

Green Computing: The Technological Key to Sustainable Digital Agriculture

Abstract– Digital agriculture has significantly enhanced productive efficiency through the intensive use of technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data, artificial intelligence, and cyber-physical systems; however, its increasing energy demand poses substantial environmental challenges. This paper examines the role of Green Computing as a technological cornerstone for the development of sustainable digital agriculture, aimed at reducing energy consumption and carbon footprint without compromising productivity. The adopted methodology consists of an analytical and systematic review of recent scientific literature, complemented by the examination of documented case studies and a comparative analysis of green technologies applied to the agricultural sector. The findings indicate that the integration of edge and fog computing architectures, Green Machine Learning algorithms, low-power IoT sensors, and renewable energy sources enables significant reductions in water use, agricultural inputs, and fossil energy consumption, achieving decreases of up to 80% in conventional energy use and productivity improvements ranging from 10% to 30%. The study concludes that the adoption of green computing principles represents a critical strategy for ensuring environmental sustainability, operational resilience, and the long-term viability of digital agriculture, while aligning with the Sustainable Development Goals and addressing the challenges posed by climate change.

Keywords– Green agriculture; Green computing; Green technologies; Internet of Agricultural Things (IoAT); Sustainable digital agriculture.

Green Computing: la Clave Tecnológica para la Agricultura Digital Sostenible

Fabián-R Jiménez-López, MSc.¹, Jenny-A. Rosales-Agredo, MSc.², and Andrés-F Jiménez-López, PhD.³

^{1,2} Facultad de Ingeniería – Grupo de Investigación I²E – Programa de Ingeniería Electrónica – Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, fabian.jimenez02@uptc.edu.co, jenny.rosales@uptc.edu.co

³ Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería – Grupo de Investigación Macrypt-Farmtechnology – Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia, ajimenez@unillanos.edu.co

Resumen—La agricultura digital ha impulsado la eficiencia productiva mediante el uso intensivo de tecnologías como IoT, Big Data, inteligencia artificial y sistemas ciberfísicos; sin embargo, su creciente demanda energética plantea desafíos ambientales significativos. Este artículo analiza el papel del Green Computing como eje tecnológico para el desarrollo de una agricultura digital sostenible, orientada a la reducción del consumo energético y de la huella de carbono sin comprometer la productividad. La metodología empleada corresponde a una revisión analítica y sistemática de literatura científica reciente, complementada con el estudio de casos documentados y el análisis comparativo de tecnologías verdes aplicadas al sector agrícola. Los resultados evidencian que la integración de computación en el borde y fog computing, algoritmos de Green Machine Learning, sensores IoT de bajo consumo y energías renovables permite reducciones sustanciales en el uso de agua, insumos agrícolas y energía fósil, alcanzando disminuciones de hasta el 80 % en consumo energético convencional y mejoras productivas entre el 10 % y el 30 %. Se concluye que la adopción de principios de informática verde constituye una estrategia esencial para garantizar la sostenibilidad ambiental, la resiliencia operativa y la viabilidad a largo plazo de la agricultura digital, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los desafíos del cambio climático.

Palabras clave—Agricultura digital sostenible; Agricultura Verde; Tecnologías Verdes; Computación Verde; Internet de las Cosas Agrícolas (IoAT).

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura digital o 4.0 ha emergido como una revolución en el sector agrícola, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los recursos mediante la integración de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT), *big data*, y sistemas de comunicación en tiempo real. Sin embargo, a medida que la adopción de estas tecnologías crece, también aumenta el consumo energético y el impacto ambiental asociado, lo que hace inaplazable aplicar los principios de la informática verde o *Green Computing* para reducir la huella ecológica del sector agrícola [1, 2].

La informática verde en la agricultura digital se centra en optimizar el uso de recursos tecnológicos para disminuir el consumo energético y las emisiones de carbono, sin perder eficiencia ni productividad. Esto implica el diseño de sistemas que empleen hardware de bajo consumo, el uso de energías renovables para alimentar los dispositivos IoT, y la adopción de algoritmos eficientes que reduzcan la cantidad de datos procesados y almacenados [2, 3]. De esta forma, se busca

promover una agricultura que sea productiva y respetuosa con el entorno natural.

En este contexto, las tecnologías de *fog computing* ofrecen una solución prometedora, ya que permiten procesar datos de manera descentralizada y local, cerca de los sensores y actuadores en el campo. Esto reduce la necesidad de transferencias de datos a centros de datos tradicionales, disminuyendo el consumo energético asociado y mejorando la eficiencia [2, 4]. La utilización de dispositivos de bajo consumo energético, alimentados por fuentes renovables como solar o eólica, complementa esta estrategia, promoviendo una agricultura más sostenible desde el punto de vista energético [2].

Otro aspecto clave de la informática verde en la agricultura digital es el desarrollo de sistemas de monitoreo en tiempo real que optimicen el uso de recursos, como agua y fertilizantes, en función de las condiciones ambientales. La implementación de sensores IoT y algoritmos eficientes permite realizar ajustes automáticos en las operaciones agrícolas, ahorrando recursos y minimizando el impacto ambiental [3, 4]. Esto se alinea con los objetivos de sostenibilidad y protección del ecosistema, contribuyendo a una gestión agrícola más responsable.

Finalmente, la educación y la concienciación sobre prácticas sostenibles en el uso de tecnologías agrícolas también juegan un papel fundamental. La incorporación de principios de *Green TI* en los programas de formación asegura que las futuras generaciones puedan implementar soluciones responsables y energéticamente eficientes [5, 6]. La integración de estos conocimientos en la formación técnica y académica garantiza que la innovación en agricultura digital sea también respetuosa con el medio ambiente.

En definitiva, la aplicación de la informática verde en la agricultura digital constituye una estrategia esencial para alcanzar un equilibrio entre la productividad y la preservación del entorno. La innovación tecnológica, sumada a la gestión responsable de recursos y energía, permite transformar la actividad agraria en un modelo más ecológico, eficiente y perdurable, contribuyendo de forma significativa a los objetivos de desarrollo sostenible a nivel global [1, 5].

II. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN DOCUMENTAL

Se llevó a cabo una revisión documental de carácter descriptivo y sistemático, con el fin de garantizar la trazabilidad, exhaustividad y reproducibilidad en la selección de las fuentes de evidencia científica relevantes para los

objetivos del estudio. El proceso se estructuró en las siguientes fases:

A. Búsqueda de Referencias

La identificación inicial de posibles documentos se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science (WoS) e IEEE Xplore. La estrategia de búsqueda empleó ecuaciones de búsqueda que combinan descriptores controlados y términos relacionados vinculados mediante operadores booleanos, para delimitar el campo temático de interés.

