

Sensores y aplicaciones de IoT en entornos agrícolas: mapeo sistemático

IoT Sensors and Applications in Agricultural Environments: Systematic Mapping

Recibido: 24/03/2025 - Aceptado: 26/06/2025

Gardyn Olivera Ruiz

<https://orcid.org/0000-0002-7200-6124>

gardyn.olivera@unas.edu.pe

Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú

Giovanni Kuennen Perez Espinoza

<https://orcid.org/0000-0002-4702-2413>

giovanni.perez@unas.edu.pe

Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú

Resumen

La presente investigación realizó un mapeo sistemático de la literatura científica sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura, con el objetivo de identificar las principales líneas de desarrollo, sus beneficios y las barreras para su adopción. Se aplicó la metodología de Petersen y Kitchenham, utilizando el marco PICOC para diseñar la búsqueda en bases de datos como Scopus, IEEE Xplore, Taylor & Francis y Sage Journals, considerando estudios originales publicados entre 2019 y 2024. De 1,862 registros iniciales, se seleccionaron 59 artículos tras aplicar criterios de inclusión relacionados con descripción técnica, análisis de ventajas y limitaciones, e impacto en sostenibilidad. El análisis bibliométrico mostró un crecimiento constante en las publicaciones, con Asia y Europa como principales focos. La síntesis temática reveló que los sistemas de riego inteligente concentran el 28 % de las contribuciones, seguidos por el monitoreo de cultivos (17 %) y los sistemas de alerta temprana (10 %). En contraste, áreas como fertilización inteligente y conservación de la biodiversidad están poco exploradas. Los estudios reportan mejoras significativas en eficiencia hídrica y energética, y reducción de la huella ambiental. Sin embargo, persisten limitaciones técnicas como la vida útil limitada de baterías, calibraciones frecuentes y heterogeneidad de protocolos, además de escasa evaluación socioeconómica. En conclusión, aunque el IoT tiene un gran potencial para una agricultura más sostenible y resiliente, su impacto a gran escala requiere avances en autonomía energética, estandarización de comunicaciones y estudios costo-beneficio que faciliten su adopción en pequeñas explotaciones rurales.

Palabras clave: agricultura de precisión, desarrollo sostenible, sensores.

Abstract

This research systematically mapped the scientific literature on IoT sensors and applications in agriculture, aiming to identify the main lines of development, their benefits, and barriers to adoption. The Petersen and Kitchenham methodology was applied, using the PICOC framework to design the search in databases such as Scopus, IEEE Xplore, Taylor & Francis, and Sage Journals, considering original studies published between 2019 and 2024. From 1,862 initial records, 59 articles were selected after applying inclusion criteria related to technical description, analysis of advantages and limitations, and impact on sustainability. The bibliometric analysis showed a steady growth in publications, with Asia and Europe as the main focuses. The thematic synthesis revealed that smart irrigation systems account for 28% of contributions, followed by crop monitoring (17%) and early warning systems (10%). In contrast, areas such as smart fertilization and biodiversity conservation are little explored. Studies report significant improvements in water and energy efficiency, and a reduction in the environmental footprint. However, technical limitations persist, such as limited battery life, frequent calibrations, and protocol heterogeneity, in addition to limited socioeconomic evaluation. In conclusion, although IoT has great potential for more sustainable and resilient agriculture, its large-scale impact requires advances in energy autonomy, communications standardization, and cost-benefit studies to facilitate its adoption in small rural farms.

Keywords: precision agriculture, sustainable development, sensors.

Introducción

La agricultura contemporánea enfrenta desafíos significativos, como el cambio climático, la escasez de recursos y el aumento constante de la demanda alimentaria (FAO, 2020). En este escenario, el Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una herramienta fundamental para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector. A través de sensores, algoritmos inteligentes y arquitecturas digitales, es posible optimizar el uso de agua, energía y fertilizantes, incrementando la productividad y reduciendo el impacto ambiental (Baljon, 2024; Kumar et al., 2024). Tecnologías como el riego inteligente ya han demostrado resultados positivos, especialmente en regiones áridas (Florea et al., 2024).

No obstante, la implementación del IoT en la agricultura enfrenta diversas barreras, entre ellas la conectividad limitada, los altos costos iniciales y la falta de capacitación técnica adecuada (Lavanya & Muthu Mayil, 2019). Aunque innovaciones como los gemelos digitales (Mummaneni et al., 2024) y los drones agrícolas (Holtorf et al., 2023) muestran un gran potencial, su adopción aún es restringida. Por ello, resulta necesario realizar un análisis sistemático que permita identificar las tecnologías más relevantes, así como sus limitaciones y oportunidades futuras.

En este contexto, el presente estudio lleva a cabo un mapeo sistemático de la literatura científica sobre IoT en la agricultura, con el objetivo de identificar los tipos de sensores y aplicaciones más utilizados, evaluar sus beneficios y limitaciones, y analizar su impacto en la sostenibilidad. Para ello, se emplearon las metodologías de Petersen et al. (2015), Kitchenham & Charters (2007), y el marco PICOC (Frandsen et al., 2020), analizando 59 estudios seleccionados de un total inicial de 1,862 publicaciones.

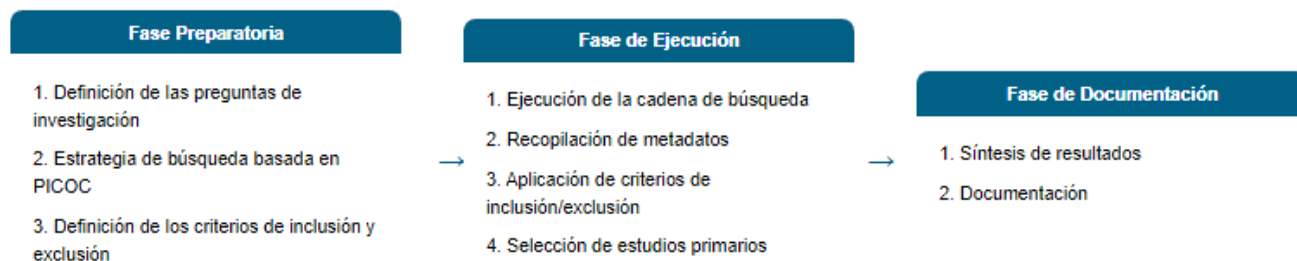
Los resultados resaltan el potencial del riego inteligente, el uso emergente de gemelos digitales y la creciente adopción de drones y vehículos autónomos. Este trabajo ofrece una visión integral del estado actual del IoT en la agricultura y busca contribuir a su adopción efectiva y sostenible, especialmente en contextos diversos y desafiantes.

