



TECNOLOGÍAS INNOVADORAS PARA EL MANEJO DE FRUTALES, ÉNFASIS EN CADUCIFOLIOS, AGUACATE Y FRUTAS TROPICALES

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR THE MANAGEMENT OF FRUIT TREES, EMPHASIS ON DECIDUOUS FRUITS, AVOCADO AND TOPICALS

Javier Hernando Gracia Gil¹
Stephany Hurtado Clopatosky²
Edgar Eduardo Roa Guerrero³

(Recibido/received: 05-marzo-2024; aceptado/accepted: 06-mayo-2024)

RESUMEN: El presente estudio se centra en analizar las tecnologías innovadoras aplicadas al manejo de cultivos en la agricultura moderna, haciendo énfasis en frutales. El objetivo principal fue comprender cómo estas tecnologías mejoran la eficiencia, sostenibilidad y productividad de cultivos de frutales, enfocadas al aumento de la demanda y prácticas agrícolas sostenibles. La investigación se estructura en tres fases. En la primera fase, se revisan las bases de datos que documentan la evolución de las prácticas agrícolas convencionales. La segunda fase se centra en la literatura científica y técnica de la última década, destacando los avances recientes en tecnologías agrícolas. La tercera fase se centró en clasificar las investigaciones y desarrollos en curso, proporcionando una visión prospectiva de las tendencias emergentes. Se emplearon criterios de análisis multidisciplinarios que incluyen la eficiencia en el uso de recursos, la sostenibilidad ambiental, manejo del cultivo, manejo de la postcosecha y la capacidad de implementación a gran escala. Las tecnologías innovadoras identificadas incluyen la agricultura de precisión, el uso de sensores remotos, la inteligencia artificial aplicada al monitoreo de cultivos, y la implementación de sistemas de control para cultivos. Los resultados destacan que las tecnologías innovadoras en el manejo de cultivos pueden mejorar la eficiencia de la producción agrícola hasta un 30%, reducir la dependencia de pesticidas, fertilizantes y minimizar el impacto ambiental negativo. En conclusión, la adopción estratégica de estas tecnologías puede transformar la fruticultura, proporcionando soluciones clave para la seguridad alimentaria global y la sostenibilidad a largo plazo.

¹Decano de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca-Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-0432-9319> jhgracia@ucundinamarca.edu.co

²Docente de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca-Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-8162-5074> shurtadoc@ucundinamarca.edu.co

³Director del grupo de investigación GITEINCO Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca-Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-4594-7295> eeduardoroa@ucundinamarca.edu.co

PALABRAS CLAVE: Cultivos Agrícolas; Agricultura de Precisión; Inteligencia Artificial; Monitoreo de Cultivos; Sistemas de Riego Inteligente; Nanotecnología; Sistemas de información geográfica.

ABSTRACT: The present study focuses on analyzing innovative technologies applied to crop management in modern agriculture, with an emphasis on fruit trees. The main objective was to understand how these technologies enhance the efficiency, sustainability, and productivity of fruit crop cultivation, aimed at meeting increasing demand and promoting sustainable agricultural practices. The research is structured in three phases. In the first phase, databases documenting the evolution of conventional agricultural practices are reviewed. The second phase focuses on the scientific and technical literature of the last decade, highlighting recent advances in agricultural technologies. The third phase focused on classifying ongoing research and development, providing a forward-looking view of emerging trends. Multidisciplinary analysis criteria were used that include efficiency in the use of resources, environmental sustainability, crop management, post-harvest management and the capacity for large-scale implementation. Innovative technologies identified include precision agriculture, the use of remote sensors, artificial intelligence applied to crop monitoring, and the implementation of crop control systems. The results highlight that innovative technologies in crop management can improve the efficiency of agricultural production by up to 30%, reduce dependence on pesticides, fertilizers and minimize negative environmental impact. In conclusion, the strategic adoption of these technologies can transform agriculture, providing key solutions for global food security and long-term sustainability.

KEYWORDS: Agricultural crops; Precision farming; Artificial intelligence; Crop Monitoring; Intelligent Irrigation Systems; Nanotechnology; Geographic Information Systems.

INTRODUCCIÓN

Los cultivos en Colombia han experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas debido a la gran demanda en el mercado internacional (De Armas, Gómez, y Díaz, 2022). Lo anterior se logra en parte por la variedad de climas y geografía del país, donde se puede cultivar diversidad de frutas. No obstante, los cultivos son expuestos a condiciones climáticas extremas como sequías, inundaciones y deslizamientos de tierra que afectan la producción. Así mismo, las plagas limitan considerablemente la productividad de los cultivos, lo que conlleva a que los agricultores opten por utilizar agroquímicos que pueden afectar la calidad de los productos cosechados (Baker , Green, y Loker, 2020).

Según lo anterior actualmente, la producción y manejo de frutas presentan grandes desafíos debido a la susceptibilidad de las plantas a diversas enfermedades, plagas y condiciones ambientales adversas. Para hacer frente a estos desafíos y lograr un manejo eficiente de los cultivos en Colombia. El monitoreo constante y preciso a través de la adaptación y transferencia tecnológica se ha establecido como una base fundamental

(Ligiang, Shouvi, Leibo, Zhen, y Shaojun, 2011). El monitoreo como base del manejo de los cultivos permite a los agricultores obtener información actualizada y precisa sobre el estado de los cultivos, la recopilación sistemática de datos sobre diversos parámetros que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos, como la calidad del suelo, el estado hídrico, la presencia de enfermedades y plagas, y otros factores ambientales relevantes, lo que a su vez les facilita la toma de decisiones informadas y oportunas para el manejo de las plantaciones mejorando su calidad y disminuyendo las pérdidas (ICA, 2011).

Actualmente con la introducción del concepto de agricultura de precisión, el monitoreo de los cultivos se ha beneficiado enormemente. El uso de sensores remotos, imágenes satelitales, drones equipados con cámaras y sensores especiales, ha permitido capturar datos sobre la salud de las plantas, la distribución de la humedad en el suelo, el estrés hídrico y otros indicadores clave desde una perspectiva aérea, lo que permite una evaluación rápida y eficiente de grandes áreas de cultivo (Veeramanikandasamy, Sambath, Rajendran, y Sangeetha, 2014; Veys et al., 2019; Xu, Gu, y Tian, 2022).