Las ecuaciones de búsqueda seleccionadas abordan las diferentes áreas de interés, incluyendo computación verde, agricultura sostenible, energías renovables, transporte y formación:

- Ecuaciones 1 y 2 (Computación Verde) Dirigidas a integrar la computación verde con la agricultura digital:

E1 = ("Green Machine Learning" OR "Green ML" OR "Algorithmic Efficiency") AND ("Model Optimization" OR "Model Compression" OR "Pruning" OR "Quantization")

E2 = ("Green Cloud Computing" OR "Renewable Energy") AND ("Big Data" OR "Green Agricultural IoT Ecosystems" OR "Green IoT")

- Ecuaciones 3 y 4 (Agricultura Sostenible) Orientadas a mostrar la convergencia entre comercio, transporte y formación en la agricultura digital sostenible:

E3 = ("Green Trade" OR "Digital Trade") AND ("Sustainable Agriculture" OR "Green Transportation" OR "Sustainable Logistics") AND ("Agribusiness" OR "Supply Chain")

E4 = ("Training" OR "Culture" OR "Education") AND ("Sustainable Digital Agriculture" OR "Smart Farming" OR "Agriculture 4.0") AND ("Sustainability" OR "Green Practices")

- Ecuaciones 5 y 6 (Sostenibilidad Agrícola) Enfocadas en las tecnologías verdes en la agricultura digital, mostrando ventajas en la sostenibilidad agrícola:

E5 = ("Precision Agriculture" OR "Smart Farming") AND ("IoT Sensors" OR "Internet of Things") AND ("Real-time environmental monitoring" OR "Sustainability")

E6 = ("Smart irrigation systems" OR "Automated irrigation") AND ("Efficient water management" OR "Water use efficiency") AND ("IoT" OR "Precision Agriculture")

- Ecuaciones 7 y 8 (Energías renovables y productividad) Destinadas a identificar las aplicaciones e impacto ambiental:

E7 = ("Renewable Energy" OR "Solar Energy" OR "Wind Power") AND ("Decarbonization" OR "Carbon Footprint") AND ("Agriculture" OR "Farming Sector")

E8 = ("Assessment" OR "Evaluation") AND ("Environmental Impact" OR "Productivity Impact") AND ("Applications" OR "Use Cases") AND ("Sustainable Agriculture")

B. Criterios de Inclusión y Exclusión

Se consideraron artículos en inglés y español publicados entre 2017 y 2026, que compensaran estudios con validación empírica y relevancia en la intersección de tecnologías verdes y agricultura digital. Se excluyó la literatura gris, informes no revisados por pares, estudios no empíricos y aquellos sin evidencia metodológica sólida.

C. Selección de Referencias

De un total inicial de 63 artículos encontrados en las bases de datos, se realizó un proceso de filtrado basado en la lectura de títulos y resúmenes, eliminando duplicados y artículos que no cumplieran con los criterios de relevancia. Posteriormente, se revisaron los textos completos para la validación final, resultando en 40 referencias seleccionadas.

El proceso de selección se representó mediante un diagrama PRISMA mostrado en la Fig. 1, que evidencia las etapas de identificación, filtrado, elegibilidad e inclusión. Para garantizar la calidad de la revisión, se aplicaron criterios de exclusión en dos fases críticas del proceso: Filtrado y Evaluación de elegibilidad.

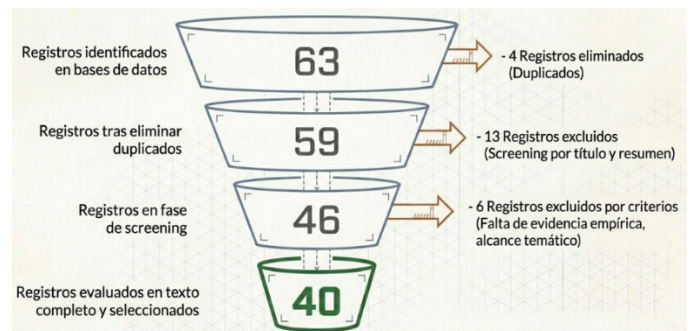


Fig. 1. Diagrama PRISMA para selección de referencias para el estudio.

En la fase de Filtrado Inicial (*Screening*) de los 63 registros únicos, se excluyeron 4 artículos duplicados. Luego, tras la revisión de títulos y resúmenes se excluyeron 13 documentos (n=13). Estos estudios, si bien mencionaban las palabras clave, se centraban en aplicaciones puramente teóricas o áreas tangenciales fuera del enfoque de ingeniería definido para este trabajo.

En la fase de evaluación de elegibilidad, tras la lectura crítica de los 46 artículos restantes, se descartaron 6 registros por las siguientes razones técnicas: falta de evidencia empírica (n=3), donde se tenían documentos con reseñas breves que no presentaban datos experimentales ni validaciones técnicas que sustentaran sus conclusiones.

En cuanto a inconsistencia metodológica (n=2), se omitieron registros donde el diseño experimental o el proceso de recolección de datos no cumplía con los estándares de rigor necesarios para ser comparados con el resto de la muestra; y acceso restringido (n=1), dado que no fue posible recuperar el texto completo ni mediante bases de datos suscritas ni contacto directo con los autores.

La transición de 63 registros iniciales a 40 referencias finales representa una tasa de inclusión del 63.5%, lo cual indica un proceso de búsqueda altamente dirigido y eficiente, minimizando el ruido informativo desde las etapas tempranas.

D. Método de Síntesis

La contribución propuesta adopta un análisis riguroso, mediante la implementación de un método de síntesis cualitativo temático complementado con un metaanálisis descriptivo, en el que se identifican y cuantifican los niveles de evidencia existente, además de evaluar posibles sesgos en los estudios revisados.

La taxonomía desarrollada clasifica las tecnologías verdes según tres dimensiones principales: (1) la tecnología (sensores IoT, energías renovables, algoritmos de Green ML, etc.), (2) la métrica de impacto (energía, emisiones de CO₂, consumo de agua, latencia en respuesta, coste económico) y (3) el nivel de implementación en la cadena de valor agrícola (sensor, borde, nube, logística). Esta matriz permite detectar con claridad los ámbitos con mayor evidencia y aquellos con brechas de conocimiento, así como los posibles sesgos metodológicos en los estudios existentes.

III. TENDENCIAS ACTUALES DE INVESTIGACIÓN: INTEGRACIÓN DE LA COMPUTACIÓN VERDE Y LA AGRICULTURA DIGITAL

La agricultura digital representa una convergencia de tecnologías avanzadas, tales como sensores IoT, Big Data, Inteligencia Artificial cuya integridad estructural y viabilidad a largo plazo dependen intrínsecamente de su alineación con los paradigmas de la Computación Verde. La adopción de estas innovaciones permite reducir la huella ecológica, optimizar el uso de recursos, y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas frente a los desafíos del cambio climático y la escasez de recursos [1, 2, 4].