Metodología

El mapeo sistemático realizado en esta investigación siguió un enfoque estructurado basado en las metodologías propuestas por Petersen et al. (2015), Kitchenham & Charters (2007).

Figura 1

Metodología de investigación



A. Fase preparatoria

El presente estudio tuvo como propósito realizar un mapeo sistemático que identificara y evaluara los estudios más relevantes sobre el uso de sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura. Para ello, se analizaron las principales tecnologías, los tipos de sensores empleados, sus ventajas y limitaciones, así como su contribución a la sostenibilidad del sector agrícola.

Preguntas de investigación

Se formularon cuatro preguntas bibliométricas para guiar el análisis de la producción científica (véase Tabla 1).

Tabla 1
Preguntas Bibliométricas

ID	Preguntas bibliométricas
PB1	¿Cuál es la tendencia y evolución de la investigación sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura?
PB3	¿Quiénes son los principales autores que realizan investigaciones sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura?
PB4	¿Cuáles son los trabajos más influyentes en la investigación sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura?

También se plantearon 5 preguntas de investigación que guiaron este mapeo sistemático (Tabla 2).

Tabla 2
Preguntas de investigación

Nro.	Preguntas de Investigación
PI1	¿Cuáles son los tipos principales de sensores y aplicaciones de IoT utilizados en la agricultura?
PI2	¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de cada tipo de sensor y aplicación de IoT identificados?
PI3	¿Cuál es la frecuencia de uso y relevancia de estos sensores y aplicaciones de IoT en estudios y casos de cultivos agrícolas?
PI4	¿Cuál es el impacto de los sensores y aplicaciones de IoT en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas?
PI5	¿Qué métodos de investigación se utilizan en los estudios sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura?

B. Estrategia de búsqueda

Para llevar a cabo el mapeo sistemático sobre el uso de tecnologías IoT y sensores en la agricultura, se seleccionaron repositorios clave como Scopus, IEEE Xplore, Taylor & Francis y Sage Journals, debido a su amplia relevancia y cobertura en literatura científica especializada. La investigación se guió mediante el marco PICOC (Población, Intervención, Comparación, Resultados y Contexto), lo que permitió definir claramente los elementos esenciales y construir cadenas de búsqueda robustas y precisas (Frandsen et al., 2020). Esta estrategia facilitó la identificación de estudios pertinentes, asegurando una revisión exhaustiva y estructurada del estado actual del conocimiento en el área.

Tabla 3
Términos de búsqueda basado en el marco PICOC

Elemento	Términos de búsqueda
Población	<i>agriculture OR farming</i>
Intervención	<i>sensor AND ("Internet of Things" OR IoT OR "IoT technology" OR "IoT applications")</i>
Comparación	<i>N/A</i>
Resultados	<i>impact OR efficiency OR productivity OR sustainability</i>
Contexto	<i>"case studies" OR research OR analysis NOT review NOT urban</i>

C. Criterios de inclusión y exclusión

La Tabla 4 presenta los criterios de inclusión (CI) y exclusión (CE) utilizados en el mapeo sistemático.