Además, el monitoreo se ha fortalecido con el desarrollo de aplicaciones móviles y plataformas en línea, que permiten a los agricultores recopilar datos en tiempo real y acceder a información actualizada sobre el manejo de los cultivos (Georgiev, Beloev, Hristov, y Zahariev, 2022). Estas herramientas brindan la capacidad de registrar y analizar parámetros relevantes, como las condiciones climáticas, la aplicación de fertilizantes y pesticidas, y el seguimiento del crecimiento de las plantas (Xu, Gu, y Tian, 2022; Ligiang, Shouvi, Leibo, Zhen, y Shaojun, 2011).

Una vez cosechados, los productos agrícolas inician un proceso de degradación que involucra diversas reacciones bioquímicas, que modifican continuamente su composición. En este sentido es vital para asegurar la calidad y disminuir las pérdidas durante el periodo postcosecha, implementar tecnologías en esta área, dedicadas a desacelerar el proceso de degradación natural y lograr una vida útil más larga para el producto cosechado (Miranda et al., 2022; Intagri, 2023; Azam Ansari, 2023).

En esta investigación, se exploran diversas tecnologías innovadoras desde técnicas avanzadas de conservación, hasta enfoques de monitoreo inteligente que permiten la detección temprana de problemas fitosanitarios, tanto en la etapa de cultivo como en la postcosecha.

Para la búsqueda de información bibliográfica, se utilizaron diversas fuentes para recopilar los documentos bibliográficos. Entre ellas se incluyen en gran medida artículos de revistas científicas y páginas que producen dicha tecnología. Es importante destacar que la investigación se fundamentó en fuentes de información confiables, como: (1) IEEE Xplore; (2) ScienceDirect (3) Scopus y (4) Scielo. En la estrategia de búsqueda, se filtró información por tecnologías innovadoras para el monitoreo de cultivos y su postcosecha. Además, se trabajó con investigaciones no mayores a 10 años que estuviera en revistas indexadas y/o arbitradas.

En la primera fase, se revisan las bases de datos que documentan la evolución de las prácticas agrícolas convencionales. Se revisó una amplia gama de investigaciones, informes técnicos, manuales y datos estadísticos que detallan cómo han evolucionado y se han adaptado las técnicas agrícolas con el paso del tiempo. Además, se consideran factores como la adopción de nuevas tecnologías, cambios en los métodos de cultivo, el impacto de políticas agrícolas, y la influencia de factores socioeconómicos y ambientales. Este análisis detallado permite comprender en profundidad las tendencias y patrones que han caracterizado la evolución de la agricultura convencional, proporcionando un contexto sólido para las fases posteriores del estudio.

La segunda fase se centra en la literatura científica y técnica de la última década, destacando los avances recientes en tecnologías agrícolas. Esto incluye la revisión de artículos de revistas científicas de alto impacto, tesis, actas de conferencias, y patentes que han surgido en este periodo. Se investigaron innovaciones en áreas como la agricultura de precisión, biotecnología, sistemas de riego inteligentes, drones y sensores para monitoreo de cultivos, así como desarrollos en maquinaria agrícola avanzada.

Además, se examinaron estudios sobre el uso de inteligencia artificial en la gestión agrícola, métodos mejorados de control de plagas y enfermedades, y prácticas sostenibles que aumentan la eficiencia y reducen el impacto ambiental. Este análisis exhaustivo permite identificar las tendencias actuales y las tecnologías emergentes que están redefiniendo la agricultura moderna, proporcionando una base sólida para la evaluación y clasificación de los desarrollos en curso en la fase siguiente del estudio.

El objetivo de la tercera fase fue clasificar las investigaciones y desarrollos en curso para ofrecer una perspectiva futura de las nuevas tecnologías aplicadas en el campo. Este proceso comenzó con la recopilación de datos de una variedad de fuentes, incluidos informes técnicos, tesis, documentos de conferencias internacionales y artículos de investigación recientes. Además, se incluyeron proyectos de desarrollo realizados por empresas agroindustriales, instituciones gubernamentales y organizaciones no gubernamentales dedicadas a la innovación agrícola.

Después de recopilar información, se realizó un análisis cuantitativo y cualitativo para evaluar la relevancia y el posible impacto de cada investigación y desarrollo. El grado de innovación tecnológica, la sostenibilidad ambiental, la viabilidad económica y la capacidad para aumentar la eficiencia y la productividad agrícola fueron los criterios de evaluación. Este análisis ayudó a identificar no solo los avances más prometedores, sino también las áreas donde se está llevando a cabo más investigación. La clasificación resultante se organizó en varias categorías clave, como agricultura de precisión, biotecnología avanzada, tecnologías de riego inteligente, maquinaria agrícola automatizada, y métodos de cultivo resilientes al cambio climático. Dentro de cada categoría, se destacó el aporte a los procesos agrícolas para el manejo de cultivos de frutales.

Finalmente, al proporcionar una visión prospectiva, se identificaron las tendencias emergentes que están configurando el futuro de la agricultura, como es el caso de nanotecnología para la generación de nanotubos de carbono que permiten mantener la humedad de los suelos. Además, estas tendencias incluyen el uso creciente de la inteligencia artificial, el aprendizaje automático en la gestión de cultivos, y la implementación de redes de sensores para el monitoreo en tiempo real de las condiciones del suelo y los cultivos. Este enfoque prospectivo no solo ayuda a apropiarse y adaptar tecnología para el mejoramiento de las buenas prácticas agrícolas, sino que también orienta a los investigadores para fomentar una agricultura más innovadora y sostenible. Para la organización de la información, los artículos encontrados en los repositorios se organizaron de acuerdo con la siguiente estructura: Qué se realizó, Quién lo realizó, Cómo se realizó, resultados generales de la investigación y referencia bibliográfica.

DESARROLLO

En la presente investigación se describen las tecnologías innovadoras utilizadas para el manejo eficiente de cultivos, aplicadas en el monitoreo de las variables asociadas al proceso de producción de frutas como es el caso de: (1) Sensores remotos y teledetección; (2) sistemas de riego inteligente; (3) tecnologías de comunicación y plataformas en línea; (4) técnicas eficientes en el manejo de frutas en postcosecha para su conservación.