A. Aprendizaje de Máquina Verde y Eficiencia Algorítmica

En el contexto de la agricultura inteligente, la investigación se centra en el desarrollo de sistemas de monitoreo y control que integran tecnologías de baja potencia (*low-power design*) y algoritmos optimizados para minimizar el consumo energético. La utilización de modelos predictivos basados en Aprendizaje de Máquina Verde (*Green Machine Learning – Green ML*) y visión artificial han demostrado mejorar la detección temprana de plagas, enfermedades y necesidades de riego, minimizando el ciclo de instrucción de la CPU [1, 4].

Las plataformas de agricultura inteligente combinan sensores en suelo, infraestructura de drones y sistemas de visión por computadora que, mediante análisis en tiempo real y energéticamente eficientes, reducen la dependencia de insumos excesivos y limitan el consumo de recursos energéticos. La implementación de algoritmos de aprendizaje profundo con bajo consumo, como redes neuronales convolucionales (CNN, *Convolutional Neural Networks*), mediante técnicas de TinyML permite ejecutar procesos de computación en el borde o *Edge Computing*, reduciendo la dependencia de la nube y, por

consiguiente, el consumo energético derivado del transporte de datos.

B. Computación en la Nube Verde y Energías Renovables

La adopción de la computación en la nube en entornos agrícolas afianza su papel en la gestión de grandes volúmenes de datos y en la ejecución de aplicaciones distribuidas. Sin embargo, dado que la infraestructura en la nube requiere una significativa cantidad de energía, la integración de fuentes de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, se ha convertido en un componente necesario para garantizar la sostenibilidad [8].

La gestión eficiente de cargas de trabajo mediante virtualización, combinada con estrategias de balanceo de carga vinculadas a la disponibilidad de energías renovables, permite reducir el consumo energético en los sistemas agrícolas digitales. Además, el despliegue de data centers modulares y de tamaño reducido, alimentados por energías limpias, refuerza la intención de disminuir la huella de carbono de las operaciones agrícolas a escala global. La innovación en sistemas híbridos de almacenamiento energético también favorece el funcionamiento continuo y sostenible en zonas rurales [9].

C. Green ML: Optimización y Compresión de Modelos

La aplicación de algoritmos de ML enfocados en la eficiencia energética, denominados ML verde, ha generado avances en prácticas agrícolas sustentables. Modelos como *Long Short-Term Memory* (LSTM), CNN y redes *Gated Recurrent Units* (GRUs) han sido utilizados para pronósticos climáticos de precisión, optimización del consumo hídrico y evaluación de recursos energéticos, minimizando el gasto energético y reduciendo las emisiones relacionadas, es decir, bajo métricas de eficiencia energética por inferencia [1, 4].

Asimismo, técnicas como la poda (*pruning*) energética, la cuantización de modelos y la compresión de redes neuronales han permitido reducir en hasta un 30% el consumo de energía en la ejecución de aplicaciones en dispositivos en campo o en estaciones remotas, sin perder precisión predictiva. Los modelos de gestión energética ambiental integran sensores y plataformas de análisis que emplean algoritmos de optimización en tiempo real para ajustar automáticamente las operaciones agrícolas, favoreciendo una gestión eficiente de recursos y una menor huella ambiental.

D. Big Data y Ecosistemas Green IoT Agrícola

El ecosistema de agricultura digital se apoya sustancialmente en la integración de sistemas IoT que, mediante sensores distribuidos en campo, estaciones meteorológicas y controles automatizados, posibilitan una producción agrícola de precisión orientada al equilibrio ecosistémico [3, 10]. La recolección y el análisis de datos a gran escala, a través de plataformas de Big Data, facilitan la identificación de patrones climáticos, la optimización de insumos y la predicción de cosechas bajo un esquema de máxima eficiencia energética.

Además, la implementación de protocolos de comunicación de bajo consumo (LPWAN y LoRaWAN),

complementada con sistemas de recolección de energía (*Energy Harvesting*) como paneles solares y celdas piezoeléctrica, extiende la vida útil de los dispositivos y minimiza la necesidad de mantenimiento. Esta configuración mejora la eficiencia y la autonomía operativa en zonas rurales. La gestión informada por este modelo integrado permite mitigar el uso irracional de recursos, reducir emisiones y promover prácticas agrícolas más ecológicas [11].

E. Comercio Verde o Digital en Agricultura Sostenible

Las plataformas basadas en *blockchain* verde y sistemas de gestión descentralizada son fundamentales para asegurar la trazabilidad y transparencia en las cadenas de producción agrícola sostenible [1, 12]. La gestión eficiente y compartida de insumos, certificados ecológicos y recursos, mediante sistemas digitales inmersos en plataformas públicas o de propósito específico, reduce el uso de recursos, minimiza residuos y evita prácticas irresponsables con impacto negativo en el medio ambiente.

La digitalización y transparencia de la cadena de valor mediante herramientas tecnológicas promueven la optimización de recursos y la mitigación del impacto sobre el entorno. Este enfoque asegura la alineación con marcos regulatorios y criterios globales de trazabilidad y producción responsable [2, 12].

F. Transporte Verde y Logística Sostenible en Agricultura

La optimización del transporte y distribución de insumos y productos agrícolas ha recibido un impulso significativo mediante análisis de Big Data y Sensores IoT, con el objetivo de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, reducir costos energéticos y mejorar la eficiencia en logística [13]. La planificación de rutas inteligentes basada en datos en tiempo real y la monitorización de flotas mediante sistemas conectados permiten reducir significativamente el consumo energético en toda la cadena de suministro agrícola.

Estas soluciones también favorecen la minimización del impacto ambiental en zonas rurales y urbanas, fomentando prácticas de transporte más sostenibles y alineadas con los objetivos globales de mitigación del cambio climático [14].

G. Formación y cultura en Agricultura Digital Sostenible

La integración de criterios de preservación ambiental en los programas académicos de agricultura digital fomenta una fuerza laboral consciente y competente en prácticas de ética productiva [5, 6]. La actualización curricular en tecnologías verdes, gestión eficiente de recursos y modelos de negocio circulares, permite desarrollar las competencias necesarias para impulsar innovaciones respetuosas con el entorno.

De igual modo, la capacitación en el uso de energías limpias y algoritmos de bajo consumo energético resulta fundamental para instituir una ética de preservación ambiental en el campo. Este fortalecimiento del capital humano asegura que la transformación digital de la agricultura se traduzca en modelos de producción autosuficientes y equilibrados.

H. Análisis Crítico

La aplicación de criterios de viabilidad ambiental en la agricultura digital requiere una integración interdisciplinaria de tecnologías, políticas y prácticas. La investigación evidencia que el diseño de sistemas descentralizados, mediante el uso de Fog y Edge Computing, reduce significativamente el consumo energético de las operaciones agrícolas; esto favorece tanto la escalabilidad como la perdurabilidad operativa del modelo [2, 15].

