aplicación agrícola predominante reportado en cada investigación. Cuando un estudio abordó más de una aplicación, se asignó a la categoría que representó su objetivo principal. La Tabla 2 presenta la clasificación obtenida.

Tabla 2. Clasificación de los estudios según el campo de aplicación agrícola.

Campo de aplicación	Actividad principal	Estudios	No.
Siembra y trasplantes automatizados	Establecimiento automatizado del cultivo.	Rodríguez-Nieto <i>et al.</i> [15], Fernández <i>et al.</i> [16], Chen <i>et al.</i> [8], Silva <i>et al.</i> [29]	4
Cosecha y manipulación de productos agrícolas	Recolección y manipulación de productos agrícolas.	Siripin <i>et al.</i> [33], Lang <i>et al.</i> [9], Taitou y Fujinaga [34], Wu <i>et al.</i> [21]	4
Monitoreo y fenotipado de cultivos	Seguimiento y caracterización de cultivos.	Mirbod <i>et al.</i> [27], Pincheira <i>et al.</i> [20], Liu <i>et al.</i> [10], Almeida <i>et al.</i> [22]	4
Navegación y movilidad autónoma	Desplazamiento y control de plataformas robóticas.	Wang <i>et al.</i> [31], Zhao <i>et al.</i> [11], Rana <i>et al.</i> [24], Kusper <i>et al.</i> [32]	4
Operación y optimización de maquinaria agrícola	Supervisión y optimización del desempeño de maquinaria agrícola.	Yin <i>et al.</i> [12], Guo <i>et al.</i> [26], Guo <i>et al.</i> [23], Chang <i>et al.</i> [25]	4
Gestión y coordinación de sistemas robóticos agrícolas	Planificación, coordinación y supervisión de operaciones robóticas.	Sibona <i>et al.</i> [28], van Evert <i>et al.</i> [13], Smith <i>et al.</i> [30]	3
Teleoperación y control remoto	Operación remota de sistemas robóticos.	Bua <i>et al.</i> [14]	1
Total			24

Los estudios incluidos se clasificaron en siete campos de aplicación de los gemelos digitales en sistemas de robótica agrícola. La Tabla 2 muestra que cinco categorías reunieron cuatro estudios cada una, mientras que la gestión y coordinación de sistemas robóticos agrícolas agrupó tres investigaciones y la teleoperación y el control remoto estuvo representada por un solo estudio. Esta distribución evidencia una mayor concentración de la literatura en tareas de siembra, cosecha, monitoreo, navegación y operación de maquinaria.

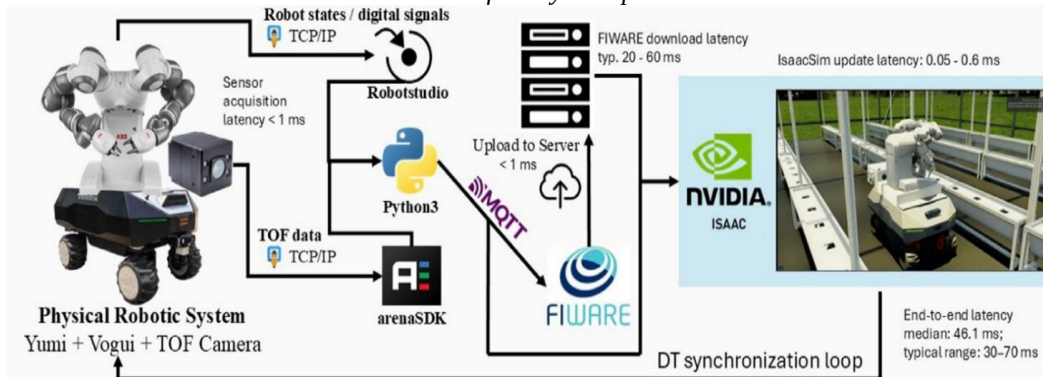
a) Siembra y trasplantes automatizados

En este campo, los gemelos digitales representaron robots y entornos destinados al establecimiento del cultivo, entre ellos sistemas de doble brazo en invernaderos hidropónicos, trasplantadoras automatizadas de plant factories y plataformas cartesianas tipo FarmBot instaladas sobre canteros. Dependiendo de cada propuesta, los modelos digitales reprodujeron el movimiento del robot, las bandejas o planteras, las herramientas de manipulación y algunas condiciones ambientales y de operación [8], [15], [16], [29].

En cuanto al hardware, se utilizaron robots colaborativos con cámaras Red, Green and Blue - RGB y Time of Flight - ToF [15], [16], trasplantadoras con Programmable Logic Controller - PLC y sensores industriales [8], y plataformas cartesianas equipadas con Arduino, Raspberry Pi y sensores de humedad [29]. Para construir y conectar los modelos digitales se empleó framework open source NVIDIA Isaac Sim, la herramienta de programación y simulación offline RobotStudio®, lenguaje de programación de alto nivel de propósito general Python, el ecosistema open source FIWARE impulsado por la Unión Europea y el protocolo de mensajería ligera para conexión IoT Message Queuing Telemetry Transport - MQTT [15].

Adicionalmente, fueron reportados como herramientas empleadas, el ecosistema open source Robot Operating System 2 - ROS 2, servicios en la nube e inteligencia artificial [16], software de diseño asistido por computador SolidWorks y procesamiento de imágenes [8] y una interfaz web con visión por computador [29]. Estas tecnologías permitieron reconocer puntos de siembra o plántulas, representar el área de trabajo, revisar los movimientos del robot y supervisar las operaciones.

El nivel de integración físico-digital varió entre conexiones bidireccionales y sincronizadas, arquitecturas de lazo cerrado para monitoreo, simulación y ejecución, y sistemas más limitados orientados al seguimiento o envío de órdenes. Como se observa en la Fig. 2, los estados del robot y los datos de percepción se transmitieron hacia NVIDIA Isaac Sim mediante RobotStudio, Python, MQTT y FIWARE, lo que permitió actualizar el entorno virtual, evaluar trayectorias y transferirlas posteriormente al sistema físico.

Figura 2. Flujo de sincronización entre el robot de siembra físico y su representación virtual.

Tomado de [15, Fig. 3].

b) Cosecha y manipulación de productos agrícolas

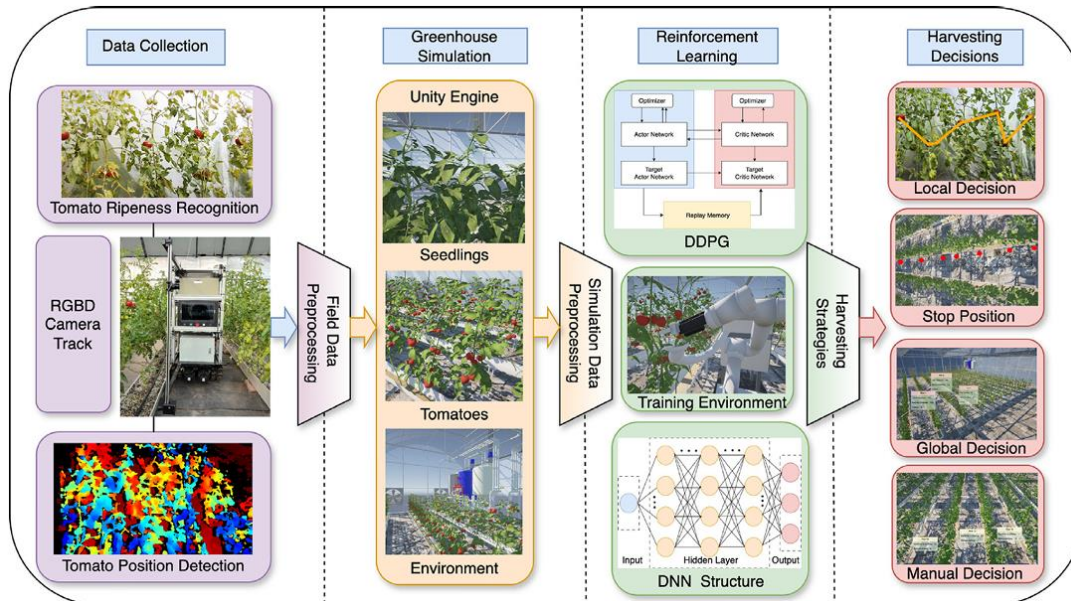
Las aplicaciones reunidas en esta categoría se orientaron a mejorar la interacción del robot con productos agrícolas delicados y con entornos de cosecha complejos. Los estudios abordaron la recolección de tomates en invernaderos, la selección de configuraciones de agarre, la evaluación de direcciones de aproximación y el embolsado automatizado de frutos jóvenes. Para ello, los modelos digitales reprodujeron aspectos como la distribución y madurez de los tomates, la geometría de los racimos, los movimientos del robot y el contacto entre el gripper y el producto [9], [21], [33], [34].

Las soluciones de hardware combinaron brazos robóticos y cámaras RGB-D para la detección y localización de tomates [9] y [21], grippers biomiméticos con accionamiento neumático y servomotores para manipular productos delicados [33], y plataformas móviles con deslizadores, manipuladores articulados y efectores de agarre para evaluar distintas direcciones de aproximación [34]. En el entorno virtual se utilizaron el motor de desarrollo 2D y 3D open source Unity con aprendizaje por refuerzo [9], el simulador de robots usado en la industria CoppeliaSim y modelos multicuerpo en MATLAB [33].