Sensores remotos y teledetección

El uso de imágenes satelitales, drones y sensores remotos ha permitido obtener información detallada sobre el estado de los cultivos. Estas tecnologías proporcionan datos sobre el índice de vegetación, la temperatura de la superficie del cultivo y otros parámetros, lo que permite detectar tempranamente enfermedades, estrés hídrico y otros problemas (Zhang y Zhu, 2023).

La teledetección también ayuda en la planificación del riego y la gestión del suelo. Así como, para monitorear y evaluar la cobertura vegetal en las plantaciones. Esto es útil para medir el crecimiento de las plantas, evaluar la eficiencia de la producción y detectar cambios en la vegetación que podrían indicar problemas de salud o estrés (Zhang y Zhu, 2023). En la Figura 1, se presentan algunas plataformas utilizadas para la teledetección en cultivos:



Figura 1. UAV plataformas: (a) Multirotor UAV, (b) Ala Fija UAV, (c) helicóptero no tripulado, (d) VTOL UAV. Tomado de (Zhang y Zhu, 2023).

El avance de las tecnologías ha permitido el desarrollo de sensores remotos y aplicaciones de teledetección, que a su vez han demostrado ser herramientas valiosas para el monitoreo de cultivos. Estas tecnologías utilizan imágenes satelitales, drones y dispositivos para recopilar datos sobre el cultivo desde una perspectiva aérea (Korotcenkov et al., 2023; Zhang y Zhu, 2023; Poenaru et al., 2015).

De forma similar, en otra investigación se demostró que los sensores remotos pueden capturar imágenes multiespectrales, que proporcionan información sobre el estado de las plantas. Esta técnica realiza un procesamiento de las imágenes para eliminar ruido que impide realizar un buen análisis. Posteriormente, aplican técnicas de aprendizaje automático supervisado y no supervisado para realizar la identificación de parámetros que afectan el crecimiento de los cultivos. La aplicación de la metodología arrojó resultados significativos para la clasificación en diferentes frutas y hortalizas, el modelo de predicción de clasificación presentó una precisión de clasificación general promedio de 89.4% (Lu, Huang, y Lu, 2017).

Otros autores han empleado las imágenes para evaluar la salud de las plantas, identificar áreas con estrés hídrico o deficiencias nutricionales, detectar enfermedades y plagas antes de que sean visibles a simple vista (Veys et al., 2019). Los autores utilizaron métodos de aprendizaje automático como las máquinas de soporte vectorial y técnicas de reconstrucción en 3D para detectar la infección por manchas foliares ligeras con un 92 % de precisión (Veys et al., 2019). Se muestra la identificación de áreas con estrés hídrico sobre hojas (Figura 2):

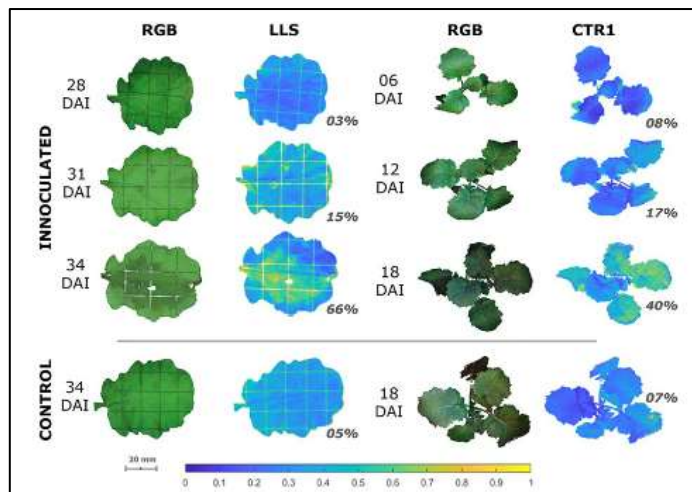


Figura 2. Identificación del estrés hídrico mediante imágenes hiperespectrales (Veys et al., 2019).

Además, en un estudio realizado por Liu y colaboradores (2022) se logró proporcionar datos de sensores sobre la calidad del suelo y su contenido de humedad. Esto es especialmente útil para el cultivo de Gulupa, ya que requiere condiciones de suelo bien drenado y niveles

adecuados de humedad. La información sobre el suelo obtenida a través de la teledetección ayuda a optimizar la gestión del riego y la fertilización.

No obstante, el monitoreo de cultivos también se ha realizado a través de la teledetección por radar, esta es una tecnología que utiliza ondas electromagnéticas en el rango de las microondas para adquirir información sobre la superficie terrestre y sus características. Esta tecnología se ha vuelto cada vez más relevante en la vigilancia agrícola debido a su capacidad para proporcionar datos valiosos sobre los cultivos y las condiciones del terreno. Algunas formas en las que la teledetección por radar se utiliza en la vigilancia agrícola son: (1) Monitoreo de cultivos; (2) Detección temprana de estrés de las plantas; (3) Planificación de riego; (4) Cartografía de suelos; (5) Control de inundaciones; (6) Respuesta a desastres naturales. La teledetección por radar puede ser útil para evaluar los daños causados por eventos climáticos extremos, como sequías, inundaciones o tormentas. Esto facilita una respuesta rápida y eficiente en la recuperación de las áreas afectadas (Poenaru et al., 2015). Además, existe un sistema de teledetección por radar para monitoreo agrícola a grandes distancias que permite identificar terrenos con problemas de salinidad (Figura 3).