Tabla 4
Criterios de Inclusión y Exclusión

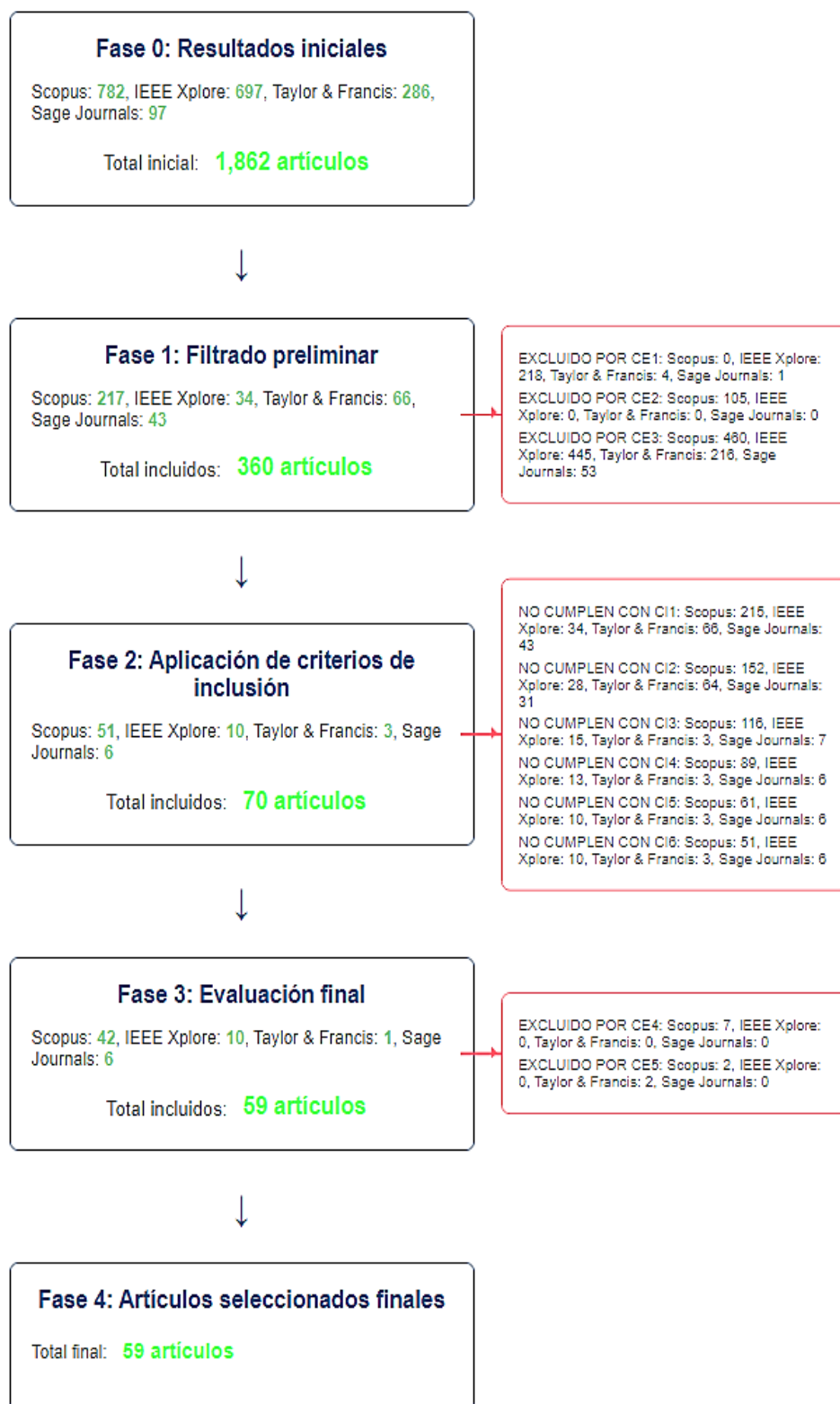
Tipo	ID	Criterio
CI	CI1	Estudios publicados en inglés entre 2019 y 2024.
	CI2	Investigaciones provenientes de fuentes de información primaria (originales y empíricas).
	CI3	Estudios enfocados en el uso de sensores y aplicaciones IoT en cultivos agrícolas.
	CI4	Investigaciones que aborden ventajas y limitaciones de las tecnologías IoT.
	CI5	Estudios que incluyan detalles técnicos específicos sobre sensores y sus aplicaciones IoT.
	CI6	Estudios que consideren el impacto de las tecnologías IoT en la sostenibilidad agrícola.
CE	CE1	Eliminación de artículos duplicados.
	CE2	Exclusión de capítulos de libros, editoriales, erratas, artículos retractados y revisiones sistemáticas.
	CE3	Exclusión de estudios que no fueran de acceso abierto.
	CE4	Eliminación de artículos con enlaces rotos, textos incompletos o retractados.
	CE5	Exclusión de estudios que no respondieran claramente a las preguntas de investigación.

D. Fase de ejecución

El proceso de selección realizado en este mapeo sistemático se presenta en la Figura 2. En una primera etapa, se identificaron 1,862 artículos en las bases de datos seleccionadas (Scopus, IEEE Xplore, Taylor & Francis y Sage Journals). Posteriormente, estos documentos fueron sometidos a un exhaustivo filtrado en diversas fases, aplicando criterios de inclusión y exclusión, hasta obtener un total de 59 estudios relevantes. La trazabilidad completa de este proceso está documentada en una hoja de cálculo, la cual puede consultarse en el siguiente enlace:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ejnNMM0yBQXCcuNk9icvUcxypRJ6DdXJ/edit?usp=sharing&oid=100997038000658880122&rtpof=true&sd=true>

Figura 2
Flujograma de ejecución del Mapeo Sistemático



Resultados

Este apartado corresponde a la fase de documentación, donde se registran y analizan los principales hallazgos obtenidos, dando respuesta a las preguntas de investigación propuestas en la etapa de planificación.

PB1 ¿Cuál es la tendencia y evolución de la investigación sobre sistemas de gestión energética basados en IoT?

Evolución temporal

La evolución de las investigaciones durante el periodo seleccionado para el mapeo se presenta en la Figura 3.

Figura 3

Evolución temporal



Tendencia geográfica

La distribución geográfica de las investigaciones sobre IoT en la agricultura se presenta en la figura siguiente.

Figura 4

Tendencia geográfica



PB2 ¿Quiénes son los principales autores que realizan investigaciones sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura?

La Tabla 5 presenta a los autores más destacados en investigaciones sobre sensores e IoT aplicados a la agricultura. Estos investigadores han realizado contribuciones significativas en áreas como la agricultura de precisión, el monitoreo avanzado de cultivos y el desarrollo de redes IoT especializadas. Sus aportes se respaldan en indicadores académicos relevantes, incluyendo índices h, número de citas y cantidad de publicaciones, que reflejan su influencia y liderazgo en el campo.

Tabla 5

Principales autores con enfoque en sistemas de gestión energética basados en IoT

Autor	ORCID	Publicaciones	Citas	Índice h
Ahmad Almogren	0000-0002-8253-9709	282	8701	51
Ikram Ud Din	0000-0001-8896-547X	127	4664	39
Khalid Haseeb	0000-0001-6657-9308	83	2256	26
Pedro Sebastião	0000-0001-7729-4033	110	1016	18

PB4 ¿Cuáles son los trabajos más influyentes en la investigación sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura?

La Tabla 6 presenta los cinco trabajos más influyentes en la investigación sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura, destacando su impacto a través del número de citas y sus contribuciones en áreas clave como la sostenibilidad, el monitoreo inteligente y la eficiencia energética.

Tabla 6

Trabajos más influyentes en la investigación sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura

Título	Veces Citadas	Referencia
<i>An energy efficient and secure IoT-based WSN framework: An application to smart agriculture</i>	192	(Haseeb et al., 2020)
<i>Advanced UAV-WSN system for intelligent monitoring in precision agriculture</i>	162	(Popescu et al., 2020)
<i>Machine learning-based fog computing for early lameness detection in dairy cattle</i>	93	(Taneja et al., 2020)
<i>Energy-Efficient Edge-Fog-Cloud Architecture for IoT-Based Smart Agriculture Environment</i>	65	(Alharbi & Aldossary, 2021)
<i>Lora communications as an enabler for internet of drones towards large-scale livestock monitoring</i>	62	(Behjati et al., 2021)

PI1 ¿Cuáles son los tipos principales de aplicaciones de IoT utilizados en la agricultura?