Para la descripción geométrica, cinemática, dinámica y los modelos de colisión se usaron archivos Unified Robot Description Format – URDF basados en el formato Extensible Markup Language - XML [34]. Además, Wu *et al.* [21] reportaron herramientas de visualización como: Rviz herramienta estándar de visualización 3D para el ecosistema ROS, el simulador de robótica 2D/3D open source Gazebo, y el software de manipulación MoveIt, distribuido bajo la licencia Berkeley Software Distribution - BSD. Estas herramientas permitieron probar agarres, trayectorias y direcciones de aproximación antes de su ejecución física.

El nivel de integración varió desde simulaciones para validar movimientos y estrategias antes de su ejecución física, hasta sistemas que actualizaron el entorno virtual con datos RGB-D y transfirieron las soluciones entrenadas al robot. La Fig. 3 muestra el flujo del sistema: recopilación y preprocesamiento de datos sobre la madurez y posición de los tomates, reconstrucción del invernadero en Unity, entrenamiento de estrategias de cosecha mediante aprendizaje por refuerzo y generación de decisiones sobre los frutos, las posiciones de parada y el orden de recolección. Este flujo permitió planificar la operación antes de transferirla al sistema físico.

Figura 3. Flujo del gemelo digital para la simulación, el entrenamiento y la generación de decisiones en la cosecha de tomates.



Tomado de [9, Fig. 1].

c) Monitoreo y fenotipado de cultivos

Las investigaciones agrupadas en esta categoría abordaron diferentes cultivos y tareas de observación agrícola: detección y medición de fresas [27], captura móvil de información en un huerto de manzanas [20], reconocimiento de cultivos e hileras mediante imágenes sintéticas y reales [10], e identificación de malezas en canchales de hortalizas [22].

Los sistemas físicos incluyeron un vehículo terrestre con tres pares de cámaras estéreo para recorrer cultivos de fresa [27]; un Unmanned Ground Vehicle - UGV de seis ruedas equipado con cámara RGB, sistema Real-Time Kinematic Global Positioning System - RTK-GPS, una Inertial Measurement Unit - IMU, un sensor Light Detection and

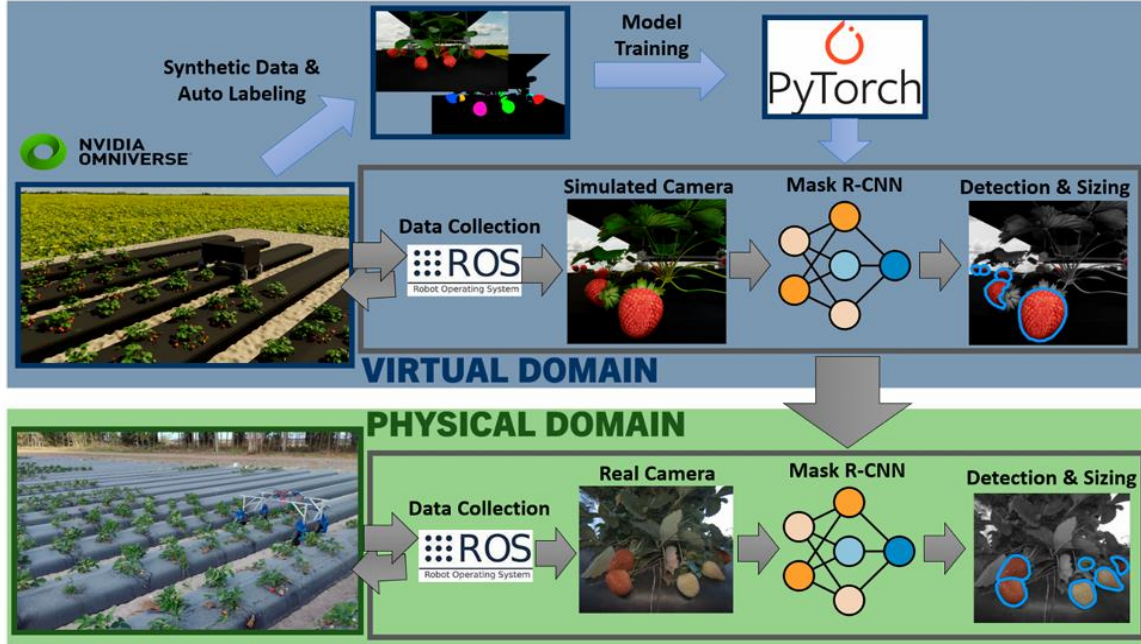
Ranging - LiDAR y un brazo robótico de cuatro grados de libertad [20]; el robot de fenotipado MARS con tres cámaras [10]; y una plataforma tipo FarmBot con cámara monocular para detectar malezas [22].

Para desarrollar los entornos digitales se utilizaron herramientas de visualización NVIDIA Omniverse e Isaac Sim [27], SolidWorks, el modelo DT/MARS basado en una Cycle-Consistent Generative Adversarial Network - CycleGAN, You Only Look Once, versión 8 - YOLOv8 y Random Sample Consensus - RANSAC [10], ROS, Edge Artificial Intelligence - Edge AI y algoritmos de navegación [20], además de una aplicación web en la nube y visión por computador basada en el espacio de color Hue, Saturation and Value - HSV [22].

La integración entre los componentes físicos y digitales se dio principalmente mediante transferencia Sim2Real y recopilación móvil de datos. En algunos casos, los modelos entrenados con imágenes sintéticas se evaluaron después en condiciones reales; en otros, las plataformas robóticas actuaron como fuentes móviles de información para actualizar

la representación del cultivo. La Fig. 4 presenta, como primer caso representativo, la creación de una réplica digital de un cultivo de fresa, utilizada para generar datos sintéticos, entrenar el sistema de percepción y validar posteriormente la detección y medición de frutos en campo.

Figura 4. Transferencia Sim2Real para la detección y medición de fresas a partir de una réplica digital del cultivo.

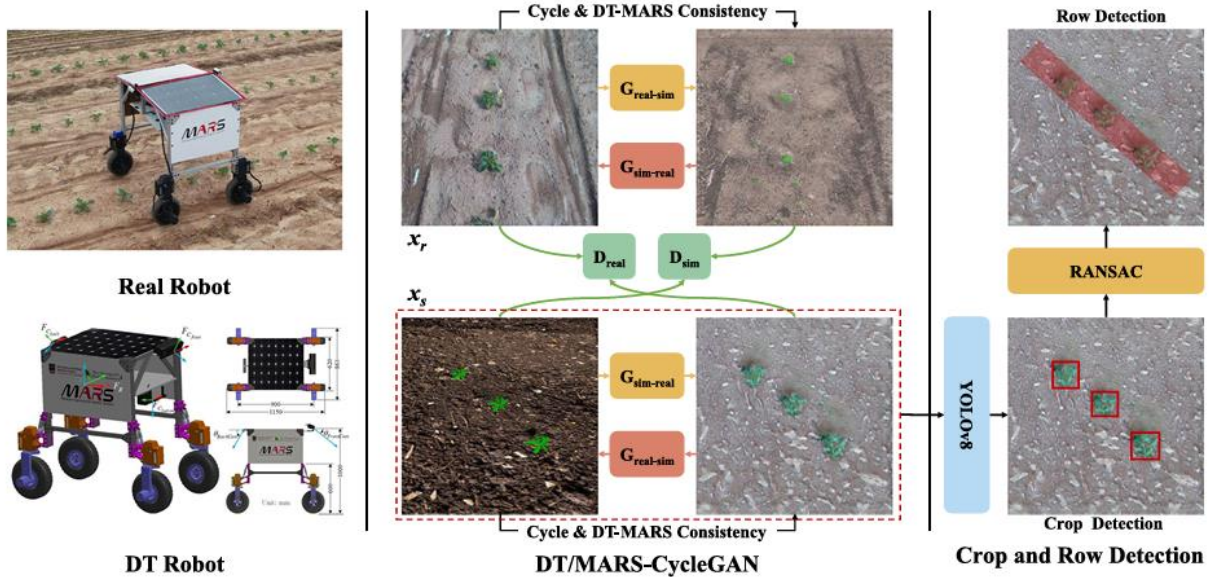


Tomado de [27, Fig. 1].

La Fig. 5 presenta un segundo caso representativo, en el que el robot físico MARS se integra con su representación digital y con el modelo DT/MARS-CycleGAN para

transformar imágenes sintéticas, detectar cultivos mediante YOLOv8 e identificar hileras mediante RANSAC.

Figura 5. Integración entre el robot físico MARS, su gemelo digital y el proceso de detección de cultivos e hileras.