El uso eficiente de computación verde, junto con algoritmos de gestión adaptativos y modelos predictivos, permite disminuir la huella ecológica y potenciar la capacidad de respuesta de los sistemas agrícolas ante condiciones ambientales variables. La adopción de estos enfoques alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU asegura que las innovaciones tecnológicas tengan un impacto positivo duradero en el sector agropecuario, promoviendo un equilibrio entre productividad y cuidado ambiental [1, 15].

La Fig. 2 esquematiza el marco del Green Computing aplicado a la agricultura digital, integrando tecnologías como IoT, Big Data y Blockchain para la gestión inteligente de recursos.

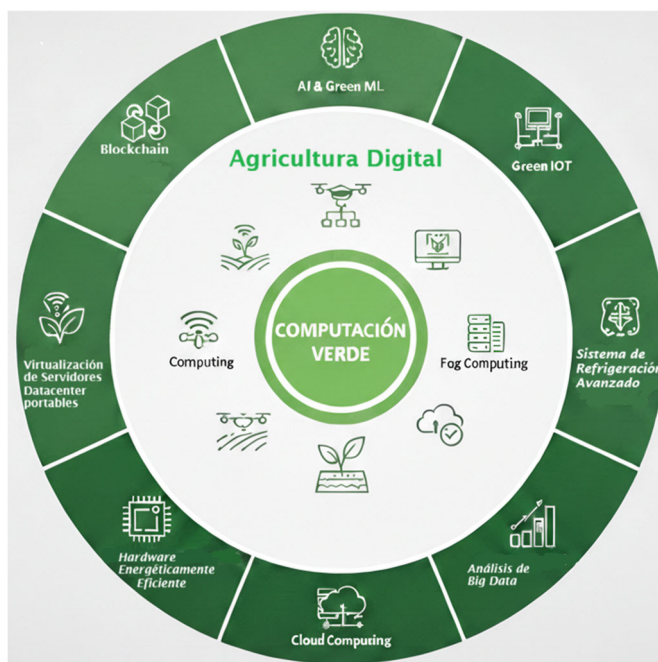


Fig. 2. Integración de la computación verde con la agricultura digital.

Mediante la sinergia entre sensores de bajo consumo, *fog computing* y energías renovables, esta arquitectura permite la captura y análisis de datos en tiempo real, optimizando la producción agrícola bajo estándares de sostenibilidad y mínima huella ambiental. La integración de estas capas permite que la agricultura digital adopte prácticas sostenibles, mediante el uso

de sensores IoT, Fog Computing y energías renovables, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental y a una producción agrícola más eficiente y ecológica.

IV. TECNOLOGÍAS VERDES EN LA AGRICULTURA DIGITAL: VENTAJAS, APLICACIONES E IMPACTO AMBIENTAL

La transformación digital del sector agrícola se ha consolidado como una estrategia clave para responder a los desafíos contemporáneos asociados a la seguridad alimentaria, la degradación ambiental y el cambio climático. En este contexto, la convergencia entre tecnologías digitales y principios de sostenibilidad ha dado lugar al concepto de agricultura digital verde —*green agriculture*— un enfoque que integra sistemas inteligentes, automatización, análisis de datos y fuentes de energía limpia para optimizar la producción agrícola minimizando su impacto ambiental [16, 17].

La convergencia entre la sostenibilidad ambiental y la digitalización agrícola constituye uno de los mayores desafíos y oportunidades del presente siglo. La creciente demanda mundial de alimentos, acompañada por el deterioro de recursos naturales y el cambio climático, ha impulsado a la comunidad científica, los productores y los innovadores a buscar soluciones que favorezcan la eficiencia en el uso de recursos y la minimización del impacto ambiental. En este contexto, las tecnologías verdes para *green agriculture* emergen como pilares fundamentales para transformar los sistemas de producción agrícola, combinando avances tecnológicos con principios ecológicos para lograr una agricultura más sostenible, resiliente y competitiva.

La agricultura tradicional, basada en prácticas intensivas en insumos y en el uso indiscriminado de recursos como agua, fertilizantes y energía, ha demostrado ser insostenible en muchas regiones del mundo. La modernización del sector agrícola, mediante la incorporación de tecnologías digitales ecológicas, permite no solo optimizar los procesos productivos sino también reducir las huellas ecológicas, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a la economía circular. Además, la creciente disponibilidad de datos en tiempo real y la capacidad de análisis mediante inteligencia artificial y sistemas de monitoreo avanzado brindan oportunidades inéditas para tomar decisiones informadas, precisas y responsables ambientalmente.

Diversos estudios coinciden en que los modelos agrícolas tradicionales, caracterizados por un uso intensivo de insumos, presentan limitaciones significativas en términos de eficiencia de recursos y sostenibilidad a largo plazo [18, 19]. Frente a ello, las tecnologías verdes aportan soluciones que no solo reducen el impacto ambiental, sino que también optimizan la rentabilidad y competitividad de las explotaciones agrícolas. La integración de estas innovaciones establece un marco de acción que respeta los principios de un desarrollo sostenible, alineando las demandas sociales, económicas y ambientales, y permitiendo a los agricultores mejorar sus prácticas, reducir su huella ecológica y adaptar sus sistemas productivos a los efectos del cambio climático [20, 21].

A continuación, se analiza de manera sistemática las principales tecnologías verdes que están redefiniendo la agricultura digital, evaluando sus ventajas técnicas, aplicaciones prácticas y efectos cuantificables sobre el consumo de recursos, las emisiones y la productividad agrícola. En particular, se examinan cuatro ejes tecnológicos ampliamente documentados en la literatura reciente: agricultura de precisión, sistemas de riego inteligente, sensores IoT para monitoreo ambiental y el uso de energías renovables en explotaciones agrícolas.

A. Agricultura de precisión como pilar de la sostenibilidad agrícola

La agricultura de precisión (AP) se ha consolidado como una de las tecnologías más influyentes en la transición hacia sistemas agrícolas sostenibles, dado que posibilita manejar los recursos en función de las características específicas de cada parcela, planta o etapa del ciclo productivo. Su fundamento radica en la gestión diferenciada de cultivos mediante el uso o incorporación de datos geoespaciales, sensores remotos, drones, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis de grandes volúmenes de información, permitiendo ajustar las prácticas agrícolas a la variabilidad intrínseca del terreno buscando optimizar la aplicación de insumos agrícolas, reducir pérdidas y aumentar la productividad [22, 23].

Desde una perspectiva ambiental, múltiples investigaciones reportan que la AP contribuye significativamente a la reducción del uso de fertilizantes y pesticidas, mitigando la contaminación del suelo y los cuerpos de agua. En particular, la aplicación variable de fertilización ha demostrado disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al nitrógeno agrícola, uno de los principales contribuyentes al calentamiento global [24].