Los principales tipos de aplicaciones de IoT utilizadas en la agricultura, clasificadas según su enfoque, se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Clasificación de estudios según el tipo de enfoque

Categoría	Referencias
Sistemas de Riego Inteligente	(Kumar et al., 2024), (Baljon, 2024), (Ibn Dahou Idrissi et al., 2024), (Florea et al., 2024), (Levin, 2024), (Arafa et al., 2024), (Kaur et al., 2024), (Dong et al., 2024), (Abdelmoneim et al., 2024), (Pham et al., 2021), (Glória et al., 2021), (Ullah et al., 2021), (Mohammed et al., 2021), (Alharbi & Aldossary, 2021), (Munaganuri & Rao, 2024), (Jia et al., 2019)

Monitoreo del Crecimiento de Cultivos	(Lavanya & Muthu Mayil, 2019), (Corbari et al., 2022), (Effah et al., 2024), (Priya et al., 2023), (Yin et al., 2023), (Arunachalam & Andreasson, 2022), (Jadhav et al., 2024), (Pineda-Castro et al., 2024), (Ting & Chan, 2024), (Alghazzawi et al., 2021)
Control de Plagas y Enfermedades	(Mummaneni et al., 2024), (Mishra et al., 2023)
Drones para Agricultura de Precisión	(Holtorf et al., 2023), (Ammad Uddin et al., 2019), (Behjati et al., 2021), (Popescu et al., 2020), (Chittoor et al., 2023), (Chittoor et al., 2023), (Tiurlikova et al., 2019), (Liang & Juang, 2022)
Gestión Inteligente del Almacenamiento de Cosechas	(Pérez-Pons et al., 2021)
Monitoreo de la Salud del Suelo	(Taparci et al., 2024), (Irwanto et al., 2024), (Ayu Nuning Farida Afiatna & Muflihah, 2024), (Prasad et al., 2023), (Postolache et al., 2023), (Nieman et al., 2024)
Monitoreo de Nutrientes y la Fertilización Inteligente	(Dash & Kumar, 2024), (Setyawan et al., 2024), (Islam et al., 2023b)
Sistemas de Monitoreo y Alerta Temprana	(Yau et al., 2025), (Zito et al., 2024), (Sajak et al., 2024), (Satra et al., 2024), (Wibisono & Jayadi, 2024), (Putri et al., 2024), (Abid et al., 2024), (Kuang et al., 2020), (Taneja et al., 2020), (Armiento et al., 2023), (Haseeb et al., 2020), (Zhang & Liu, 2019)
Vehículos Autónomos para la Agricultura	(Ram et al., 2020)

PI2 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de cada tipo de sensor y aplicación de IoT identificados?

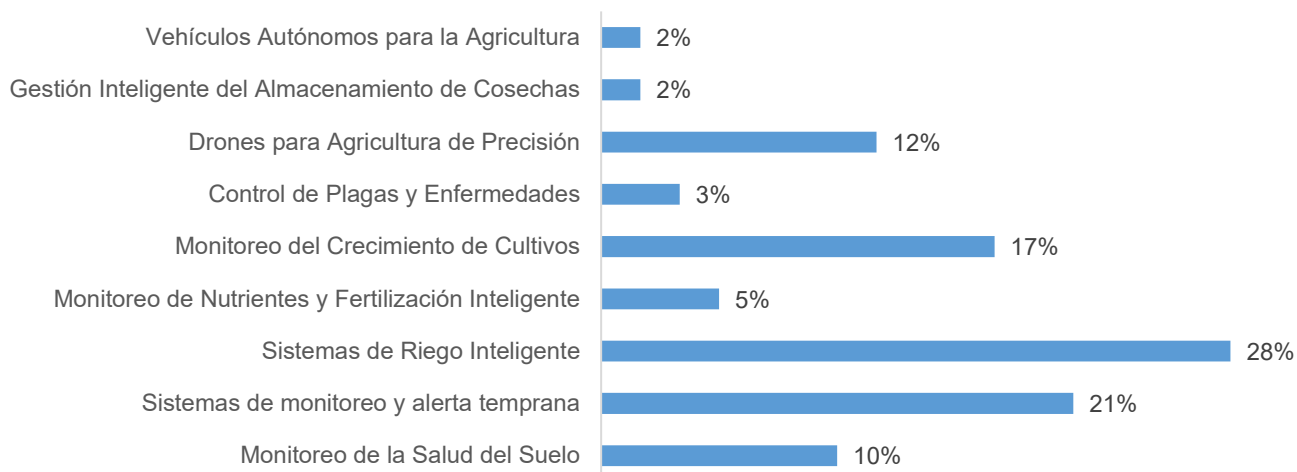
Se llevó a cabo un análisis detallado de las ventajas y limitaciones de los sensores y aplicaciones IoT en la agricultura mediante la herramienta Cruz de Malta. Este estudio permitió identificar sensores clave, como los de humedad del suelo y temperatura ambiental, que resultan esenciales para una gestión eficiente del agua, la optimización del riego y el monitoreo climático. Entre las principales ventajas se destacan el uso eficiente de los recursos y la capacidad de monitoreo en tiempo real. Sin embargo, también se evidenciaron limitaciones importantes, tales como la dependencia de baterías, la necesidad de calibraciones frecuentes y la sensibilidad a diversas condiciones ambientales. En consecuencia, se subraya la urgencia de innovar en aspectos relacionados con el diseño, la conectividad y la gestión energética para superar estos retos. Los detalles completos del análisis están disponibles en: [Análisis de la Cruz de Malta para IoT en Agricultura](#).

PI3 ¿Cuál es la frecuencia de uso y relevancia de estos sensores y aplicaciones de IoT en estudios Agrícolas?

La Figura 5 muestra la frecuencia de uso de las aplicaciones IoT en estudios agrícolas agrupadas por enfoque.