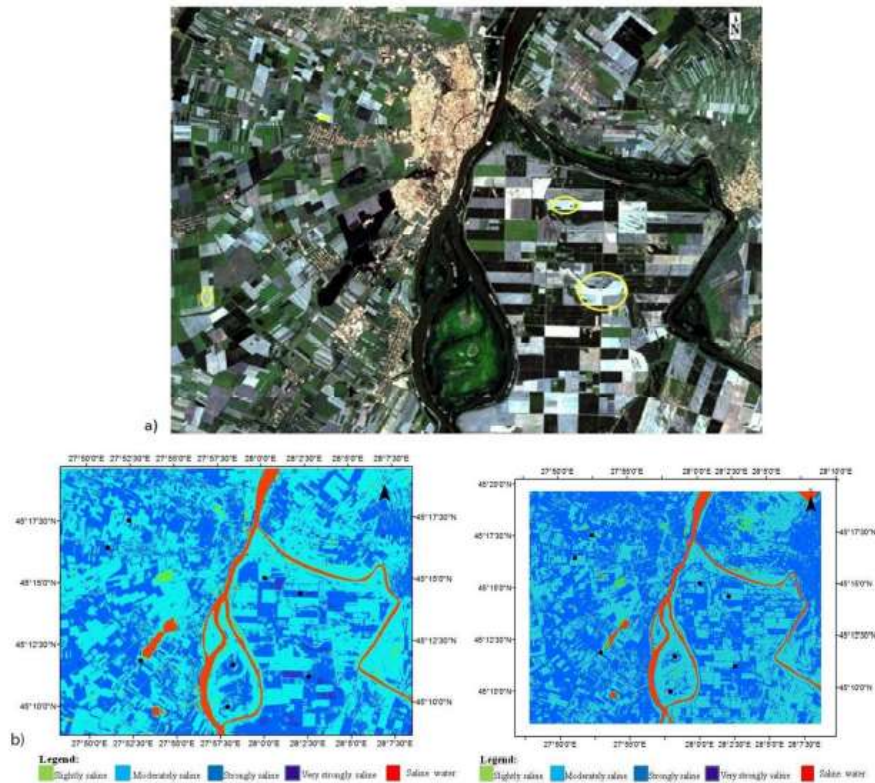


Figura 3. (a) Composición de colores falsos de los datos de Landsat adquiridos; (b) Mapa del índice de salinidad derivado de datos de Landsat adquiridos el 16/07/2011 (izquierda) el 16/07/2011 (R: TM1; G: TM2, B: TM3): detección y 26/07/2003 (derecha) de suelo afectado por sal representado con color blanco-azul. Tomado de (Poenaru et al., 2015).

Los resultados encontrados con esta técnica demostraron ser altamente beneficiosos en la identificación de suelos que han sido afectados por la salinidad, indicando que el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) proporciona

estimaciones científicamente más precisas acerca del estado de los cultivos, al mismo tiempo que elimina la influencia de los suelos afectados por la salinidad y la variabilidad anual en el uso de la tierra cultivable, convirtiéndose así en una herramienta fundamental en teledetección para evaluar la salud y densidad de la vegetación. Este índice se calcula utilizando las reflectancias en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano mediante la fórmula $(NIR - Red) / (NIR + Red)$, donde NIR representa la reflectancia en el infrarrojo cercano y Red la reflectancia en el espectro rojo. Los valores del NDVI oscilan entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que valores negativos o cercanos a 0 sugieren áreas sin vegetación o con vegetación escasa. El NDVI se utiliza ampliamente en diferentes áreas de la agricultura para evaluar el estado de los cultivos, para monitorear cambios en los ecosistemas y para detectar áreas de deforestación, sequías e incendios forestales como se muestra en (Rouse et al., 1973).

Además del NDVI, existen otros índices de vegetación que se emplean para mejorar la precisión en condiciones específicas. El Índice de Vegetación Mejorado (EVI), por ejemplo, se utiliza en áreas con densidades vegetales muy altas, ya que reduce las distorsiones causadas por el efecto del suelo y la atmósfera. Otro índice es el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), que se aplica en áreas donde el suelo tiene una influencia significativa en la reflectancia. Estos índices complementan el NDVI en situaciones donde se necesita una mayor exactitud y sensibilidad a diferentes factores ambientales (Huete et al., 2002). La combinación de estos índices proporciona una visión más completa y precisa de la condición y dinámica de la vegetación en diversos contextos. Este descubrimiento tiene implicaciones significativas para la agricultura y la gestión de los cultivos. Al utilizar el NDVI para evaluar la salud de los cultivos, se pueden obtener mediciones más confiables y consistentes, ya que esta técnica tiene en cuenta las características específicas de la vegetación y minimiza la interferencia de factores externos, como la salinidad del suelo. Esto proporciona a los agricultores y a los encargados de la gestión agrícola una visión más precisa de la condición de los cultivos y les ayuda a tomar decisiones informadas en cuanto al manejo y el riego.

El monitoreo satelital utiliza imágenes y datos recopilados por satélites para realizar un seguimiento y análisis de las condiciones de los cultivos y las áreas agrícolas. Esta técnica permite obtener información valiosa sobre el crecimiento de los cultivos, la salud de las plantas y otros factores relacionados con la producción agrícola (Oon et al., 2023). Algunas de las aplicaciones en las que se utiliza el monitoreo satelital de cultivos son: (1) Seguimiento del crecimiento de plantas; (2) Detección temprana de estrés; (3) Estimación de rendimiento; (4) Optimización del riego; (5) Monitoreo de cambios en el uso de la tierra; (6) Alertas tempranas de eventos climáticos.

Se presenta un sistema de teledetección por satélite de imágenes multiespectrales Sentinel-2 para la identificación de diferentes frutales peras, manzanas, duraznos y otras coberturas (Figura 4.), la técnica, sugiere el mejoramiento de la información suministrada para más precisión en los resultados. Sin embargo, es una alternativa importante para el

monitoreo de frutales de gran extensión, cuando se dispone de imágenes de resolución de media a alta (Zhou et al., 2022).

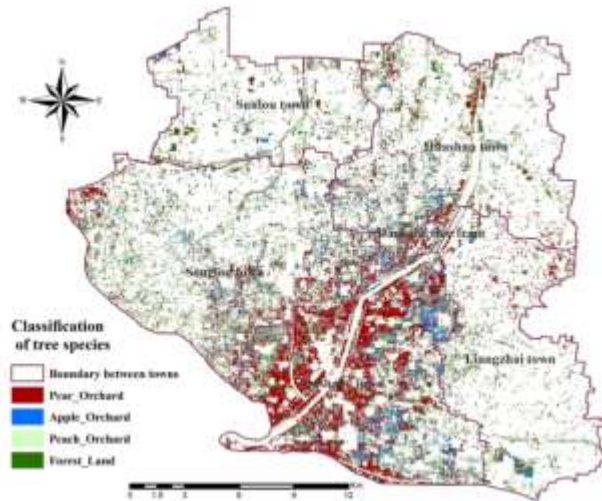


Figura 4. Resultados obtenidos de la clasificación mediante teledetección de áreas destinadas a la plantación de árboles frutales en la ciudad de Feng, provincia de Jiangsu-China. En ella se observa la distribución espacial de huertos de peras, manzanas y duraznos, así, como de terrenos forestales. Este mapa fue generado utilizando los programas ENVI 5.3 y ArcMap 10.7 de ESRI Co., con datos de imágenes satelitales. Tomado de Zhou et al., (2022).