Casos documentados en América del Sur y Europa indican reducciones de hasta un 30% en el uso de fertilizantes sin comprometer el rendimiento de los cultivos, e incluso con incrementos productivos moderados. Asimismo, el empleo de drones con sensores multiespectrales ha permitido detectar estrés hídrico y enfermedades de forma temprana, reduciendo intervenciones químicas innecesarias y optimizando el consumo energético [16, 17].

Otra aplicación concreta es el uso de drones con cámaras multiespectrales para detectar áreas con déficit hídrico, plagas o enfermedades con alta precisión. Esto permite actuar solo en zonas específicas, minimizando intervenciones indiscriminadas y reduciendo el consumo de agroquímicos y energía. Un estudio de coincidencia en regiones de Estados Unidos reportó una reducción del 40% en la huella de carbono del uso de pesticidas al aplicar estas tecnologías de manera integrada, además de lograr incrementos en rendimiento del 10-15% [22, 23].

B. Sistemas de riego inteligente para la gestión eficiente del recurso hídrico

El agua constituye uno de los recursos más críticos en la agricultura, representando cerca del 70% del consumo mundial

de agua dulce. En este contexto, los sistemas de riego inteligente emergen como una tecnología verde esencial para mejorar la eficiencia hídrica y reducir el impacto ambiental de la actividad agrícola [25, 26].

Estos sistemas integran sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas automáticas y algoritmos de control que ajustan el riego en función de las necesidades reales del cultivo y las condiciones climáticas. La literatura reporta reducciones en el consumo de agua que oscilan entre el 30% y el 60%, dependiendo del tipo de cultivo y del grado de automatización implementado [16, 17].

El riego por sensor, por ejemplo, ajusta la cantidad de agua suministrada basándose en datos instantáneos sobre la humedad del suelo, evitando el riego excesivo y evitándose así la lixiviación de nutrientes y la emisión de gases de efecto invernadero derivados del uso desproporcionado de agua y energía. Investigaciones han documentado reducciones en consumo hídrico de hasta un 50% en cultivos de alta demanda hídrica, acompañadas de mejoras en rendimientos y calidad del producto. En Israel, uno de los pioneros en tecnificación del riego, el uso de sistemas automatizados con análisis predictivos ha permitido la reducción del consumo de agua en cultivos hortícolas en un 60%, disminuyendo a la vez las emisiones relacionadas con bombear y transportar agua [27].

Experiencias documentadas en regiones semiáridas muestran que el riego inteligente no solo reduce el uso de agua, sino que también disminuye el consumo energético asociado al bombeo y transporte del recurso, contribuyendo a una reducción indirecta de emisiones de carbono. Además, la integración de modelos predictivos basados en datos meteorológicos permite anticipar eventos climáticos extremos y ajustar la estrategia de riego de manera preventiva [16, 17, 28].

C. Sensores IoT para monitoreo ambiental en tiempo real

El Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la agricultura digital al posibilitar el monitoreo continuo y distribuido de variables ambientales y productivas. Redes de sensores de bajo consumo, conectados a plataformas de gestión de datos, posibilitan la vigilancia en tiempo real de variables clave como temperatura, humedad, radiación solar, concentración de gases, parámetros del suelo, calidad del agua y otros parámetros críticos como la presencia de plagas o enfermedades [16, 17].

El valor estratégico de estas tecnologías radica en su capacidad para generar información precisa y contextualizada, favoreciendo la detección temprana de problemas que, de no atenderse oportunamente, pueden traducirse en mayores pérdidas, y facilitando una toma de decisiones basada en evidencia. Estudios recientes muestran que la integración de sensores IoT en sistemas agrícolas puede reducir el uso de fertilizantes y pesticidas entre un 20% y un 35%, gracias a una gestión más ajustada a las condiciones microclimáticas [10, 11, 29].

La monitorización ambiental mediante IoT también ha sido clave en la detección temprana de plagas y enfermedades, permitiendo acciones focalizadas y sostenibles. Asimismo, estos datos favorecen la aplicación de fertilizantes y pesticidas solo en las cantidades y momentos necesarios, lo cual evita el desperdicio y reduce las emisiones de gases contaminantes.

Además, los datos generados por los sensores IoT pueden ser procesados mediante técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, mejorando la capacidad predictiva del sistema agrícola y fortaleciendo su resiliencia frente a la variabilidad climática. Este enfoque resulta especialmente relevante en escenarios de agricultura de pequeña escala, donde la optimización de recursos es crítica para la sostenibilidad económica y ambiental [16, 17].

D. Energías renovables y descarbonización de la agricultura

La incorporación de energías renovables en explotaciones agrícolas constituye un elemento clave para reducir la huella de carbono del sector. La literatura revisada destaca el creciente uso de paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas de pequeña escala y biogás para el suministro eléctrico de sistemas de riego, estaciones de monitoreo, estaciones de bombeo, electrificación de infraestructura, maquinaria agrícola, calefacción de invernaderos y procesos de postcosecha [30]. La Tabla I sintetiza una visión integral de las tecnologías verdes en agricultura digital.

TABLA I
 COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS VERDES EN AGRICULTURA DIGITAL

Tecnología Verde	Aplicación Concreta	Beneficios Ambientales	Impacto Cuantificable
Agricultura de Precisión	Mapeo y análisis de parcelas.	Reducción de insumos, emisiones. Menor contaminación.	Reducción de CO ₂ en un 20-30%. Optimización uso de fertilizantes y pesticidas.
Sistemas de Riego Inteligente	Control Remoto mediante sensores.	Ahorro de agua y energía. Eficiencia hídrica adaptable al cambio climático.	Disminución del consumo hídrico >50%.
Sensores IoT	Monitoreo en tiempo real.	Menor uso de pesticidas y fertilizantes.	Reducción del uso químico en un 25-30%
Energías Renovables	Paneles solares y turbinas eólicas.	Reducción de huella de carbono (emisiones de CO ₂). Optimización uso energía fósil.	Hasta 80% del consumo energético autonomizado

El uso de energía solar en agricultura ha demostrado ser particularmente efectivo en regiones rurales con acceso limitado a la red eléctrica, permitiendo la adopción de tecnologías digitales sin incrementar las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero asociados a la generación energética tradicional [31, 32]. Asimismo, la producción de biogás a partir de residuos agrícolas y ganaderos contribuye simultáneamente a la generación de energía y a la gestión sostenible de desechos.

Diversos estudios reportan reducciones superiores al 70% en el consumo de energía proveniente de fuentes fósiles tras la implementación de sistemas renovables, junto con beneficios

económicos derivados de la disminución de costos operativos. El caso de SunCulture en Kenia ejemplifica cómo los sistemas de energía solar pueden complementar tecnologías de riego y monitoreo, proporcionando energía limpia y asequible a comunidades rurales con recursos limitados [16].