Tomado de [10, Fig. 1].

d) Navegación y movilidad autónoma

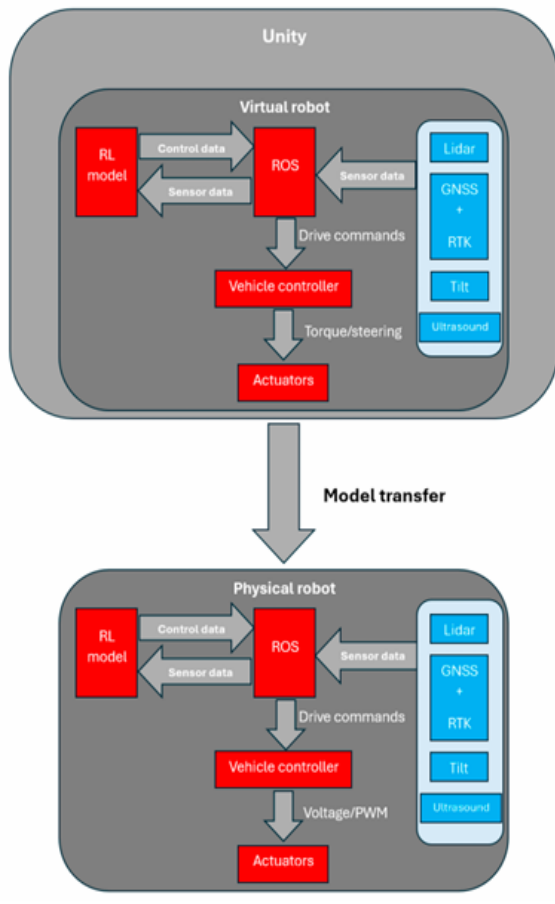
En este campo se utilizaron gemelos digitales para estudiar el desplazamiento de robots agrícolas en invernaderos, campos y viñedos. Los modelos reprodujeron los vehículos, las rutas, las condiciones del terreno, los sensores y los obstáculos, y se emplearon para predecir el estado de conducción, validar trayectorias, analizar la movilidad en superficies irregulares y entrenar agentes autónomos [11], [24], [31], [32].

Las plataformas incluyeron un chasis de ruedas con sensores para labores en invernadero [31], vehículos agrícolas autónomos utilizados en pruebas de seguimiento de rutas [11], robots todoterreno de orugas y ruedas con encoders, Global Navigation Satellite System - GNSS, IMU y sensores visuales [24], y un rover de viñedo representado con LiDAR y GNSS

en un entorno virtual [32]. Para su desarrollo se utilizaron Unity 3D, MATLAB y Open Platform Communications Unified Architecture - OPC UA [31]; Autoware y ROS [11]; Gazebo, URDF, MSC Adams y Simulink [24]; así como Unity, ROS 2, generación procedural de mapas y aprendizaje por refuerzo [32].

La integración físico-digital varió entre la sincronización bidireccional en tiempo real, la validación de algoritmos en simulación y campo, y el entrenamiento completamente virtual sin actualización continua desde el robot físico. La Fig. 6 muestra esta última modalidad mediante la conexión entre Unity y ROS 2, la transferencia del modelo de navegación y la correspondencia entre el rover Grapler físico y su representación digital.

Figura 6. Gemelo digital y transferencia del modelo de navegación del rover Grapler. (a) arquitectura del entrenamiento virtual y transferencia al robot físico; (b1) prototipo físico Grapler y (b2) su representación digital en Unity.



a

Tomado de [32, Figs. 1 y 2].

b1



b2



e) Operación y optimización de maquinaria agrícola

Las investigaciones de esta categoría aplicaron gemelos digitales a cosechadoras y tractores para representar la maquinaria, la trilla, los sistemas de transmisión y la relación entre los parámetros ajustables y el desempeño operativo, con el propósito de mejorar la eficiencia, reducir el consumo y disminuir las pérdidas de grano [12], [25], [23], [26].

El hardware comprendió una cosechadora Lovol GM100 instrumentada con sensores para registrar variables operativas,

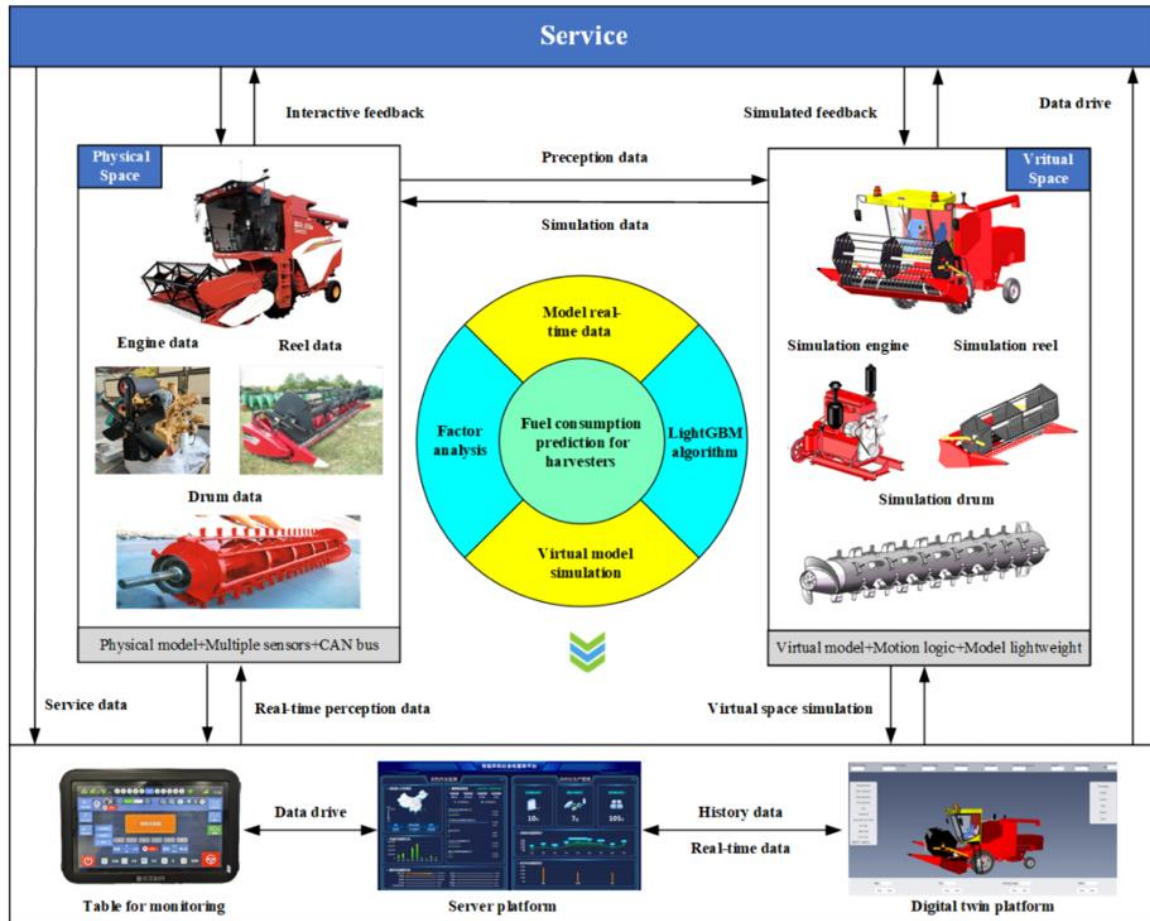
movimiento de componentes y consumo de combustible [12]; una cosechadora de maíz 4YZL-6S equipada con cámara *Charge-Coupled Device* - CCD, Jetson TX2, galgas extensométricas y sensores de velocidad, torque, rendimiento y rotura del grano [26]; y un tractor con transmisión *power shift* provisto de sensores de presión, velocidad y temperatura [25]. En el entorno digital se combinaron SolidWorks, CMOOnlineLib, *Web Graphics Library* - WebGL y LightGBM [12]; un modelo sustituto derivado de *Discrete Element Method* - DEM, YOLOv4-tiny y redes *Gated Recurrent Unit*–

Convolutional Neural Network GRU-CNN [26]; modelos *Radial Basis Function* - RBF y optimización evolutiva [23]; así como modelado mecanicista, aprendizaje por refuerzo *Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient* - TD3 y control difuso *Proportional-Integral-Derivative* - PID [25].

La integración físico-digital permitió actualizar los modelos con datos reales y devolver predicciones o ajustes a la maquinaria mediante sincronización en tiempo real,

optimización de la trilla, evaluación alternada entre los espacios físico y virtual y transferencia de estrategias al tractor. La Fig. 7 muestra la cosechadora Lovol GM100, sus componentes físicos y virtuales, el intercambio de datos mediante sensores y bus *Controller Area Network* - CAN, y la plataforma empleada para monitorear la operación y predecir el consumo de combustible.

Figura 7. Sistema de gemelo digital de la cosechadora Lovol GM100.



Tomado de [12, Fig. 6].

f) Gestión y coordinación de sistemas robóticos agrícolas

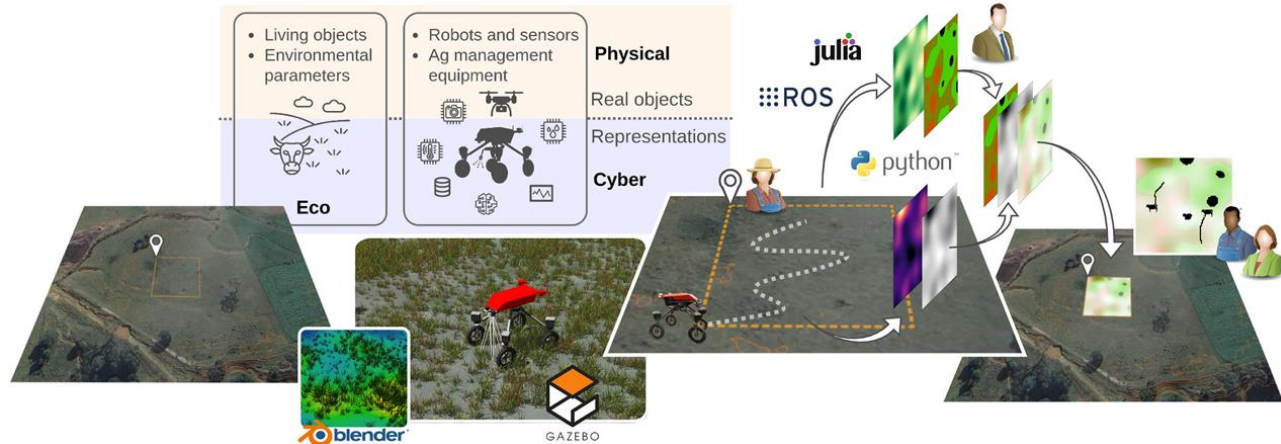
En este campo, los estudios abordaron la gestión de pasturas y ganado, la planificación de labores de deshierbe y pulverización, y la construcción de modelos tridimensionales georreferenciados de huertos para apoyar el monitoreo y la toma de decisiones [13], [28], [30].