Sistemas de riego inteligente

Se han desarrollado sistemas de riego precisos y basados en sensores para cultivos. Estos sistemas monitorean continuamente la humedad del suelo y ajustan la cantidad de agua suministrada en función de las necesidades de las plantas. Esto ayuda a evitar el riego excesivo o insuficiente, optimizando el uso del agua y mejorando la eficiencia del riego (Heilongjiang Huida Technology, 2023). También se describe un sistema de riego automatizado que utiliza redes de sensores, sistemas de transformación de energías para riego inteligente (Figura 5).

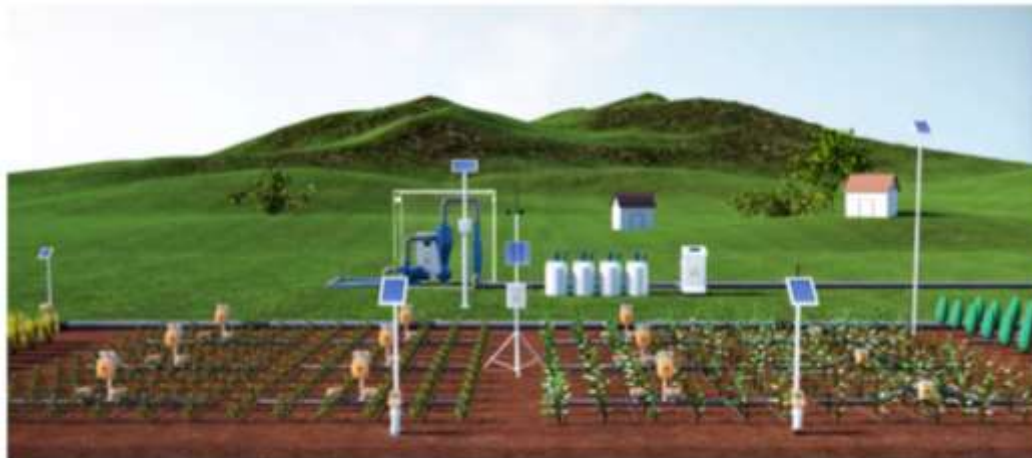


Figura 5. Sistema de riego inteligente. Tomado de (Heilongjiang Huida Technology, 2023)

Los sistemas de riego inteligentes son tecnologías innovadoras que han demostrado ser muy beneficiosas en el área de agricultura de precisión. Estos sistemas utilizan sensores y dispositivos de control para optimizar la cantidad y el momento del riego, mejorando así la eficiencia del uso del agua y maximizando el rendimiento de los cultivos. Algunas de las tecnologías de sistemas de riego inteligentes utilizadas en los cultivos incluyen:

Los sensores de humedad del suelo permiten medir de manera precisa la humedad en el suelo en tiempo real. Estos sensores se instalan en diferentes puntos de la parcela y envían información a un sistema de control centralizado. Con base en los datos recibidos, el sistema de riego inteligente ajusta automáticamente la frecuencia y la duración del riego para mantener el nivel óptimo de humedad en el suelo para cultivos.

Entre los sensores más utilizados están los nanotubos de carbono, el grafeno, los semiconductores y los polímeros por su precisión en la medición de la humedad (Korotcenkov et al., 2023). Los resultados obtenidos con la investigación mostraron que los sensores de humedad requieren elementos con baja resistividad como la plata y el cobre. Sin embargo, la estabilidad de las partículas juega un papel crucial para realizar la identificación de la humedad. La revisión menciona que diversos tipos de sensores de humedad pueden ser desarrollados utilizando papel como base. Algunos tipos de sensores mencionados incluyen: (1) Sensores capacitivos; (2) Sensores resistivos; (3) Sensores de impedancia. También sugiere que diferentes materiales sensibles a la humedad, como materiales a base de carbono (como tintas conductoras o grafito), materiales de estado sólido (como óxidos metálicos) y polímeros, pueden integrarse con el papel para crear sensores sensibles a la humedad.

Por otra parte, los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) están revolucionando la agricultura. El IoT es una infraestructura de red que facilita la interconexión de numerosos dispositivos inteligentes, caracterizándose comúnmente por la integración y comunicación de componentes. La información generada por estos dispositivos se transfiere a un servidor

IoT designado o a un depósito de datos centralizado, posibilitando el acceso a dicha información por parte de individuos autorizados (Yamini et al., 2024).

Especialmente en el cultivo de Passifloras, al proporcionar herramientas avanzadas para monitorear y gestionar las condiciones de crecimiento en tiempo real. Estos sistemas consisten en una red de sensores conectados que recopilan datos sobre diversas variables ambientales, como la humedad del suelo, la temperatura, la luminosidad y los niveles de nutrientes. La integración de IoT permite a los agricultores recibir alertas y tomar decisiones informadas para optimizar el riego, la fertilización y otros aspectos del manejo de cultivos, lo cual es crucial para mejorar la productividad y la calidad de las Passifloras (Dhanaraju et al., 2022).

Además, el uso de IoT en el cultivo de Passifloras facilita la implementación de prácticas agrícolas sostenibles. Por ejemplo, los sistemas de riego inteligentes basados en IoT pueden ajustar automáticamente la cantidad de agua suministrada según las necesidades específicas de las plantas, reduciendo el desperdicio de agua y promoviendo la eficiencia hídrica. Asimismo, el monitoreo continuo de las condiciones del suelo y del microclima puede ayudar a prevenir enfermedades y plagas al permitir la detección temprana de condiciones adversas. Esta capacidad de gestión precisa y adaptativa es esencial para mantener la salud de las plantas y maximizar el rendimiento de los cultivos de Passifloras en un contexto de cambio climático y recursos limitados (Rajak et al., 2023).