La implementación de sistemas solares en fincas de cacao en Ghana y en invernaderos en España ha permitido reducir en un 80% el consumo de electricidad proveniente de fuentes no renovables, disminuir costos operativos y reducir significativamente la huella de carbono de las explotaciones [17]. Además, las plantas de biogás aprovechando residuos orgánicos agrícolas ofrecen una doble ventaja: generación de energía y gestión de residuos. La producción de biogás en explotaciones porcinas en Países Bajos no solo ayuda a cubrir la demanda energética, sino que también reduce las emisiones de gases nocivos y las filtraciones de nitratos y fosfatos hacia el medio ambiente [16, 17].

E. Aplicaciones y casos de uso concretos

Diversos ejemplos en el mundo reflejan la efectividad de la integración de tecnologías verdes en la agricultura digital. La biofábrica de la Universidad de Wageningen (Países Bajos) aplica sistemas de IoT, energía solar y agricultura de precisión para crear un ecosistema autosostenible que emula condiciones controladas de cultivo, logrando reducir en un 70% el consumo energético total y en un 50% el uso de agroquímicos [16, 33].

En la Tabla II se resumen los principales estudios citados, especificando: estudio, contexto, métrica, resultado cuantificado y limitaciones, con el fin de distinguir claramente entre resultados puntuales, promedios o rangos.

TABLA II
 CASOS DE ESTUDIO, RESULTADOS Y LIMITACIONES DE LA INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS VERDES EN LA AGRICULTURA DIGITAL

Estudio	Contexto	Métrica	Resultado Cuantificado	Tipo de Resultado	Limitaciones
[16] / Estudio en EE. UU.	Uso de drones multispectrales en agricultura de precisión	Reducción en uso de pesticidas	40 % menos huella de carbono en el uso de pesticidas	Resultado Puntual en un caso Específico	La reducción es un máximo observado, resultado en condiciones particulares, no una media generalizada
[16, 17] / Diversos en Israel y otros países	Sistemas de riego automatizado con análisis predictivos	Reducción en consumo de agua	Hasta 60 % en cultivos hortícolas	Resultado máximo en condiciones controladas	Resultados obtenidos en regiones específicas, no necesariamente replicables en todos los contextos
[22, 23] / Estados Unidos	Drones multispectrales en detección temprana	Reducción en uso de agroquímicos	40 % de reducción en pesticidas y aumento del 10-15 % en rendimiento	Proyección en estudios de casos específicos	Estudios de casos puntuales, resultados no presentados como promedios, con condiciones de alta tecnología
[27] / Israel	Sistemas automatizados de riego	Reducción en consumo de agua	50 % en cultivos de alta demanda hídrica	Resultado en escenario específico	Solo en cultivos particulares, sin generalización a otros tipos o escalas
[33] / Argentina (EcoAgro)	Agricultura de precisión con sensores IoT y energía renovable	Reducción en consumo de agua y fertilizantes	45 % en agua y 25 % en fertilizantes	Resultados en una explotación concreta	Datos de una única explotación, sin comparaciones con otras condiciones o benchmarks amplios
[16, 33] / Variados en América del Sur y Europa	Energías renovables en agricultura sostenible	Disminución de emisiones de gases de efecto invernadero	Hasta 3 toneladas de CO ₂ equivalente por ha y año	Promedio estimado de varios estudios	Promedios derivados de diferentes contextos y metodologías, no una única fuente comparable

En California, el uso combinado de sensores de humedad, drones y análisis de datos en línea ha permitido a los productores de uva reducir el uso de agua en un 40% y mantener, o incluso mejorar, los estándares de calidad, gracias a decisiones más informadas y precisas[17, 33]. Por otro lado, la implementación de sistemas de energía solar en invernaderos de cultivo de flores en Ecuador ha logrado disminuir en torno a un 65% las emisiones relacionadas con la generación eléctrica para calefacción y ventilación, promoviendo un ciclo de producción ecológico y competitivo [15, 17, 33].

Asimismo, en India y China, programas gubernamentales han promovido la adopción de tecnologías de agricultura digital orientadas a maximizar la eficiencia en pequeñas explotaciones rurales, usando sensores de bajo costo, plataformas de datos móviles y energías renovables, logrando mejoras en rendimiento y sostenibilidad en regiones donde antes predominaba la alta dependencia de insumos tradicionales [33–35].

Otro caso de estudio exitoso es la finca "EcoAgro" en la provincia de Mendoza, Argentina, donde ha configurado un sistema de agricultura de precisión vinculado a una red de sensores IoT y un sistema de riego inteligente, logrando reducir en un 45% su consumo de agua y en un 25% el uso de fertilizantes, lo cual ha generado una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en su operación y una mejora en calidad de los productos [16, 33]. Paralelamente, la apuesta por energías renovables ha permitido que su fotovoltaica genere aproximadamente el 70% de la energía necesaria, estableciendo un ejemplo de sostenibilidad y autogestión.

F. Evaluación del impacto ambiental y en productividad

La cuantificación de beneficios en agricultura verde es fundamental para sustentar decisiones y políticas. Estudios de contemporáneo desarrollo muestran que la implementación de sistemas de agricultura de precisión y riego inteligente puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en 1-3 toneladas de CO₂ equivalente por hectárea anualmente, dependiendo del cultivo y las condiciones de base. La reducción en el consumo de agua en sistemas equipados puede superar el 50%, y en varias explotaciones se ha observado una mejora significativa en los rendimientos, con incrementos que varían entre un 10% y un 30%, en función de la adaptación tecnológica y las condiciones del suelo [16, 17, 33].

Este impacto, sin embargo, requiere una evaluación holística y adaptativa, considerando además los posibles obstáculos tecnológicos, económicos y sociales ligados a la transición. La compatibilidad de las tecnologías con las capacidades locales y la formación técnica de los agricultores emergen como variables críticas en este proceso.

El panorama de las tecnologías verdes en agricultura digital tiende a consolidarse en la medida que avancen las capacidades en análisis de datos, inteligencia artificial y energías renovables [36–40]. La automatización total de los procesos agrícolas, la integración de sistemas ciber-físicos, *edge computing* y el uso

de *big data* permitirán una gestión más inteligente y precisa, donde las tecnologías verdes aplicadas a la agricultura digital constituyen una estrategia efectiva para mejorar la sostenibilidad ambiental sin comprometer la productividad. La sinergia entre agricultura de precisión, riego inteligente, sensores IoT y energías renovables permite reducir significativamente el consumo de recursos y las emisiones, al tiempo que fortalece la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático.

V. CONCLUSIONES

La revisión desarrollada confirma que la integración del *Green Computing* en la agricultura digital constituye un eje tecnológico fundamental para avanzar hacia sistemas productivos ambientalmente sostenibles, energéticamente eficientes y resilientes frente a los desafíos del cambio climático y la seguridad alimentaria. La evidencia analizada demuestra que el uso indiscriminado de tecnologías digitales sin criterios de eficiencia energética puede amplificar la huella ambiental del sector agrícola, lo que hace imprescindible adoptar enfoques de diseño y operación basados en principios de informática verde.