El hardware incluyó el robot terrestre Swagbot para recoger datos ambientales en potreros [28]; robots Agreenculture y Robotti, tractores adaptados e implementos inteligentes con GNSS-RTK, LiDAR, cámaras y comunicaciones CAN e ISOBUS [13]; y el UGV Agri.Q, equipado con LiDAR, GNSS y cámaras estéreo y multispectral para mapear un huerto de manzanas [30]. En la

parte digital se emplearon ROS, Gazebo, Python, Julia y procesos gaussianos [28]; Farming Controller, ROS 2, Navigation 2 y herramientas de planificación [13]; además de *Simultaneous Localization and Mapping* - SLAM, CloudCompare, modelos geoespaciales y YOLOv8 [30].

La integración tuvo distintos alcances: en algunos casos, la simulación se realizó antes de recoger datos reales; en otros, los robots y los implementos enviaron sus estados y recibieron nuevas rutas, mientras que los datos del huerto se usaron para actualizar su modelo georreferenciado. La Fig. 8 reúne el ecosistema físico, el robot terrestre, el entorno de simulación, los modelos digitales y el conocimiento humano incorporado en la toma de decisiones, mostrando cómo el gemelo digital permite integrar datos, generar predicciones y coordinar las acciones en campo.

Figura 8. Sistema eco-ciberfísico para la gestión robótica del pastoreo.



Tomado de [28, Fig. 1].

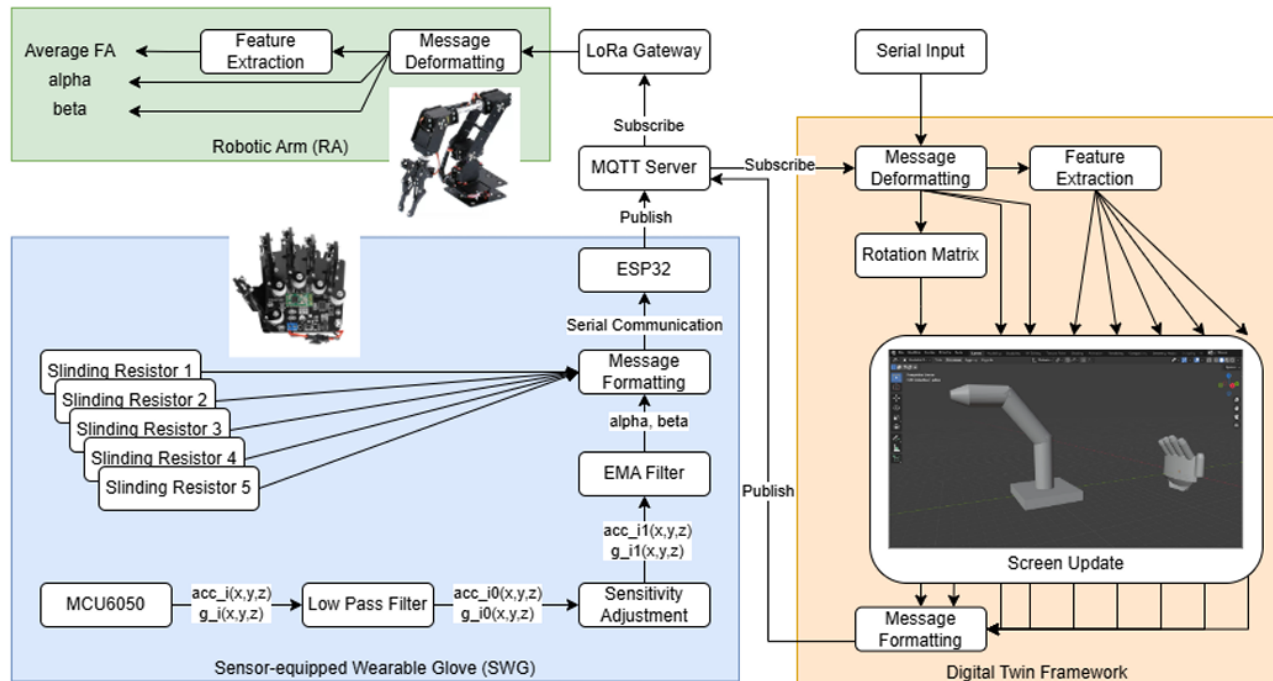
g) *Teleoperación y control remoto*

En este campo, el gemelo digital se empleó para controlar a distancia un brazo robótico de seis grados de libertad dentro de un invernadero hidropónico mediante un guante sensorizado [14]. El hardware incluyó Arduino Uno, resistencias deslizantes, acelerómetro, giroscopio, Bluetooth, seis servomotores, dispositivos ESP32 con tecnología *Long Range* - LoRa, gateway y sensores ambientales. En la parte digital se utilizaron MQTT, Node-RED, modelos 3D del guante y del robot, y un algoritmo *Deep Deterministic Policy*

Gradient - DDPG de aprendizaje por refuerzo para predecir los movimientos del operador.

La integración físico-digital funcionó en tres modos: Real2Digital, para transferir datos físicos al entorno virtual; Digital2Real, para enviar órdenes al brazo; y Digital2Digital, para probar comandos sin accionar el equipo. Como se observa en la Fig. 9, los datos capturados por el guante se procesan y transmiten mediante MQTT para actualizar los modelos tridimensionales y controlar el brazo robótico físico.

Figura 9. Integración físico-digital para la teleoperación de un brazo robótico mediante un guante sensorizado.



Tomado de [14, Fig. 4].

2) Tecnologías asociadas

Las tecnologías asociadas a los gemelos digitales en robótica agrícola incluyen herramientas que permiten conectar

el sistema físico con su representación virtual, capturar datos, validar comportamientos, entrenar algoritmos y optimizar la operación. La Tabla 3 las agrupa según la función que cumplen dentro del sistema.

Tabla 3. Tecnologías asociadas a los gemelos digitales en robótica agrícola

Grupo tecnológico	Tecnologías identificadas	Función dentro del gemelo digital
Simulación y modelado virtual	Gazebo, Unity, NVIDIA Isaac Sim, RobotStudio, CoppeliaSim, PyBullet, MATLAB/Simulink, MSC Adams, SolidWorks, WebGL, Blender, EDEM/DEM, <i>Computer-Aided Design</i> (CAD), URDF, <i>Simulation Description Format</i> (SDF) y <i>Universal Scene Description</i> (USD)	Representar robots, maquinaria, cultivos y entornos agrícolas; analizar su dinámica y validar movimientos, trayectorias y configuraciones antes de la ejecución física
Sensórica e IoT	Cámaras RGB, RGB-D, ToF, estéreo y multiespectrales; LiDAR, GNSS-RTK, IMU, encoders y sensores de presión, velocidad, torque, humedad, combustible, rendimiento y variables ambientales	Capturar el estado de robots, maquinaria y cultivos, generar datos operativos y actualizar la representación digital
Visión por computador y reconstrucción espacial	YOLO, <i>Mask Region-Based Convolutional Neural Network</i> (Mask R-CNN), procesamiento RGB y HSV, OpenCV, <i>Scale-Invariant Feature Transform</i> (SIFT), RANSAC, segmentación, SLAM, nubes de puntos, fotogrametría, <i>Iterative Closest Point</i> (ICP), <i>Block-Matching and 3D Filtering</i> (BM3D) y procesamiento de imágenes	Detectar frutos, plántulas, malezas, hileras y obstáculos; estimar posiciones y reconstruir cultivos y entornos para apoyar la navegación y la manipulación
Inteligencia artificial, predicción y optimización	<i>Cycle-Consistent Generative Adversarial Network</i> (CycleGAN), RetinaGAN, LightGBM, GRU-CNN, MobileNetV2, FoMo, redes neuronales, <i>Support Vector Regression</i> (SVR), <i>Gaussian Process Regression</i> (GPR), XGBoost, modelos RBF, procesos gaussianos, modelos sustitutos y algoritmos evolutivos	Clasificar, predecir, generar datos sintéticos, estimar variables de desempeño y optimizar parámetros de operación
Aprendizaje por refuerzo	DDPG, Adaptive-Exploration DDPG, TD3 y agentes entrenados en Unity o entornos personalizados	Aprender estrategias de control, anticipar movimientos, planificar cosechas, optimizar trayectorias y adaptar la respuesta del sistema
Comunicación, computación e integración ciberfísica	ROS y ROS 2, MQTT, FIWARE, OPC UA, CAN, ISOBUS, LoRa, <i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> (TCP/IP), WebSocket, Bluetooth, 4G/5G, <i>Application Programming Interfaces</i> (API), Node-RED, bases de datos, <i>edge computing</i> y computación en la nube	Intercambiar datos, estados y órdenes entre sensores, robots, maquinaria, servidores y modelos virtuales, además de procesar y almacenar la información
Control, planificación y navegación autónoma	PID, control difuso, <i>Pure Pursuit</i> , <i>Hybrid A*</i> , <i>A*</i> , <i>Timed Elastic Band Planner</i> (TEB Planner), MoveIt, Navigation 2, <i>Autoware</i> , <i>Extended Kalman Filter</i> (EKF), localización Monte Carlo, planificación basada en el <i>Traveling Salesman Problem</i> (TSP) y control de actuadores	Ejecutar rutas y tareas, localizar plataformas, seguir hileras, controlar actuadores y transferir decisiones al sistema físico
Transferencia e integración físico-digital	Sim2Real, <i>hardware-in-the-loop</i> , lazo cerrado, sincronización bidireccional, actualización con datos reales y validación simulación-campo	Reducir la brecha entre los entornos virtual y físico, comprobar algoritmos y transferir estrategias, órdenes o ajustes al robot y la maquinaria