Figura 5

Frecuencia porcentual agrupado por enfoque de aplicación IoT

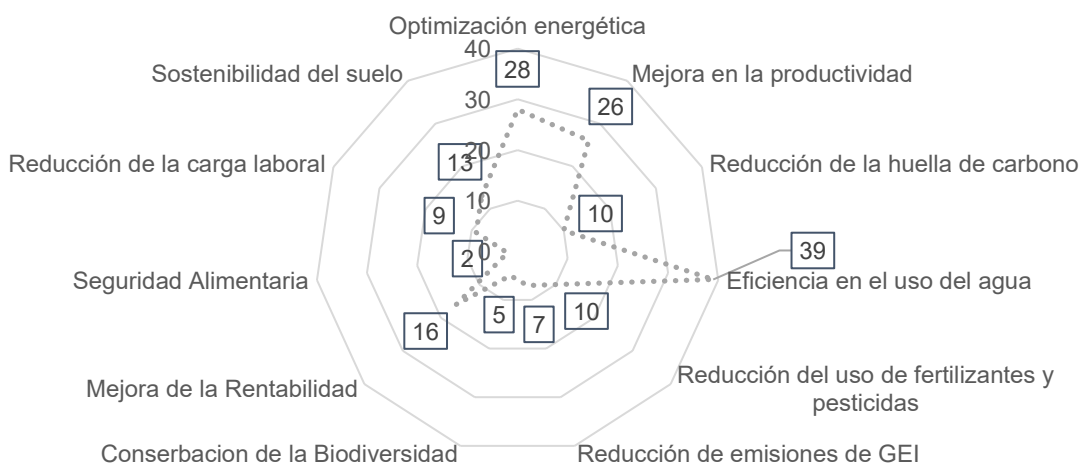


PI4 ¿Cuál es el impacto de los sensores y aplicaciones de IoT en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas?

El impacto de los sensores y aplicaciones de IoT en la sostenibilidad agrícola se presenta en la Figura 6.

Figura 6

Referencias por impacto en la sostenibilidad

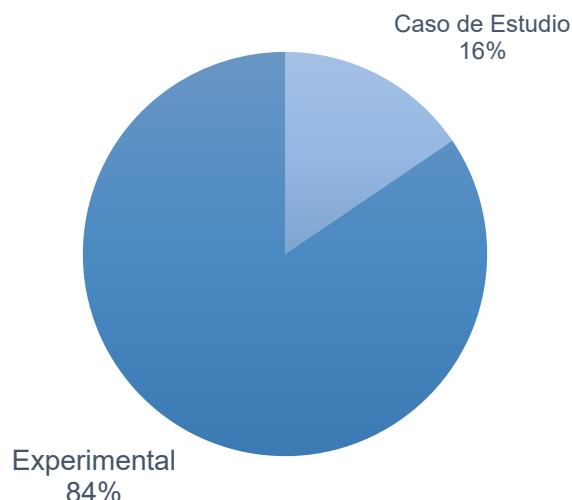


PI5 ¿Cuáles son los principales métodos de investigación se utilizan en los estudios sobre sensores y aplicaciones de IoT en la agricultura?

El porcentaje de métodos de investigación utilizados en estudios sobre sensores y aplicaciones IoT en la agricultura se presenta en la Figura 7.

Figura 7

Distribución de estudios sobre sensores y aplicaciones IoT en agricultura según su enfoque



Discusión

El análisis evidencia un panorama de investigación claramente dominado por el riego inteligente, que concentra el 28 % de los estudios y reporta reducciones en el consumo hídrico superiores al 25 % en viveros controlados, tal como lo demuestra Florea et al. (2024). En contraste, la fertilización inteligente apenas representa el 5 %, lo que revela una agenda temática desequilibrada, según lo documentado por Islam et al. (2023). Este sesgo se ve reforzado por la concentración geográfica de los trabajos en países como India y China, donde los programas estatales de digitalización agrícola facilitan la adopción de arquitecturas *edge-fog-cloud* y sensores de bajo costo, como detalla Kumar et al. (2024). Por otro lado, la difusión de estas tecnologías en América Latina es limitada debido a deficiencias en conectividad y financiamiento, situación descrita por Pérez-Pons et al. (2021).

Desde el punto de vista técnico, la autonomía energética continúa siendo el principal desafío. Por ejemplo, tensiómetros económicos presentan desviaciones de calibración superiores al 5 % tras 90 días de operación continua, según Arafa et al. (2024). Además, la coexistencia de protocolos inalámbricos heterogéneos genera congestión y pérdida de datos en redes LoRa-Wi-Fi, tal como reporta Behjati et al. (2021). Sin embargo, las plataformas NB-IoT aplicadas al riego han logrado disminuir el consumo eléctrico hasta en un 21 %, de acuerdo con Ullah et al. (2021).

No obstante, solo el 16 % de los estudios valida sus prototipos en condiciones reales de campo, lo que dificulta la estimación del retorno de inversión para pequeños productores. Effah et al. (2024) subrayan esta carencia y la necesidad de realizar evaluaciones costo-beneficio rigurosas. En conjunto, estos hallazgos confirman el potencial del IoT para mejorar la eficiencia agrícola, pero también resaltan la urgencia de desarrollar nodos autoalimentados, estandarizar protocolos abiertos y ampliar la investigación hacia dimensiones socioeconómicas y temáticas poco exploradas, con el fin de lograr una adopción equitativa y sostenible.

Conclusiones

El análisis de 59 estudios sobre IoT en la agricultura confirma avances significativos en la optimización de recursos, el monitoreo de cultivos y la eficiencia energética, con Asia —especialmente India, Arabia Saudita y China— liderando el desarrollo. Investigadores como Ahmad Almogren, Ikram Ud Din y Khalid Haseeb se destacan como referentes en redes IoT y agricultura de precisión. Sin embargo, persisten brechas importantes en infraestructura y financiamiento en regiones como América Latina y Europa, lo que limita una adopción equitativa y resalta la necesidad de clasificar las aplicaciones de IoT para identificar vacíos de investigación.