Los resultados de la revisión indican que la adopción de arquitecturas descentralizadas, mediante *fog computing* y *edge computing*, reduce de forma significativa el consumo energético asociado al transporte y procesamiento de datos en la nube, al tiempo que mejora la latencia, la escalabilidad y la autonomía operativa de los sistemas agrícolas inteligentes. Este enfoque resulta especialmente relevante en entornos rurales y de pequeña escala, donde el acceso a infraestructura energética y de comunicaciones es limitado.

Asimismo, el análisis de tecnologías basadas en *Green Machine Learning* evidencia que la optimización algorítmica, la compresión de modelos y el uso de técnicas como TinyML permiten mantener altos niveles de precisión predictiva en aplicaciones agrícolas (como riego inteligente, detección de plagas y monitoreo ambiental) con reducciones energéticas sustanciales, lo que refuerza la viabilidad de la inteligencia artificial en escenarios de sostenibilidad estricta.

La integración de sensores IoT de bajo consumo, protocolos de comunicación eficientes y sistemas de recolección de energía emerge como un factor clave para la reducción del uso de insumos agrícolas y la optimización de recursos hídricos y energéticos. Los estudios revisados muestran reducciones consistentes en el uso de agua, fertilizantes y pesticidas, así como mejoras en la productividad agrícola, evidenciando que la sostenibilidad ambiental y la eficiencia productiva no son objetivos contrapuestos, sino complementarios.

Por otro lado, la incorporación de energías renovables (principalmente solar, eólica y biogás) se consolida como un pilar para la descarbonización del sector agrícola digital, permitiendo una disminución significativa de la dependencia de combustibles fósiles y de las emisiones de gases de efecto

invernadero, además de mejorar la autonomía energética de las explotaciones.

Finalmente, este trabajo pone de manifiesto que el impacto del *Green Computing* en la agricultura digital trasciende el ámbito tecnológico, requiriendo una visión sistémica que integre formación académica, políticas públicas, modelos de negocio sostenibles y una cultura de responsabilidad ambiental. La adopción de estos enfoques permite alinear la transformación digital del sector agrícola con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, consolidando un modelo productivo más eficiente, ecológico y socialmente responsable.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Grupo de Investigación *FE* del Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) Tunja, por su soporte y apoyo tecnológico en el desarrollo de este estudio. De igual manera, Igualmente, se agradece la colaboración académica del Grupo de Investigación *Macrypt-Farmtechnology* de la Universidad de los Llanos, en Villavicencio, Colombia.

REFERENCIAS

- [1] V. Bolón, L. Morán, B. Cancela, and A. Alonso, "A review of green artificial intelligence: Towards a more sustainable future," *J. Neurocomputing*, vol. 599, no. 12, pp. 1-10, 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.128096.
- [2] R. Qureshi, S. Mehboob, and M. Aamir, "Sustainable Green Fog Computing for Smart Agriculture," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 121, no. 6, pp. 1379-1390, 2021, doi: 10.1007/s11277-021-09059-x.
- [3] M. Alsharif, A. Jihad, A. Kelechi, and R. Kannadasan, "Green IoT: A review and future research directions," *Symmetry*, vol. 15, no. 3, pp. 1-17, 2023, doi: 10.3390/sym15030757.
- [4] Y. Mehta, R. Xu, B. Lim, J. Wu, and J. Gao, "A review for green energy machine learning and AI services," *Energies*, vol. 16, no. 15, pp. 1-30, 2023, doi: 10.3390/en16155718.
- [5] M. Angelaki, F. Bersimis, and T. Karvounidis, "Towards more sustainable higher education institutions: Implementing the sustainable development goals and embedding sustainability into the information and computer technology curricula," *Educ. Inf. Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 5079-5113, 2023, doi: 10.1007/s10639-023-12025-8.
- [6] M. Hamadi, U. Imtina, and F. Namisango, "Sustainability education in information systems' curricula: A conceptual research framework," *Educ. Inf. Technol.*, vol. 29, no. 12, pp. 14769-14787, 2024, doi: 10.1007/s10639-023-12409-w.
- [7] P. Bhambri and A. Khang, "Edge Computing for Enhancing Efficiency and Sustainability in Green Transportation Systems," *Springer*, 2025, pp. 43-65, doi: 10.1007/978-3-031-72617-0_3.
- [8] M. Yenugula, S. Sahoo, and S. Goswami, "Cloud computing for sustainable development: An analysis of environmental, economic and social benefits," *J. of Future Sustainability*, vol. 4, pp. 45-60, 2024, doi: 10.5267/j.jfs.2024.1.005.
- [9] D. Zhao and J. Zhou, "An energy and carbon-aware algorithm for renewable energy usage maximization in distributed cloud data centres," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 165, pp. 156-166, 2022, doi: 10.1016/j.jpdc.2022.04.001.
- [10] M. Qasim and M. Sajid, "An efficient IoT task scheduling algorithm in cloud environment using modified Firefly algorithm," *Int. J. of Inform. Technology*, vol. 17, no. 4, 2025, doi: 10.1007/s41870-024-01758-5.
- [11] F. Shaikh, S. Zeadally, and E. Exposito, "Enabling technologies for green internet of things," *IEEE Systems J.*, vol. 10, no. 3, pp. 990-1001, 2017, doi: 10.1109/JSYST.2015.2415194.