Los estudios emplearon entornos de simulación y modelado virtual para representar robots, maquinaria y escenarios agrícolas, así como para comprobar movimientos, trayectorias y configuraciones antes de las pruebas físicas [11], [24]. La captura de información se realizó mediante cámaras RGB, RGB-D, ToF y multiespectrales para tareas de detección, localización, reconstrucción y manipulación [10], [27], mientras que LiDAR, GNSS e IMU se utilizaron en navegación, mapeo y monitoreo de robots y maquinaria [20], [30]. Los datos obtenidos fueron procesados mediante técnicas de visión por computador y modelos de aprendizaje automático para reconocer cultivos, frutos, malezas e hileras, generar datos sintéticos, estimar variables de desempeño y optimizar parámetros de operación [8], [12], [26].

El aprendizaje por refuerzo se utilizó para entrenar estrategias de cosecha, navegación, control de maquinaria y compensación de latencia [9], [14], [25]. Para la comunicación y coordinación de los componentes se emplearon tecnologías como ROS y ROS 2, MQTT, FIWARE, OPC UA, CAN y servicios de computación en la nube o en el borde [13], [16],

[31]. También se incorporaron algoritmos de control, planificación y navegación para ejecutar rutas, localizar plataformas y controlar actuadores [9], [11], [15].

3) Enfoque metodológico

Desde el punto de vista metodológico, los estudios seleccionados emplearon distintas estrategias para diseñar, implementar y evaluar los gemelos digitales y sistemas ciberfísicos agrícolas. La Tabla 4 organiza estas estrategias en siete enfoques, según los procedimientos empleados para estructurar las arquitecturas, desarrollar los sistemas, vincular los componentes físicos y virtuales y evaluarlos. Debido al carácter híbrido de las propuestas, un mismo estudio pudo combinar más de un enfoque metodológico.

Tabla 4. Enfoques metodológicos identificados en los estudios seleccionados

Enfoque metodológico	Forma de aplicación en los estudios
Diseño y desarrollo de arquitectura	Organización de los componentes físicos, virtuales, comunicacionales y de servicios mediante arquitecturas ciberfísicas, modelos de cinco dimensiones, plataformas IoT o entornos integrados de simulación, monitoreo y control.
Desarrollo de prototipo y validación experimental	Construcción o adaptación de robots, maquinaria, sensores, mecanismos de manipulación e interfaces digitales, seguida de pruebas en laboratorio, prototipos a escala, invernaderos, canteros, huertos, viñedos, pasturas o campos agrícolas.
Simulación y validación físico-virtual	Representación de robots, maquinaria, sensores, cultivos y entornos agrícolas para comprobar percepción, trayectorias, dinámica, navegación, manipulación o control mediante simulación, comparación con datos físicos o pruebas <i>hardware-in-the-loop</i> .
Modelado predictivo y optimización basada en datos	Uso de datos experimentales, modelos de aprendizaje automático, modelos sustitutos, modelos ecológicos o algoritmos de optimización para estimar variables, anticipar estados del sistema y seleccionar parámetros de operación.
Transferencia Sim2Real, entrenamiento virtual y generación de datos sintéticos	Generación, transformación o utilización de datos y escenarios virtuales para entrenar modelos y preparar o evaluar su transferencia a imágenes, sensores o sistemas agrícolas físicos.
Aprendizaje por refuerzo para control y toma de decisiones	Entrenamiento de agentes mediante interacción con entornos virtuales para anticipar movimientos, planificar cosechas, controlar maquinaria o desarrollar estrategias de navegación autónoma.
Monitoreo, sincronización y control en línea	Captura de datos del sistema físico para actualizar su representación digital y, en las arquitecturas bidireccionales, enviar rutas, comandos, parámetros o ajustes al robot o la maquinaria.

En el diseño de las arquitecturas se identificaron modelos de cinco dimensiones [8], [31] y estructuras ciberfísicas o plataformas de integración para coordinar la adquisición de datos, la actualización del modelo digital y la generación de acciones sobre el sistema físico [13], [16]. En varios trabajos, estas arquitecturas se acompañaron de prototipos y pruebas experimentales orientadas a verificar la interacción entre sus componentes [15], [16].

La simulación se incorporó en las etapas de diseño, entrenamiento y validación para comprobar trayectorias, dinámica, percepción y estrategias de control antes o durante las pruebas físicas [11], [24]. En otros estudios, los modelos virtuales se compararon con datos experimentales o se utilizaron para entrenar algoritmos evaluados posteriormente con información del sistema físico [10], [27]. También se emplearon esquemas de co-simulación para vincular modelos

dinámicos y controladores [24], así como pruebas *hardware-in-the-loop* para evaluar la interacción entre el entorno virtual y los componentes físicos [15].

El modelado predictivo y la optimización se usaron para estimar las variables operativas, seleccionar las configuraciones y ajustar los parámetros a partir de datos experimentales [12], [26]. La generación de datos sintéticos y la transferencia Sim2Real se emplearon para entrenar a los modelos en entornos virtuales y luego evaluarlos con los datos físicos [10], [27]. Además, el aprendizaje por refuerzo se agregó para entrenar las políticas de control así como la toma de decisiones en escenarios simulados [14], [25], [32].

La integración físico-digital se implementó mediante distintos flujos de información. En algunos casos, los datos del sistema físico se utilizaron para actualizar la representación virtual o alimentar modelos de monitoreo y predicción [12], [30]. En otros, se establecieron conexiones parciales en las que los datos físicos actualizaban el modelo digital, utilizado después para apoyar la planificación, el monitoreo o la toma de decisiones [8], [28]. También se implementaron flujos bidireccionales mediante los cuales el entorno digital recibía variables operativas y enviaba rutas, comandos, parámetros o ajustes al sistema físico [13], [15], [26].

4) Tendencias, desafíos y oportunidades

Los estudios seleccionados reportaron tendencias comunes en el desarrollo de gemelos digitales aplicados a la robótica agrícola, así como desafíos recurrentes y oportunidades de investigación futura. La Tabla 5 reúne estos hallazgos a partir de lo señalado por los autores en cada publicación.

Tabla 5. Tendencias, desafíos y oportunidades reportados en los estudios seleccionados

Dimensión	Aspectos reportados por los estudios
Tendencias	Integración de IoT y arquitecturas ciberfísicas para intercambiar información entre los sistemas físicos y sus representaciones digitales.
	Incorporación de inteligencia artificial para percepción, predicción y optimización de las operaciones agrícolas.
	Uso de simulación, datos sintéticos y transferencia Sim2Real para entrenar y evaluar modelos antes o durante su aplicación física.
	Aplicación de aprendizaje por refuerzo para control, navegación, planificación y teleoperación.
Desafíos	Desarrollo de sistemas orientados a la autonomía y la toma de decisiones.
	Diferencias entre la simulación y el comportamiento físico de robots, maquinaria, sensores y entornos agrícolas.
	Generalización limitada entre cultivos, terrenos, tareas, usuarios y condiciones operativas.
	Sensibilidad de los sistemas de percepción a iluminación, sombras, oclusiones, fondos complejos y objetos no objetivo.
	Validaciones restringidas a laboratorios, prototipos, tareas específicas, escenarios controlados o periodos reducidos.
Desafíos	Problemas de sincronización, latencia, calidad de los datos, estabilidad de las redes y dependencia de sensores y comunicaciones.
	Dificultades para ampliar los sistemas hacia operaciones comerciales, coordinación multi-robot, mayor seguridad y procesamiento en tiempo real.

Dimensión	Aspectos reportados por los estudios
Oportunidades	Ampliar las pruebas en campo a diferentes cultivos, terrenos, tareas, condiciones ambientales y escalas de operación.
	Actualizar y calibrar las representaciones digitales mediante datos físicos y retroalimentación experimental.
	Mejorar los modelos de percepción y del entorno mediante reconstrucción 3D, nuevos sensores y conjuntos de datos más diversos.
	Desarrollar modelos más ligeros y adaptativos para procesamiento en tiempo real y dispositivos de borde.
	Incorporar control en lazo cerrado, sincronización adaptativa, mecanismos de seguridad y actualización autónoma.
	Integrar percepción, planificación y ejecución, y ampliar las arquitecturas hacia la coordinación multi-robot.
	Fortalecer las métricas, los protocolos y los procedimientos para evaluar la confiabilidad, la escalabilidad y la viabilidad económica.