De acuerdo con, Ospina-Alarcón y Saba (2022) se evidencia la aplicación de sistemas IoT para el monitoreo de variables climatológicas, esta técnica ha venido teniendo alto impacto debido a su precisión en la captura de datos relacionados con las características de los cultivos. Así mismo, se ha venido implementando en la agricultura urbana mostrando ser una alternativa versátil para el diseño e implementación de sistemas personalizados partiendo de las características agroclimáticas de cada cultivo. Se presenta un sistema IoT para el monitoreo de cultivos en agricultura urbana (Figura 6)

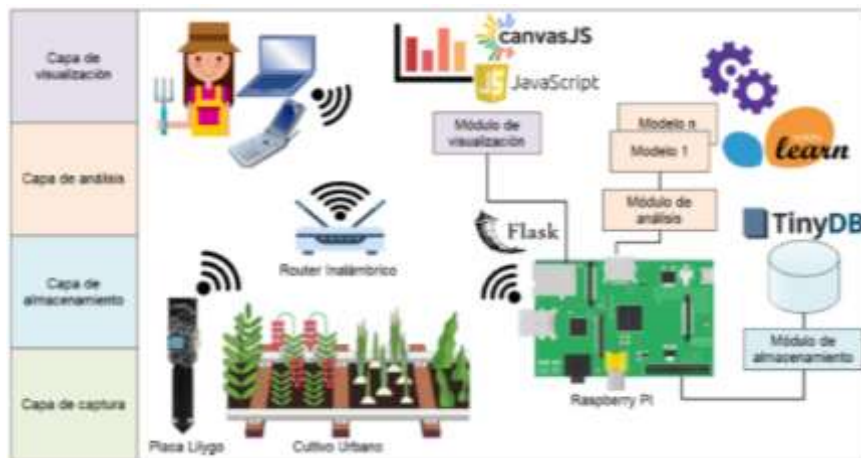


Figura 6. Vista de implementación de la arquitectura IoT. Tomada de (Chanchí-Golondrino, Ospina-Alarcón, & Saba, 2022).

Estos sistemas son muy útiles para los agricultores debido a su capacidad para realizar la gestión de información en tiempo real y a través de la visualización de datos a distancia, así como los análisis estadísticos que se realizan a partir de los datos recolectados de los cultivos permite tomar decisiones inmediatas para preservar las condiciones de los cultivos siendo una alternativa para disminuir los costos de producción.

Del mismo modo, otros investigadores utilizan algoritmos y modelos matemáticos para determinar la cantidad de agua requerida por las plantas en función de factores como las condiciones climáticas, la etapa de crecimiento de las plantas y las necesidades hídricas específicas de la fruta (Hassan et al., 2021). El sistema de riego inteligente ajusta automáticamente el programa de riego en función de estos datos, evitando el riego excesivo y minimizando el desperdicio de agua. En (Bwambale , Abagale, y Anornu, 2023), han desarrollado un sistema de control predictivo para el riego con precisión, el sistema está compuesto por el sistema equivalente al cultivo, los sensores que permiten la recolección de los datos, el sistema de control y los actuadores que permiten realizar el riego por demanda.

Los sistemas de riego inteligente por demanda son tecnologías avanzadas que buscan mejorar significativamente los procesos de producción agrícola al optimizar el uso del agua y maximizar la eficiencia en la irrigación, algunas de las aplicaciones son: (1) Water Meter Calculator; (2) IrrigatePump; (3) IrrigateCost; (4) CropWater; (5) Irrigation Calculator. Estos sistemas utilizan datos en tiempo real y tecnologías de automatización para aplicar agua de manera precisa y oportuna, basándose en las necesidades reales de las plantas y las condiciones climáticas. Resaltando la importancia de la optimización de recursos y de sostenibilidad ambiental.

Una técnica relevante encontrada en la literatura que permite suministrar de forma adecuada los recursos a los cultivos, son los sistemas de riego por goteo y microaspersión que se integran con los sistemas de riego inteligentes. Estos sistemas suministran agua directamente a las raíces de las plantas, reduciendo las pérdidas por evaporación y lixiviación. Además, permiten una distribución uniforme del agua, asegurando que cada planta reciba la cantidad necesaria para un crecimiento óptimo (Jain, 2023). A menudo incluyen características de control y monitoreo remoto permitiendo a los agricultores supervisar y controlar los sistemas de riego desde una ubicación centralizada a través de dispositivos móviles o computadoras, esto a su vez mejora la eficiencia operativa y reduce la necesidad de una presencia física constante en el campo. Un sistema implementado consta de un microcontrolador, sensores, un servidor web y actuadores (Figura 7).

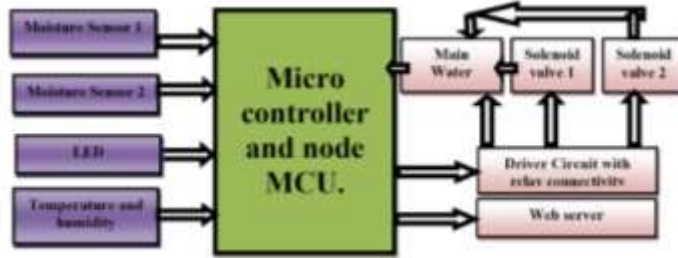


Figura 7. Diagrama esquemático del sistema de control por goteo. Tomado de (Jain, 2023)

La investigación realizada identifica una arquitectura innovadora para un sistema de riego por goteo que aprovecha el Internet de las cosas (IoT) para su control y monitoreo a través de una aplicación web o una aplicación para dispositivos Android y conexión a la nube. Los resultados obtenidos de la integración de sensores, con sistemas de control y conexión en la nube resultan interesantes debido a su velocidad de procesamiento, siendo óptimo para el monitoreo de los sistemas de riego por goteo.

Diversos estudios al respecto han sido reportados, entre los más destacados se identifican la revisión realizada por los autores (Singh y Saikia, 2016) para el cual se desarrolla el concepto de la Agricultura de Ambiente Controlado (CEA, por sus siglas en inglés), que abarca la implementación de tecnología en el sistema de riego, la iluminación y la ventilación. El estudio presenta el diseño e implementación de un sistema de riego automatizado caracterizado por su economía y facilidad de uso.