- [12] Z. Qingyuan, L. Jing, and Y. Jiang, "Optimization of energy consumption of green data centre in e-commerce," *Sustainable Computing*, vol. 23, pp. 103–110, 2021.
- [13] S. Ling, S. Jin, H. Wang, Z. Zhang, and Y. Feng, "Transportation infrastructure upgrading and green development efficiency: Empirical analysis with double machine learning method," *J. Environ. Manag.*, vol. 358, Art. No. 120922, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120922.
- [14] L. Zhang, L. Tao, F. Yang, Y. Bao, and C. Li, "Promoting green transportation through changing behaviour with low-carbon-travel function of digital maps," *Hum. Soc. Sci. Commun.*, vol. 11, no. 298, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1057/s41599-024-02737-8.
- [15] G. Hail, H. Ibrahim, and S. A. Mohd Yusof, "SaaS cloud computing as a means of green IT acceptance model: A theory of planned behaviour model at Malaysian public universities' context," *J. of Information System and Technology Management*, vol. 2, no. 4, pp. 1–17, 2017.
- [16] C. Nwachukwu, "Green Agriculture and Food Security, a Review," *Earth and Environmental Science*, vol. 1178, Art. no. 012005, pp. 1–8, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1178/1/012005.
- [17] A. Xu, N. Mohd, Y. Liu, and L. Sieng, "The Role of Digital Literacy in Agricultural Technology Adoption and Efficiency: A Systematic Literature Review," *Sustainability*, vol. 18, Art. no. 1138, pp. 1–25, 2026, doi: 10.3390/su1802113818.
- [18] A. Marwah, M. Gaur, and S. Sharma, "Green Technologies for Sustainability: A Robotics and Automation Perspective," in *Proc. IEEE Int. Conf. Advances in Computing Research on Science, Engineering and Technology (ACROSET)*, Indore, India, 2025, pp. 1–5, doi: 10.1109/ACROSET66531.2025.11280740.
- [19] S. Paul, A. Saha, M. Arefin, T. Bhuiyan, A. Biswas, A. Reza, N. Alotaibi, S. Alyami, and M. Moni, "A Comprehensive Review of Green Computing: Past, Present, and Future Research," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 87445–87494, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3304332.
- [20] E. B. Barbier, "Greening agriculture for rural development," *World Development*, vol. 191, Art. no. 106974, pp. 1–12, 2025, doi: 10.1016/j.worlddev.2025.106974.
- [21] M. Rohmah, "Literature Review: Green Computing for Environmental Sustainability," *Information Technology International J.*, vol. 1, no. 2, pp. 56–63, 2023, doi: 10.33005/itijv1i2.9.
- [22] R. Raj, A. Ghosh, A. Pal, S. Kundu, and S. Karmakar, "A Brief Review on Smart Farming Technologies for Precision Agriculture," in *Proc. 8th Int. Conf. on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)*, Kolkata, India, 2025, pp. 1–5, doi: 10.1109/IEMENTech65115.2025.10959551.
- [23] X. Zhou, T. Chen, and B. Zhang, "Research on the Impact of Digital Agriculture Development on Agricultural Green Total Factor Productivity," *Land*, vol. 12, Art. no. 195, pp. 1–20, 2023, doi: 10.3390/land12010195.
- [24] A. Rikeeth, "IoT in Agriculture 4.0: Farmer Adoption, Barriers, and the Path to Sustainable Farming," in *Proc. 2nd Int. Conf. Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE)*, Vellore, India, 2024, pp. 1–7, doi: 10.1109/ic-ETITE58242.2024.10493146.
- [25] A. Gaston, H. Ning, D. Sarwatt, J. Mohamed, A. Yusufu, F. Shi, S. Urenje, and J. Ding, "Sustainable AI: Emerging Trends, Impacts, and Future Challenges," *IEEE Trans. on Sustain. Comput.*, vol. 10, no. 6, pp. 1278–1291, 2025, doi: 10.1109/TSUSC.2025.3611272.
- [26] E. Alduweib, W. Alromema, and E. Hezzam, "Artificial Intelligence for Green Agriculture and Sustainable Resource Management: A Comprehensive Overview," in *Proc. 1st Int. Conf. Computational Intelligence Approaches and Applications (ICCIAA)*, Amman, Jordan, 2025, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICCIAA65327.2025.11013361.
- [27] S. Butt, M. Ahmadi, and M. Razavi, "Green Computing: Sustainable Design and Technologies," in *Proc. 5th Int. Conf. Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*, Sydney, Australia, 2020, pp. 1–7, doi: 10.1109/CITISIA50690.2020.9371781.
- [28] M. Rakhymberdina, M. Sadenova, N. Kulenova, U. Erkinovna, and J. Klemeš, "Smart Green Agriculture on Industrially Polluted Agricultural Landscapes," in *Proc. 6th Int. Conf. Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Bol and Split, Croatia, 2021, pp. 1–6, doi: 10.23919/SpliTech52315.2021.9566460.
- [29] M. Alsharif, A. Kelechi, A. Jahid, R. Kannadasan, M. Singla, J. Gupta, and Z. Geem, "A comprehensive survey of energy efficient computing to enable sustainable massive IoT networks," *Alexandria Eng. J.*, vol. 91, pp. 12–29, 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.01.067.
- [30] M. Wu, X. Wu, and Y. Lyu, "Efficiency Evaluation and Regional Disparities of Green Agricultural Product Supply Chains: A Case Study of Hebei Province, China," *Sustainability*, vol. 17, no. 10733, pp. 1–22, 2025, doi: 10.3390/su172310733.
- [31] X. Guo, J. Lv, and R. Zhu, "Digital Technology and Sustainable Agriculture: Evidence from Henan Province, China," *Sustainability*, vol. 18, no. 780, pp. 1–32, 2026, doi: 10.3390/su18020780.
- [32] A. Al-Zamil and A. Jilani, "Drivers and challenges of applying green computing for sustainable agriculture: A case study," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 28, no. 100264, pp. 1–8, 2023, doi: 10.1016/j.suscom.2018.07.008.
- [33] S. Kievtsov, "Application of green technologies in modern agriculture," *E3S Web of Conferences*, vol. 548, no. 01011, pp. 1–6, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202454801011.
- [34] J. Cheng, J. Dai, Y. Liu, and W. Zhao, "The impact of agricultural trade on green technological innovation in Chinas agricultural sector," *iScience*, vol. 27, no. 111101, pp. 1–20, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.111101.
- [35] J. Elavarasi, G. Amudha, S. Ananthi, T. Thilagam, B. Saratha, and R. Siva, "Green Data Centers: Advancing Sustainability in the Digital Era," in *Proc. 4th Int. Conf. Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)*, Kanyakumari, India, 2025, pp. 1817–1823, doi: 10.1109/ICTMIM65579.2025.10988439.
- [36] E. Elbasi, Y. Alzoubi, A. Topcu, and M. Nadeem, "Green AI for Smart Environmental Modelling and Software Management," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 204924–204953, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3637027.
- [37] S. Raja, H. Arya, D. Ramya, A. Sivakumar, K. Arigela, and N. Venu, "Development of Green Computing through Power Management in Wireless Networks using Machine Learning," in *Proc. Int. Conf. Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Lalitpur, Nepal, 2024, pp. 1911–1916, doi: 10.1109/ICICT60155.2024.10544499.
- [38] A. Gupta, A. Mishra, S. Sharma, and P. Bhardwaj, "Green Computing: Current Research Trends for Sustainability and Energy Efficiency," in *Proc. 12th Int. Conf. Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, Delhi, India, 2025, pp. 1–5, doi: 10.23919/INDIACom66777.2025.11115740.
- [39] T. Dang, K. Truong, S. Kazmi, and T. Nguyen, "Toward Zero-Touch Provisioning in Smart Green Agriculture Driven by Mobile Sensor Stations," in *Proc. Int. Conf. Information Networking (ICOIN)*, Chiang Mai, Thailand, 2025, pp. 464–469, doi: 10.1109/ICOIN63865.2025.10992906.
- [40] W. Wang, Z. Huang, Z. Fu, L. Jia, Q. Li, and J. Songa, "Impact of digital technology adoption on technological innovation in grain production," *J. of Innovation & Knowledge*, vol. 9, Art. no. 100520, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1016/j.jik.2024.100520.