Entre las tendencias reportadas se identificó la integración entre los componentes físicos y digitales mediante IoT y arquitecturas ciberfísicas [8], [16]. También se incorporó inteligencia artificial en tareas de percepción, predicción y optimización [10], [26], junto con simulación, datos sintéticos y transferencia Sim2Real para el entrenamiento y la evaluación de modelos [10], [27]. El aprendizaje por refuerzo se utilizó en funciones de control, navegación, teleoperación y planificación [14], [32].

Los desafíos señalados se concentraron en las diferencias entre el comportamiento simulado y el funcionamiento físico de los sistemas [24], [32], así como en la generalización a otros cultivos y escenarios operativos [16], [27]. En los sistemas de percepción, los autores reportaron sensibilidad ante variaciones de iluminación, oclusiones, fondos complejos y objetos no objetivo [10], [29]. También se mencionaron restricciones en el alcance de las pruebas, dificultades de sincronización y comunicación, y limitaciones para ampliar las implementaciones a escalas comerciales o configuraciones multi-robot [13], [16], [26].

Como líneas futuras, los estudios propusieron ampliar la validación en campo a otros cultivos, terrenos y condiciones ambientales [24], [31]. También plantearon actualizar las representaciones digitales con datos físicos [26], [27] y fortalecer la percepción mediante sensores, reconstrucciones 3D y conjuntos de datos más diversos [27], [30]. Otras propuestas incluyeron desarrollar soluciones más ligeras para la operación en tiempo real [14], mejorar el control y la seguridad [33], avanzar hacia la coordinación multi-robot [15], [16] y fortalecer los procedimientos de evaluación [34].

IV. DISCUSIÓN

A partir de los resultados, se analizan los cambios en el uso de los gemelos digitales en la robótica agrícola y las dificultades que aún limitan su aplicación en condiciones reales. Uno de los primeros indicios de este desarrollo es el crecimiento reciente de las publicaciones y su distribución geográfica.

El patrón temporal y geográfico presentado en la Tabla 1 confirma que esta línea de investigación ha ganado atención en los últimos años. La mayor concentración de publicaciones

se observó en 2025 y en los estudios disponibles de 2026, lo que coincide con Wang [35], quien identificó un aumento de los trabajos posteriores a 2020 y una mayor presencia de prototipos y aplicaciones en entornos operativos, aunque señaló que los gemelos digitales aplicados a la agricultura todavía se encuentran en una etapa inicial de desarrollo. A pesar de la procedencia diversa de los estudios, la mayor presencia de China y Europa evidencia una concentración en determinados núcleos de investigación. En China, este patrón puede relacionarse con la importancia de sostener la producción de alimentos para una población numerosa y responder a las presiones ambientales y climáticas que afectan al sector agrícola [36], junto con el impulso estatal a las tecnologías y equipamientos de agricultura inteligente, las plataformas de datos, los modelos algorítmicos y la digitalización de la producción agrícola [37]. En Europa, la inversión pública también ha favorecido estas investigaciones, con más de 200 millones de euros destinados a la digitalización agrícola mediante Horizonte 2020, incluidos recursos específicos para robótica, Internet de las cosas y plataformas digitales [38]. Por tanto, la concentración observada se explica, en buena medida, por la combinación de necesidades alimentarias, condiciones ambientales adversas, capacidad tecnológica y disponibilidad de financiación pública para la agricultura inteligente. Este patrón es consistente con Gund *et al.* [39], quienes situaron a China entre los países con mayor producción científica sobre gemelos digitales en agricultura y destacaron la participación de países europeos como los Países Bajos y Alemania, así como la existencia de fuertes vínculos de colaboración dentro de Europa.

El paso del monitoreo y la simulación hacia la predicción, la optimización y la toma de decisiones es una de las tendencias más claras de la Tabla 5. En los estudios más recientes, los modelos digitales no solo representan el estado del sistema físico, sino que también permiten anticipar variables operativas y entrenar estrategias para robots o maquinaria. Wang [35] respalda esta evolución al identificar una mayor presencia de prototipos con funciones predictivas, prescriptivas y de automatización. De forma complementaria, Zhang *et al.* [18] describen una transición hacia sistemas con mayores capacidades de predicción y optimización. No obstante, este avance no ha sido uniforme, pues los estudios presentan diferencias en su alcance funcional y nivel de implementación. Esto indica que la incorporación de capacidades más avanzadas no equivale todavía a una consolidación general del campo, valoración que también sostienen Tagarakis *et al.* [40].

La Tabla 2 muestra una amplia variedad de aplicaciones, desde la siembra y la cosecha hasta la navegación, la coordinación y la teleoperación. Sin embargo, esta amplitud temática no se traduce necesariamente en versatilidad, ya que predominaron las soluciones diseñadas para una tarea concreta y vinculadas a un cultivo, entorno u operación específica. Incluso las propuestas de mayor alcance, que integraron más de una labor, mantuvieron una aplicación delimitada. Esto muestra que la diversidad del campo se expresa principalmente en la variedad de soluciones especializadas, más que en sistemas capaces de integrar varias labores o adaptarse a diferentes contextos agrícolas.

En correspondencia con esta especialización, la coordinación integral, la teleoperación y las plataformas multipropósito tuvieron una presencia limitada en la muestra. Van Evert *et al.* [13] integró vehículos, implementos y distintas operaciones, mientras Bua *et al.* [14] representó el único caso de teleoperación identificado. No obstante, la integración de varias tareas ya ha comenzado a desarrollarse en la robótica agrícola, como muestran Fontani *et al.* [41] al identificar plataformas multipropósito con diseños modulares y herramientas intercambiables. La menor presencia de plataformas multipropósito en esta revisión no debe interpretarse como ausencia de esta línea de desarrollo, ya que también puede estar relacionada con las bases consultadas, los términos de búsqueda y los criterios de selección.

Aunque la Tabla 3 muestra una amplia variedad de tecnologías, esta diversidad no produjo el mismo nivel de integración entre el sistema físico y el digital. Estas tecnologías permitieron recopilar datos, entrenar sistemas de percepción, anticipar comportamientos y apoyar tareas de navegación, cosecha y control, pero parte de los estudios mantuvo el entrenamiento y la optimización en el entorno virtual, sin convertirlos automáticamente en órdenes, rutas o ajustes para el robot. Nasirahmadi y Hensel [42] señalan que una conexión más avanzada requiere articular registro, modelado, análisis y comunicación para actualizar el entorno virtual y devolver información al sistema físico.

Este patrón confirma que los estudios no han avanzado al mismo ritmo en la integración físico-digital. Rodríguez-Nieto *et al.* [15] y Fernández *et al.* [16] se aproximaron a una conexión bidireccional al articular percepción, simulación, planificación y ejecución, mientras van Evert *et al.* [13] alcanzó un nivel intermedio y Zhao *et al.* [11] mantuvo el entorno digital principalmente como espacio de prueba y validación. La comparación muestra que incorporar predicción, optimización, aprendizaje por refuerzo o transferencia Sim2Real puede fortalecer el entrenamiento y anticipar el comportamiento del sistema antes de su aplicación física. Sin embargo, la conexión automática entre las decisiones generadas en el entorno virtual y la respuesta del robot se identificó de manera limitada en los estudios analizados, por lo que los avances del campo se concentran en la simulación, el análisis y el entrenamiento, más que en una conexión bidireccional continua entre ambos componentes. Esto refuerza la necesidad de avanzar hacia sistemas de lazo cerrado capaces de actualizar sus decisiones y ajustar la respuesta del robot durante la operación.

Purcell y Neubauer [17] distinguen tres niveles de integración físico-digital: el modelo digital, entendido como una representación virtual sin intercambio automático de datos con el sistema físico; la sombra digital, que recibe información del sistema físico para actualizar su estado, pero no devuelve acciones de manera automática; y el gemelo digital plenamente integrado, caracterizado por un flujo bidireccional en el que los datos físicos actualizan el modelo virtual y este, a su vez, puede generar decisiones o ajustes sobre el sistema real. Al aplicar esta clasificación a la muestra, se observan estudios cercanos a simuladores sin actualización continua, otros que reciben datos físicos sin intervenir sobre el robot y algunos con intercambio automático de órdenes, rutas o ajustes. Frente a esto, Tagarakis *et al.* [40] advierten que estas

categorías suelen emplearse como equivalentes, lo que ayuda a explicar por qué el concepto de gemelo digital no se utiliza de la misma manera en toda la literatura. Estas diferencias reflejan grados distintos de integración físico-digital y dificultan la comparación entre estudios; si el nivel de conexión no se precisa, también pueden llevar a sobreestimar el avance del campo.

La Tabla 4 muestra que los sistemas no se diseñaron ni se evaluaron de la misma manera. Algunos estudios combinaron arquitecturas y prototipos con simulación, modelado predictivo y optimización, mientras que en otros la simulación concentró gran parte de la evaluación. En ciertos casos permitió comprobar trayectorias, percepción, dinámica y control antes de las pruebas físicas; en otros, los resultados virtuales solo se contrastaron parcialmente con datos reales. Además, predominaron las evaluaciones realizadas en espacios controlados o terrenos estructurados, con rutas, hileras y obstáculos previamente definidos. Aunque esto reduce riesgos y facilita la comparación, también incorpora menos variabilidad que el campo. Una situación similar fue señalada por Tsolakis *et al.* [43], quienes identificaron un predominio de diseños agrícolas genéricos y señalaron que estos entornos no reproducen por completo la complejidad de las operaciones reales, marcada por terrenos y condiciones meteorológicas cambiantes.