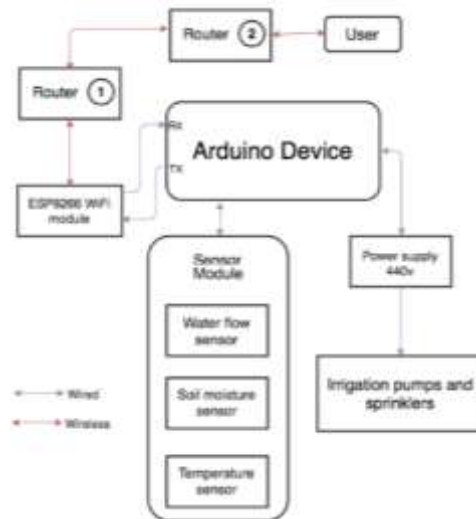


Figura 8. Estructura de riego inteligente usando ESP8266. Tomado de (Singh y Saikia, 2016).

La Figura 8, muestra las variables involucradas en el monitoreo como la humedad, la temperatura y la cantidad de agua requerida por los cultivos, los sensores utilizados son de flujo de agua, de temperatura y de humedad del suelo. Los datos son recopilados en tiempo

real permitiendo al usuario controlar las bombas de riego y los aspersores de forma remota mediante un sitio web y el microcontrolador ESP8266 bajo la tecnología wifi.

Otro caso reportado en relación con la utilización de la tecnología en monitoreo de cultivos es el presentado en (Georgiev et al., 2022) en el cual se desarrolla el concepto de Agricultura Inteligente asumido como uno de los campos de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas inglés) encargado de la medición de variables en entornos agrícolas y su recopilación en servidores centralizados con el objetivo final de tomar las decisiones y acciones automatizadas en función de los valores recibidos, para cubrir estos requerimientos fue necesario desarrollar sistemas (nodos) equipados con sensores ubicados en los cultivos, procesar los datos adquiridos y transmitirlos desde las diversas áreas a los servidores remotos mediante un protocolo de red y un medio de transmisión apropiado, para terminar, el procesamiento de los datos requiere la creación de una herramienta de software para el seguimiento de los parámetros y la toma de decisiones (Figura 9).

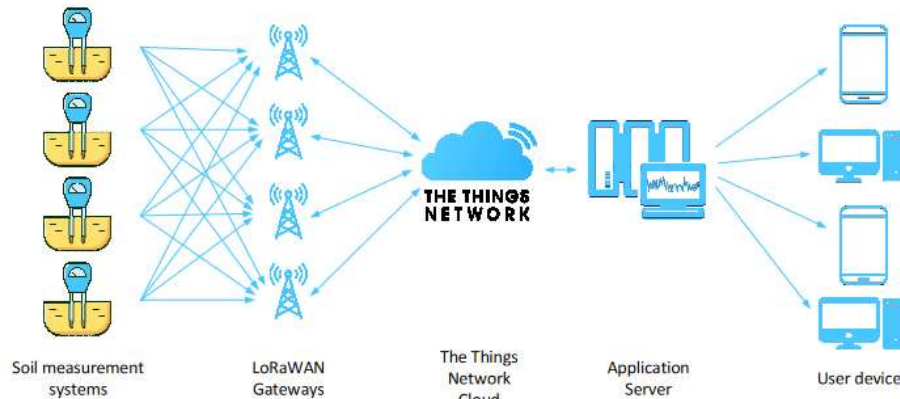


Fig 9. Modelo del método de comunicación entre dispositivos. Tomada de (Georgiev et al., 2022).

El estudio reporta el desarrollo de una plataforma en base al sensor Soil NPK, una interfaz web de consulta y visualización y un sistema analizador en MATLAB. Para transmitir los datos de los sensores utiliza un microcontrolador ESP32 junto a un transceptor TTGO LoRa32 SX1276 OLED con servidores centralizados bajo el dispositivo RaspBerry Pi con el software controlador iC880a-based, el sistema permite el seguimiento de las variables con precisión a distancia para la toma de decisiones del agricultor.

En la misma línea de desarrollo, otro estudio destacable es el presentado por (Veeramanikandasamy et al., 2014), en este estudio se desarrolló un sistema automatizado para monitorear de manera efectiva de los recursos hídricos y el crecimiento de los cultivos utilizando las tecnologías de comunicaciones GSM y Zigbee. Su objetivo principal es mejorar la eficiencia del uso del agua monitoreando sistemas de riego por goteo utilizando tres (3) sensores, uno de humedad del suelo, uno de humedad relativa del ambiente y uno de temperatura (Figura 10).

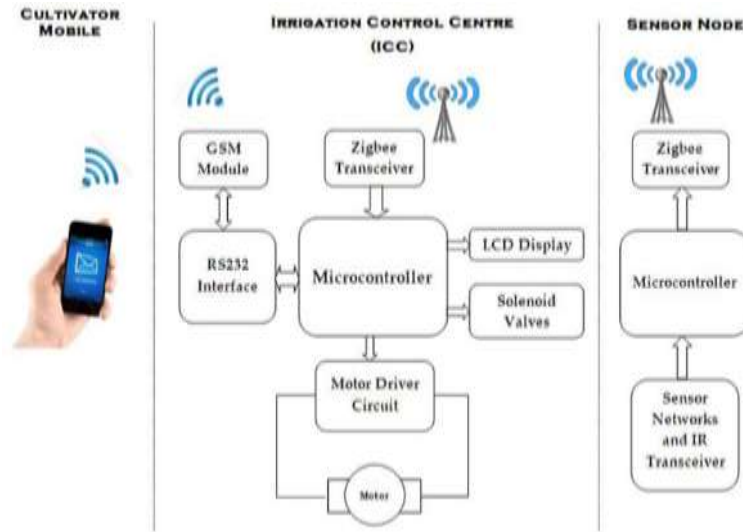


Figura 10. Monitoreo remoto y sistema de riego de circuito cerrado.

Los datos de los sensores son gestionados por el microcontrolador y transmitidas al centro de control de riego a través de la comunicación inalámbrica Zigbee, el crecimiento del cultivo se monitorea usando un sensor de infrarrojo. El sistema permite por medio de la tecnología GSM consultar y controlar remotamente y en tiempo real los datos procesados y equipos involucrados, incrementando la eficiencia en la producción y disminuyendo la cantidad de pesticidas en cultivos.