El mapeo revela tres ejes temáticos predominantes: riego inteligente (28 %), monitoreo de cultivos (17 %) y salud del suelo o control de plagas. En contraste, áreas emergentes como la fertilización inteligente (5 %) y otras tecnologías disruptivas basadas en aprendizaje automático y gemelos digitales permanecen poco exploradas. Además, el uso de drones, vehículos autónomos y sistemas de alerta temprana amplía el alcance del IoT hacia la poscosecha y la gestión de riesgos, aunque su implementación aún enfrenta desafíos prácticos.

Entre las principales barreras técnicas se encuentran la ubicación fija de sensores, la limitada duración de las baterías, la sensibilidad a condiciones ambientales y la necesidad de recalibraciones frecuentes. Superar estos obstáculos requiere el desarrollo de nodos energéticamente autónomos, diseños más robustos y soluciones adaptativas. Asimismo, el enfoque actual en eficiencia hídrica y energética contrasta con la menor atención hacia la sostenibilidad del suelo y la seguridad alimentaria, lo que demanda un abordaje más equilibrado.

Finalmente, el predominio de estudios experimentales (84 %) frente a casos de campo (16 %) dificulta la estimación de beneficios reales y el retorno de inversión para pequeños productores. Por ello, equilibrar validaciones controladas con pilotos en terreno resulta fundamental para replicar y escalar soluciones IoT que impulsen una agricultura verdaderamente sostenible y resiliente.

Referencias

- Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Elkamouh, A., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2024). Towards affordable precision irrigation: An experimental comparison of weather-based and soil water potential-based irrigation using low-cost IoT-tensiometers on drip irrigated lettuce. *Sustainability*, 16(1), 306. <https://doi.org/10.3390/su16010306>
- Abid, M. A., Amjad, M., Munir, K., Siddique, H. U. R., & Jurcut, A. D. (2024). IoT-based smart biofloc monitoring system for fish farming using machine learning. *IEEE Access*, 12, 86333–86345. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3384263>
- Alhazzawi, D., Bamasaq, O., Bhatia, S., Kumar, A., Dadheech, P., & Albeshri, A. (2021). Congestion control in cognitive IoT-based WSN network for smart agriculture. *IEEE Access*, 9, 151401–151420. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124791>
- Alharbi, H. A., & Aldossary, M. (2021). Energy-efficient edge-fog-cloud architecture for IoT-based smart agriculture environment. *IEEE Access*, 9, 110480–110492. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101397>
- Alves, R., & Matos, P. (2023). A solution to prevent and minimize the consequences of accidents with farm tractors in the context of mountainous regions with low population density. *Sensors*, 23(18), 7811. <https://doi.org/10.3390/s23187811>
- Ammad Uddin, M., Ayaz, M., Aggoune, E. H. M., Mansour, A., & Le Jeune, D. (2019). Affordable broad agile farming system for rural and remote area. *IEEE Access*, 7, 127098–127116. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937881>
- Arafa, Y., El-Gindy, A. G. M., El-Shirbeny, M., Bourouah, M., Abd-ElGawad, A. M., Rashad, Y. M., Hafez, M., & Youssef, M. A. (2024). Improving the spatial deployment of the soil moisture sensors in smart irrigation systems using GIS. *Cogent Food and Agriculture*, 10(1), 2361124. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2361124>
- Armiento, S., Meder, F., & Mazzolai, B. (2023). Device for simultaneous wind and raindrop energy harvesting operating on the surface of plant leaves. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(4), 2269–2276. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3250006>
- Arunachalam, A., & Andreasson, H. (2022). RaspberryPi-Arduino (RPA) powered smart mirrored and reconfigurable IoT facility for plant science research. *Internet Technology Letters*, 5(1), e272. <https://doi.org/10.1002/itl2.272>
- Ayu Nuning Farida Afiatna, F., & Muflihah, N. (2024). The monitoring system of soil pH factor using IoT-webserver-android and machine learning: A case study. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 14(1), 118–130. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.1.18745>
- Baljon, M. (2024). Revolutionizing Saudi Arabia's agriculture: The IoT transformation of water management. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 36(1), 217–240. <https://doi.org/10.37934/araset.36.1.217240>
- Behjati, M., Mohd Noh, A. B., Alobaidy, H. A. H., Zulkifley, M. A., Nordin, R., & Abdullah, N. F. (2021). LoRa communications as an enabler for internet of drones towards large-scale livestock monitoring in rural farms. *Sensors*, 21(15), 5044. <https://doi.org/10.3390/s21155044>
- Chittoor, P. K., Chokkalingam, B., Verma, R., & Mihet-Popa, L. (2023). An assessment of shortest prioritized path-based bidirectional wireless charging approach toward smart agriculture. *IEEE Access*, 11, 123742–123755. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3329976>
- Corbari, C., Paciolla, N., Ben Charfi, I., Skokovic, D., Sobrino, J. A., & Woods, M. (2022). Citizen science supporting agricultural monitoring with hundreds of low-cost sensors in comparison to remote sensing data. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1), 388–408. <https://doi.org/10.1080/22797254.2022.2084643>