La brecha entre simulación y realidad se hizo evidente en navegación y percepción; Zhao *et al.* [11] reportó un mayor error lateral en campo y limitaciones para representar la interacción neumático-suelo, mientras Rana *et al.* [24] mostró que representar el terreno con mayor detalle exige más capacidad de procesamiento. Kusper *et al.* [32] obtuvo resultados en un viñedo virtual, pero dejó pendiente la comparación cuantitativa con el rover físico. En percepción, Liu *et al.* [10] mejoró la transferencia de imágenes sintéticas a datos reales, aunque persistieron dificultades de generalización ante cambios de iluminación, sombras, oclusiones y fondos complejos propios del entorno agrícola. Estos resultados indican que el desempeño alcanzado en escenarios estructurados no puede trasladarse directamente al campo. Superar estas limitaciones requiere combinar conjuntos de datos más diversos con sensores y modelos del entorno capaces de representar mejor la variabilidad de los cultivos.

La diferencia entre el desempeño virtual y el físico muestra que la transferencia Sim2Real ayuda a reducir las pruebas iniciales, pero no demuestra por sí sola que el desempeño obtenido se conservará en condiciones reales. Zhao *et al.* [44] explican que las diferencias en los sensores, la actuación del robot y las situaciones no incluidas en el entrenamiento pueden afectar el rendimiento después de la transferencia. Esto también se observa en Rodríguez-Nieto *et al.* [15], cuyo sistema incorporó pruebas *hardware-in-the-loop* y un robot real, pero fue evaluado en un invernadero hidropónico controlado, lo que limita el alcance de sus resultados frente a escenarios agrícolas menos predecibles. Por ello, la transferencia debe calibrarse con datos reales y evaluarse en diferentes condiciones agrícolas. También es necesario actualizar periódicamente las representaciones digitales con información del sistema físico antes de asumir que el desempeño virtual se conservará en campo.

Además de representar bien las condiciones reales, estos sistemas necesitan alcanzar una mayor madurez tecnológica para poder aplicarse a mayor escala. Aunque se identificaron prototipos físicos y pruebas en invernaderos, huertos y campos, las validaciones identificadas tendieron a ser breves y a permanecer vinculadas a un cultivo, robot o tarea específica. Esto limita la generalización y muestra que incorporar funciones predictivas, autónomas o de optimización no garantiza todavía un funcionamiento estable y continuo. Wang [35] dimensiona este hallazgo al señalar que, pese al crecimiento de los prototipos, gran parte de los gemelos digitales agrícolas permanece en etapas conceptuales o experimentales, mientras las arquitecturas más amplias aún requieren depuración e integración con sus componentes físicos y digitales.

A medida que aumenta la cantidad de sensores, robots y fuentes de datos, también se vuelve más difícil mantener una comunicación rápida, estable y segura. En la muestra se reportaron problemas de latencia, sincronización, calidad de los datos, estabilidad de las redes y procesamiento en tiempo real, mientras la coordinación multirrobot y las implementaciones comerciales tuvieron una representación reducida entre los estudios analizados. Nasirahmadi y Hensel [42] advierten que el volumen de datos puede sobrecargar la computación en la nube y reducir la velocidad de respuesta, por lo que plantean el procesamiento en el borde y las arquitecturas distribuidas como alternativas para mejorar la interoperabilidad. Sin embargo, el procesamiento en el borde y las arquitecturas distribuidas aparecieron de forma puntual en los estudios analizados, por lo que todavía requieren evaluaciones a mayor escala.

Tagarakis *et al.* [40] clasifican los estudios en fases conceptuales, prototipos funcionales y sistemas probados en condiciones reales. Bajo este criterio, contar con un robot físico o con buenos resultados en una prueba aislada no significa que la tecnología esté lista para un uso continuo. La falta de estándares y las diferencias en la duración de las pruebas, las métricas y los criterios de seguridad, confiabilidad y escalabilidad dificultan comparar los sistemas. Además, la información disponible sobre costos, mantenimiento, aceptación de los operadores y adopción comercial fue insuficiente para valorar estos aspectos con profundidad, por lo que la evaluación continúa centrada en el desempeño técnico y deja en segundo plano la viabilidad práctica y económica. En este contexto, avanzar hacia sistemas más robustos requiere diseños modulares, pruebas prolongadas, mecanismos de seguridad, capacidad para responder ante fallos y protocolos comparables.

El enfoque descriptivo-analítico y el uso de criterios definidos para la búsqueda, selección y clasificación permitieron organizar de manera sistemática las publicaciones y comparar sus aplicaciones, tecnologías y enfoques metodológicos. A partir de este alcance, futuras revisiones podrían ampliar la búsqueda a otras bases de datos y considerar mecanismos de acceso a estudios no disponibles libremente, dado que las restricciones de acceso todavía constituyen una barrera para la consulta y circulación del conocimiento científico. Asimismo, sería pertinente profundizar en comparaciones específicas por cultivo, tipo de robot, escenario de aplicación y duración de las pruebas, así

como emplear clasificaciones que representen con mayor detalle los estudios que integran varias tareas. Estas posibilidades darían continuidad al análisis y contribuirían a construir una visión más amplia del desarrollo de los gemelos digitales en la robótica agrícola.

V. CONCLUSIONES

A partir de los hallazgos de esta revisión, se puede concluir que los gemelos digitales aplicados a la robótica agrícola constituyen un campo reciente y en crecimiento. Se identificaron 24 publicaciones, concentradas principalmente entre 2023 - 2026 y con mayor presencia de estudios procedentes de China y Europa, lo que refleja un aumento del interés científico, aunque el desarrollo todavía se concentra en determinados países y grupos de investigación.

Dentro de este panorama, las publicaciones muestran aplicaciones en siembra, cosecha, monitoreo, navegación, operación de maquinaria, coordinación y teleoperación, apoyadas en tecnologías como simulación, sensores, visión por computador, IoT, inteligencia artificial, aprendizaje por refuerzo y transferencia Sim2Real. El desarrollo de estas soluciones combinó arquitecturas, prototipos, modelos predictivos, procesos de optimización y validaciones físico-virtuales; sin embargo, la mayoría permaneció vinculada a una tarea, cultivo o entorno específico, lo que confirma el predominio de sistemas especializados.

Las principales tendencias apuntan hacia una mayor capacidad de predicción, optimización, autonomía y apoyo a la toma de decisiones. No obstante, persisten desafíos relacionados con la brecha entre simulación y realidad, la generalización de los modelos, la sincronización, el procesamiento en tiempo real, la seguridad y la adopción comercial. Por ello, las oportunidades de investigación se orientan a ampliar las pruebas en campo, actualizar los modelos con datos reales, mejorar la percepción, fortalecer los sistemas de lazo cerrado y establecer protocolos comparables para evaluar su confiabilidad, escalabilidad y viabilidad práctica.

REFERENCIAS

- [1] FAO, "The future of food and agriculture – Drivers and triggers for transformation. no. 3. Rome.," The Future of Food and Agriculture, No. 3. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), doi: 10.4060/cc0959en, 2022.
- [2] OECD, "Attracting new farmers for the future of agriculture," OECD Policy Briefs No. 34, Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), doi:10.1787/1ca2efb6-en., 2025.
- [3] C. J. Zhao, B. B. Fan, J. Li, and Q. C. Feng, "Agricultural robots: technology progress, challenges and trends," Editorial Office of Smart Agriculture, vol. 5, no. 4, pp. 1-15, doi: 10.12133/j.smartag.SA202312030, 2023.
- [4] M. R. Barbosa Junior, R. G. D. Santos, and L. D. A. Oliveira, L. P. D. Sales, "Advancements in agricultural ground robots for specialty crops: an overview of innovations, challenges, and prospects.," Plants, vol. 13, no. 23, doi: 10.3390/plants13233372, 2024.