- Dash, S. S., & Kumar, P. (2024). Farmers' toolkit: Deep learning in weed detection and precision crop & fertilizer recommendations. *BIO Web of Conferences*, 82, 05012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248205012>
- Debangshi, U. (2021). Drone-applications in agriculture. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5554734>
- Dong, Y., Werling, B., Cao, Z., & Li, G. (2024). Implementation of an in-field IoT system for precision irrigation management. *Frontiers in Water*, 6, 1353597. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1353597>
- Effah, E., Thiare, O., & Wyglinski, A. M. (2024). Hardware evaluation of cluster-based agricultural IoT network. *IEEE Access*, 12, 33628–33651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3370230>
- FAO. (s.f.). El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos. *Panorama General*. www.fao.org/faostat/es/#home
- Florea, A., Popa, D. I., Morariu, D., Maniu, I., Berntzen, L., & Fiore, U. (2024). Digital farming based on a smart and user-friendly IoT irrigation system: A conifer nursery case study. *IET Cyber-Physical Systems: Theory and Applications*, 9(2), 150–168. <https://doi.org/10.1049/cps2.12054>
- Frandsen, T. F., Bruun Nielsen, M. F., Lindhardt, C. L., & Eriksen, M. B. (2020). Using the full PICO model as a search tool for systematic reviews resulted in lower recall for some PICO elements. *Journal of Clinical Epidemiology*, 127, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2020.07.005>
- Glória, A., Cardoso, J., & Sebastião, P. (2021). Sustainable irrigation system for farming supported by machine learning and real-time sensor data. *Sensors*, 21(9), 3079. <https://doi.org/10.3390/s21093079>
- Haseeb, K., Din, I. U., Almogren, A., & Islam, N. (2020). An energy efficient and secure IoT-based WSN framework: An application to smart agriculture. *Sensors*, 20(7), 2081. <https://doi.org/10.3390/s20072081>
- Holtorf, L., Titov, I., Daschner, F., & Gerken, M. (2023). UAV-based wireless data collection from underground sensor nodes for precision agriculture. *AgriEngineering*, 5(1), 338–354. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010022>
- Ibn Dahou Idrissi, A., Abouabdillah, A., Chikhaoui, M., & Bouabid, R. (2024). Low-cost IoT-based monitoring system for precision agriculture. *E3S Web of Conferences*, 492, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449201003>
- Irwanto, F., Hasan, U., Lays, E. S., De La Croix, N. J., Mukanyiligira, D., Sibomana, L., & Ahmad, T. (2024). IoT and fuzzy logic integration for improved substrate environment management in mushroom cultivation. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100427. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100427>
- Islam, M. R., Oliullah, K., Kabir, M. M., Alom, M., & Mridha, M. F. (2023a). Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100880. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100880>
- Islam, M. R., Oliullah, K., Kabir, M. M., Alom, M., & Mridha, M. F. (2023b). Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100880. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100880>
- Jadhav, N., Rajnivas, B., Subapriya, V., Sivaramakrishnan, S., Premalatha, S., & Poongodi, P. (2024). Enhancing crop growth efficiency through IoT-enabled smart farming system. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 10. <https://doi.org/10.4108/eetiot.4604>
- Jia, X., Huang, Y., Wang, Y., & Sun, D. (2019). Research on water and fertilizer irrigation system of tea plantation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(3). <https://doi.org/10.1177/1550147719840182>
- Jimale, A. D., Abdullahi, M. O., Ahmed, Y. A., & Nageye, A. Y. (2023). Towards sustainable farming in Somalia: Integrating IoT for improved resource management. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(9), 95–101. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V10I9P109>
- Kaur, A., Bhatt, D. P., & Raja, L. (2024). Developing a hybrid irrigation system for smart agriculture using IoT sensors and machine learning in Sri Ganganagar, Rajasthan. *Journal of Sensors*, 2024, 6676907. <https://doi.org/10.1155/2024/6676907>
- Kitchenham, B. & Charters, S. (2007) Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering, Technical Report EBSE 2007-001, Keele University and Durham University Joint Report. https://www.researchgate.net/publication/302924724_Guidelines_for_performing_Systematic_Literature_Reviews_in_Software_Engineering
- Kuang, L., Shi, P., Hua, C., Chen, B., & Zhu, H. (2020). An enhanced extreme learning machine for dissolved oxygen prediction in wireless sensor networks. *IEEE Access*, 8, 198730–198739. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033455>
- Kumar, G. K., Bangare, M. L., Bangare, P. M., Kumar, C. R., Raj, R., Arias-González, J. L., Omarov, B., & Mia, M. S. (2024). Internet of things sensors and support vector machine integrated intelligent irrigation system for agriculture industry. *Discover Sustainability*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00179-5>

- Lavanya, P., & Muthu Mayil, K. (2019). IoT-based wireless sensors for agriculture monitoring. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 177–181. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1033.0782S419>
- Levin, S. (2024). Intelligent monitoring and management in the agro-industrial complex. *E3S Web of Conferences*, 539, 02016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453902016>
- Liang, W. Y., & Juang, J. G. (2022). Application of image identification to UAV control for cage culture. *Science Progress*, 105(4). <https://doi.org/10.1177/00368504221135450>
- Mishra, S., Volety, D. R., Bohra, N., Alfarhood, S., & Safran, M. (2023). A smart and sustainable framework for millet crop monitoring equipped with disease detection using enhanced predictive intelligence. *Alexandria Engineering Journal*, 83, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.041>
- Mohammed, M., Riad, K., & Alqahtani, N. (2021). Efficient IoT-based control for a smart subsurface irrigation system to enhance irrigation management of date palm. *Sensors*, 21(12), 3942. <https://doi.org/10.3390/s21123942>
- Mummaneni, S., Sappa, T. S., & Katakam, V. G. D. (2024). Enhancing crop health through digital twin for disease monitoring and nutrient balance. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 14(1), 57–62. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5626>
- Munaganuri, R. K., & Rao, Y. N. (2024). PAMICRM: Improving precision agriculture through multimodal image analysis for crop water requirement estimation using multidomain remote sensing data samples. *IEEE Access*, 12, 52815–52836. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3386552>
- Nieman, B., Johnson, C. S., Pearce, M., Marcrum, T., Thorne, M. C., Ashby, C., & Van Neste, C. W. (2024). Through the soil long range wireless power transfer for agricultural IoT networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(2), 2090–2099. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3250743>
- Pérez-Pons, M. E., Plaza-Hernández, M., Alonso, R. S., Parra-Domínguez, J., & Prieto, J. (2021). Increasing profitability and monitoring environmental performance: A case study in the agri-food industry through an edge-IoT platform. *Sustainability*, 13(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13010283>
- Petersen, K., Vakkalanka, S., & Kuzniarz, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and Software Technology*, 64, 1–18. <https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2015.03.007>
- Pham, V. B., Diep, T. T., Fock, K., & Nguyen, T. S. (2021). Using the Internet of Things to promote alternate wetting and drying irrigation for rice in Vietnam's Mekong Delta. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3), 43. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00705-z>
- Pineda-Castro, D., Diaz, H., Soto, J., & Urban, M. O. (2024). LysipheN: A gravimetric IoT device for near real-time high-frequency crop phenotyping: A case study on common beans. *Plant Methods*, 20(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01170-x>
- Popescu, D., Stoican, F., Stamatescu, G., Ichim, L., & Dragana, C. (2020). Advanced UAV–WSN system for intelligent monitoring in precision agriculture. *Sensors*, 20(3), 817. <https://doi.org/10.3390/s20030817>
- Postolache, S., Sebastião, P., Viegas, V., Postolache, O., & Cercas, F. (2023). IoT-based systems for soil nutrients assessment in horticulture. *Sensors*, 23(1), 403. <https://doi.org/10.3390/s23010403>
- Prasad, R., Tiwari, R., & Srivastava, A. K. (2023). Internet of Things-based fuzzy logic controller for smart soil health monitoring: A case study of semi-arid regions of India. *Engineering Proceedings*, 58(1), 85. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16208>
- Priya, G. L., Baskar, C., Deshmene, S. S., Adithya, C., & Das, S. (2023). Revolutionizing holy-basil cultivation with AI-enabled hydroponics system. *IEEE Access*, 11, 82624–82639. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3300912>
- Putri, R. E., Lestari, N. U., Ifmalinda, Arlius, F., Putri, I., & Hasan, A. (2024). Monitoring and controlling system of smart mini greenhouse based on Internet of Things (IoT) for spinach plant (*Amaranthus* sp.). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 14(1), 131–136. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.1.18408>
- Ram, C. R. S., Ravimaran, S., Krishnan, R. S., Julie, E. G., Robinson, Y. H., Kumar, R., Son, L. H., Thong, P. H., Thanh, N. Q., & Ismail, M. (2020). Internet of green things with autonomous wireless wheel robots against greenhouses and farms. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 16(6). <https://doi.org/10.1177/1550147720923477>
- Sajak, A. A. B., Ahmad, M. N. I., & Dao, H. (2024). Green IoT based on tropical weather: The impact of energy harvesting in wireless sensor network. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 40(1), 35–44. <https://doi.org/10.37934/araset.40.1.3544>

- Satra, R., Hadi, M. S., Sujito, Febryan, Fattah, M. H., & Busaeri, S. R. (2024). IoAT: Internet of aquaculture things for monitoring water temperature in tiger shrimp ponds with DS18B20 sensors and WeMos D1 R2. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 5(1), 62–71. <https://doi.org/10.18196/jrc.v5i1.18470>
- Setyawan, D. Y., Warsito, Marjunus, R., & Sumaryo. (2024). A novel controlling system for smart farming-based Internet of Things (IoT). *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(5), 630–641. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0150563>
- Sharma, A., Jain, A., Gupta, P., & Chowdary, V. (2021). Machine learning applications for precision agriculture: A comprehensive review. *IEEE Access*, 9, 4843–4873. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048415>
- Tagarakis, A. C., Kateris, D., Berruto, R., & Bochtis, D. (2021). Low-cost wireless sensing system for precision agriculture applications in orchards. *Applied Sciences*, 11(13), 5858. <https://doi.org/10.3390/app11135858>
- Taneja, M., Byabazaire, J., Jalodia, N., Davy, A., Olariu, C., & Malone, P. (2020). Machine learning based fog computing assisted data-driven approach for early lameness detection in dairy cattle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105286. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105286>
- Taparci, E., Olcay, K., Akmandor, M. O., Kabakulak, B., Sarioglu, B., & Gokdel, Y. D. (2024). A mathematical programming approach for IoT-enabled, energy-efficient heterogeneous wireless sensor network design and implementation. *Sensors*, 24(5), 1457. <https://doi.org/10.3390/s24051457>
- Ting, Y. T., & Chan, K. Y. (2024). Optimising performances of LoRa based IoT enabled wireless sensor network for smart agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101093. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101093>
- Tiurlikova, A., Stepanov, N., & Mikhaylov, K. (2019). Wireless power transfer from unmanned aerial vehicle to low-power wide area network nodes: Performance and business prospects for LoRaWAN. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(11). <https://doi.org/10.1177/1550147719888165>
- Ullah, R., Abbas, A. W., Ullah, M., Khan, R. U., Khan, I. U., Aslam, N., & Aljameel, S. S. (2021). EEWMP: An IoT-based energy-efficient water management platform for smart irrigation. *Scientific Programming*, 2021, 5536884. <https://doi.org/10.1155/2021/5536884>
- Wibisono, A. B., & Jayadi, R. (2024). Experimental IoT system to maintain water quality in catfish pond. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(3), 393–399. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0150340>
- Wu, Y., Yang, Z., & Liu, Y. (2023). Internet-of-things-based multiple-sensor monitoring system for soil information diagnosis using a smartphone. *Micromachines*, 14(7), 1395. <https://doi.org/10.3390/mi14071395>
- Yau, S. R., Jalani, J., Sadun, A. S., Rejab, S. M., & John, J. (2025). Development of an aquaponics farming technology system using Arduino based on Internet of Things. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 45(2), 11–24. <https://doi.org/10.37934/araset.45.2.1124>
- Yin, D., Wang, Y., & Huang, Y. (2023). Predicting soil moisture content of tea plantation using support vector machine optimized by arithmetic optimization algorithm. *Journal of Algorithms and Computational Technology*, 17. <https://doi.org/10.1177/17483026221151198>
- Zhang, C., & Liu, Z. (2019). Application of big data technology in agricultural Internet of Things. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(10). <https://doi.org/10.1177/1550147719881610>
- Zito, F., Giannoccaro, N. I., Serio, R., & Strazzella, S. (2024). Analysis and development of an IoT system for an agrivoltaics plant. *Technologies*, 12(7), 106. <https://doi.org/10.3390/technologies12070106>