- [5] C Verdouw, B Tekinerdogan, A Beulens, and S. Wolfert, "Digital twins in smart farming," *Agricultural Systems*, vol. 189, doi: 10.1016/j.agry.2020.103046, 2021.
- [6] C Pylianidis, S Osinga, and I. N. Athanasiadis, "Introducing digital twins to agriculture," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 184, doi: 10.1016/j.compag.2020.105942, 2021.
- [7] M Escribà-Gelonch et al., "Digital twins in agriculture: orchestration and applications,," *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 72, no. 19 , pp. 10737-10752, doi: 10.1021/acs.jafc.4c01934, 2024.
- [8] K. Chen, B. Zhao, H. Zhou, L. Zhou, K. Niu, X. Jin, R. Li, Y. Yuan, and Y. Zheng, "Digital Twins in Plant Factory: A Five-Dimensional Modeling Method for Plant Factory Transplanter Digital Twins," *Agriculture*, vol. 13, no. 7, Art. no. 1336, doi: 10.3390/agriculture13071336, Jul. 2023.
- [9] Y. Lang, Y. Zhang, T. Sun, X. Chai, and N. Zhang, "Digital Twin-Driven System for Efficient Tomato Harvesting in Greenhouses," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 236, Art. no. 110451, doi: 10.1016/j.compag.2025.110451, 2025.
- [10] D. Liu, Z. Li, Z. Wu, and C. Li, "Digital Twin/MARS-CycleGAN: Enhancing Sim-to-Real Crop/Row Detection for MARS Phenotyping Robot Using Synthetic Images," *Journal of Field Robotics*, vol. 42, pp. 625–640, doi: 10.1002/rob.22473, 2024.
- [11] X. Zhao et al., "Digital Twins in Smart Farming: An Autoware-Based Simulator for Autonomous Agricultural Vehicles," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 184–189, doi: 10.25165/j.ijabe.20231604.8039, 2023.
- [12] Y. Yin et al., "Construction Method and Case Study of Digital Twin System for Combine Harvester," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 226, Art. no. 109395, doi: 10.1016/j.compag.2024.109395, 2024.
- [13] F. K. van Evert, T. Bresilla, A. Nieuwenhuizen, and B. Veldhuisen, "Implementing a Digital Twin for Flexible Operation of Agricultural Robotics," in *Advances in Agri-Food Robotics*, pp. 185–222, doi: 10.19103/AS.2023.0124.28, 2024.
- [14] C. Bua, L. Borgianni, D. Adami, and S. Giordano, "Reinforcement Learning-Driven Digital Twin for Zero-Delay Communication in Smart Greenhouse Robotics," *Agriculture*, vol. 15, no. 12, Art. no. 1290, doi: 10.3390/agriculture15121290, 2025.
- [15] D. Rodríguez-Nieto, E. Navas, and R. Fernández, "Digital Twin of a Dual-Arm Autonomous Seeding Robot for Hydroponic Greenhouses," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 251, Art. no. 111967, doi: 10.1016/j.compag.2026.111967, 2026.
- [16] R. Fernández, E. Navas, D. Rodríguez-Nieto, A. A. Rodríguez-González, and L. Emmi, "DigiHortiRobot: An AI-Driven Digital Twin Architecture for Hydroponic Greenhouse Horticulture with Dual-Arm Robotic Automation," *Future Internet*, vol. 17, no. 8, Art. no. 347, doi: 10.3390/fi17080347, 2025.
- [17] W. Purcell and T. Neubauer, "Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-Art Review," *Smart Agricultural Technology*, vol. 3, Art. no. 100094, doi: 10.1016/j.atech.2022.100094, 2022.
- [18] R. Zhang, H. Zhu, Q. Chang, and Q. Mao, "A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture," *Agriculture*, vol. 15, no. 9, Art. no. 903, doi: 10.3390/agriculture15090903, 2025.
- [19] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ (Clinical research ed.)*, vol. 372, p. n71, doi: 10.1136/bmj.n71, 2021.
- [20] M. Pincheira, F. Shamsfakhr, J. Hueller, and M. Vecchio, "Overcoming Limitations of IoT Installations: Active Sensing UGV for Agricultural Digital Twins," in *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, Pisa, Italy, pp. 319–324, doi: 10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424235, 2023.
- [21] T.-H. Wu, Y.-T. Hsu, Y.-L. Liang, and P.-C. Lin, "Development of an Automatic Agricultural Fruit Bagging Robot," *International Journal of iRobotics*, vol. 6, no. 3, Special Issue of ARIS, 2023.
- [22] J. B. de Almeida, W. da S. S. Júnior, W. V. S. Silva, B. C. Torrico, and F. G. Nogueira, "Avaliação de um Sistema Robótico para Identificação Automática de Ervas Daninhas Utilizando Visão Computacional," in *Congresso Brasileiro de Automação (CBA 2024)*, São Luís, Brazil, doi: 10.20906/CBA2024/4267, 2024.
- [23] D. Guo et al., "Online Optimization of Adjustable Settings for Agricultural Machinery Assisted by Digital Twin," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 227, Art. no. 109504, doi: 10.1016/j.compag.2024.109504, 2024.
- [24] A. Rana, A. Petitti, A. Ugenti, R. Galati, G. Reina, and A. Milella, "Toward Digital Twin of Off-Road Vehicles Using Robot Simulation Frameworks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 178047–178061, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3509226, 2024.
- [25] F. Chang, Z. Lu, and X. Deng, "Shifting Strategy for Power Shift Tractors Based on Digital Twin-Driven Reinforcement Learning," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 236, Art. no. 110513, doi: 10.1016/j.compag.2025.110513, 2025.
- [26] D. Guo, Y. Du, L. Wang, W. Zhang, T. Sun, and Z. Wu, "Digital Twin for Monitoring Threshing Performance of Combine Harvesters," *Measurement*, vol. 239, Art. no. 115411, doi: 10.1016/j.measurement.2024.115411, 2025.
- [27] O. Mirbod, D. Choi, and J. K. Schueller, "From Simulation to Field Validation: A Digital Twin-Driven Sim2Real Transfer Approach for Strawberry Fruit Detection and Sizing," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 3, Art. no. 81, doi: 10.3390/agriengineering7030081, 2025.
- [28] F. Sibona, N. Harrison, N. Wallace, and C. Stevens, "A Framework to Enable Eco-Cyber-Physical Systems for Robotics-Focused Digital Twins in Smart Farming," *Journal of Field Robotics*, vol. 42, no. 6, pp. 3016–3037, doi: 10.1002/rob.22562, 2025.
- [29] W. V. S. Silva et al., "Development and Experimental Analysis of a Robotic System for Automated Vegetable Planting Utilizing Precision Agriculture and Computer

- Vision," *Journal of Artificial Intelligence and Systems*, vol. 7, pp. 35–60, doi: 10.33969/AIS.2025070103, 2025.
- [30] K. Smith, A. Botta, G. Colucci, M. Piras, G. Quaglia, and E. Belcore, "Orchard Digital Twin: A Prototype for Smart Agricultural Monitoring," in *Agricultural Engineering Challenges in Existing and New Agroecosystems (AgEng 2024 Proceedings)*, pp. 274–281, 2025.
- [31] M. Wang, J. Xu, Z. Zhou, Y. Wang, and Y. Cui, "Online Prediction Method for Greenhouse Operation Chassis Driving Status by Digital Twins-Driven," *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol. 56, no. 2, pp. 92–104, doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.009, 2025.
- [32] G. Kusper, Z. Barócsi, P. Csóka, K. Vajda, and J. Sütő, "Digital-Twin-Oriented Virtual Training Environment for Agricultural Robot Navigation: A Vineyard Rover Case Study," *Sensors*, vol. 26, no. 12, Art. no. 3766, doi: 10.3390/s26123766, 2026.
- [33] P. Siripin, K. Chaiprabha, W. Chungsangsathitporn, and R. Saegusa, "You Only Grasp Once: Human-Inspired Benign Grasping for Agricultural Products," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 112, no. 2, doi: 10.1007/s10846-026-02371-3, 2026.
- [34] K. Taitou and T. Fujinaga, "Evaluation of an Optimal Approach Direction for a Tomato-Harvesting Robot Using a Digital Twin," in *Proc. 31st Int. Conf. on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2026)*, vol. 31, pp. 153–156, doi: 10.5954/ICAROB.2026.OS5-4, 2026.
- [35] L. Wang, "Digital Twins in Agriculture: A Review of Recent Progress and Open Issues," *Electronics*, vol. 13, no. 11, Art. no. 2209, doi: 10.3390/electronics13112209, 2024.
- [36] Food and Agriculture Organization of the United Nations. China [Online]. Available: <https://www.fao.org/in-action/food-systems-integrated-program/country-projects/china>, 2025.
- [37] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. National Smart Agriculture Action Plan (2024–2028) [Online]. Available: <https://app.www.gov.cn/govdata/gov/202410/27/521072/article.html>, 2024.
- [38] European Commission. Digitalising the EU agricultural sector under Horizon 2020 [Online]. Available: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digitisation-agriculture-horizon-2020>, 2025.
- [39] R. Gund, C. M. Badgujar, S. Samiappan, and S. Jagadamma, "Application of Digital Twin Technology in Smart Agriculture: A Bibliometric Review," *Agriculture*, vol. 15, no. 17, Art. no. 1799, doi: 10.3390/agriculture15171799, 2025.
- [40] A. C. Tagarakis, L. Benos, G. Kyriakarakos, S. Pearson, C. G. Sørensen, and D. Bochtis, "Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review," *Sensors*, vol. 24, no. 10, Art. no. 3117, doi: 10.3390/s24103117, 2024.
- [41] M. Fontani, S. M. Luglio, L. Gagliardi, A. Peruzzi, C. Frascioni, M. Raffaelli, and M. Fontanelli, "A systematic review of 59 field robots for agricultural tasks: Applications, trends, and future directions," *Agronomy*, vol. 15, no. 9, Art. no. 2185, doi: 10.3390/agronomy15092185, 2025.
- [42] A. Nasirahmadi and O. Hensel, "Toward the Next Generation of Digitalization in Agriculture Based on Digital Twin Paradigm," *Sensors*, vol. 22, no. 2, Art. no. 498, doi: 10.3390/s22020498, 2022.
- [43] N. Tsolakis, D. Bechtsis, and D. Bochtis, "AgROS: A Robot Operating System Based Emulation Tool for Agricultural Robotics," *Agronomy*, vol. 9, no. 7, Art. no. 403, doi: 10.3390/agronomy9070403, 2019.
- [44] W. Zhao, J. P. Queralta, and T. Westerlund, "Sim-to-Real Transfer in Deep Reinforcement Learning for Robotics: A Survey," *arXiv preprint arXiv:2009.13303*, 2021.