Aplicaciones Móviles y plataformas en línea

Las aplicaciones móviles y las plataformas en línea son tecnologías innovadoras que han revolucionado la forma en que los agricultores monitorean los cultivos. Estas herramientas ofrecen una serie de beneficios y funcionalidades, incluyendo el Monitoreo y registro de datos, permitiendo a los agricultores registrar y recopilar datos sobre diversos aspectos del cultivo, como el crecimiento de las plantas, las prácticas de riego, la fertilización, el control de plagas y enfermedades, entre otros. Estos registros permiten un seguimiento preciso de la evolución de los cultivos y proporcionan una base de datos valiosa para el análisis y la toma de decisiones. Así mismo, proporcionan acceso a una amplia gama de información y conocimientos especializados sobre el cultivo. Esto puede incluir tutoriales, artículos, investigaciones científicas, mejores prácticas y consejos de expertos. Estas fuentes de información permiten a los agricultores mantenerse actualizados sobre las últimas tendencias y avances para monitoreo.

En una investigación realizada en 2011, se desarrolló un sistema de monitoreo de cultivos compuesto por dos interfaces, la primera, una plataforma de hardware compuesta por un sistema de alimentación, una unidad de procesamiento de datos, un módulo de comunicación, un sistema de sensores y uno de centralización y almacenamiento de datos. La segunda, una plataforma pública de gestión de datos y una herramienta de software encargada de presentar la información a los usuarios, permitiendo supervisar y controlar

los cultivos en tiempo real (Ligiang et al., 2011). En la Figura 11, se describe la configuración de cada uno de los componentes mencionados.



Figura 11. Componentes sistema de monitoreo de cultivos. Tomado de (Ligiang et al., 2011)

Los nodos pertenecen al sistema de sensores (sensores y microcontroladores) y se encargan de la recolección y adecuación de los datos, los sistemas de comunicación permiten enviar de forma inalámbrica la información de todos los sensores a la plataforma centralizada de gestión de datos (Gateway). Para que la comunicación esté disponible de forma remota se debe llevar la información del Gateway local hasta una red de acceso público (Cloud). El monitoreo de las variables requiere desarrollar una aplicación de software (Interfaz) encargada de la gestión en tiempo real de la información para monitoreo, análisis y muestra de manera visual de las variables involucrados en los cultivos.

Otra aplicación desarrollada para el monitoreo de cultivos es Farmapp, es una plataforma avanzada diseñada para la gestión y monitoreo de cultivos agrícolas utilizando tecnologías innovadoras como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA). Esta aplicación permite a los agricultores supervisar en tiempo real las condiciones de sus campos a través de una red de sensores que recopilan datos sobre variables críticas como la humedad del suelo, la temperatura, la luz solar y los niveles de nutrientes. La información recopilada se transmite a la plataforma Farmapp, donde se analiza y se presenta de manera accesible para facilitar la toma de decisiones informadas.

Una de las características destacadas de Farmapp es su capacidad para proporcionar recomendaciones personalizadas basadas en los datos recopilados. La aplicación puede sugerir ajustes en el riego, la fertilización y otras prácticas agrícolas para optimizar el crecimiento y la salud de los cultivos. Además, Farmapp integra funciones de alerta temprana que notifican a los agricultores sobre posibles problemas, como la aparición de plagas o enfermedades, permitiéndoles tomar medidas preventivas rápidamente. Con estas funcionalidades, Farmapp ayuda a los agricultores a mejorar la eficiencia de sus operaciones, reducir costos y aumentar la productividad, contribuyendo así a una agricultura más sostenible y rentable.

Así mismo, se describe la aplicación Kanpo diseñada para optimizar la gestión agrícola mediante el uso de tecnología avanzada. Esta plataforma integra el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA) para proporcionar a los agricultores una herramienta

completa para el monitoreo y la gestión de sus cultivos. Kanpo permite a los usuarios recopilar datos en tiempo real sobre diversas variables ambientales, como la humedad del suelo, la temperatura, la radiación solar y los niveles de nutrientes, a través de una red de sensores distribuidos en el campo. Estos datos se envían a la plataforma, donde se analizan y se presentan de manera intuitiva, facilitando la toma de decisiones informadas y precisas.

Una de las principales ventajas de Kanpo es su capacidad para ofrecer recomendaciones personalizadas y alertas tempranas. La aplicación utiliza algoritmos de inteligencia artificial para analizar los datos recopilados y proporcionar sugerencias específicas sobre riego, fertilización y control de plagas, adaptadas a las condiciones únicas de cada cultivo y parcela. Además, Kanpo notifica a los agricultores sobre posibles problemas, como enfermedades emergentes o estrés hídrico, permitiéndoles actuar rápidamente para mitigar los riesgos. Con estas funcionalidades, Kanpo no solo mejora la eficiencia y la productividad agrícola, sino que también promueve prácticas agrícolas sostenibles, ayudando a los agricultores a optimizar el uso de recursos y reducir su impacto ambiental.

De las interfaces y componentes identificados, en esta sección del documento, el monitoreo de cultivos toma importancia en el reconocimiento de las tecnologías de comunicación inalámbrica que han marcado una diferencia en la resolución de problemas importantes en este proceso, es así como en los últimos años tecnologías como LoRa, Bluetooth, Zigbee, etc., han sido adaptadas y aplicadas en soluciones de monitoreo y control de variables edafoclimáticas en cultivos agrícolas (Xu, Gu, & Tian, 2022).

Manejo postcosecha de frutas

En la presente investigación se destaca la técnica de Atmósfera Controlada como un método de conservación, esta técnica se basa en la manipulación de los niveles de gases en el entorno de almacenamiento para prolongar la vida útil de los alimentos de manera natural, sin la necesidad de recurrir a productos químicos. Esta técnica se enfoca en aumentar los niveles de dióxido de carbono (CO₂) y reducir los niveles de oxígeno (O₂) en la atmósfera circundante, creando condiciones específicas que favorecen la preservación del producto (De la Vega et al., 2017). Por otra parte, la atmósfera modificada consiste en la reducción de residuos químicos en los alimentos. Esta metodología implica la eliminación del aire del interior del envase y su reemplazo por una mezcla de gases específica, generalmente compuesta por dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂). En la Figura 12, se presenta una cámara de atmósfera controlada utilizada para la conservación de frutas por largos periodos de tiempo.

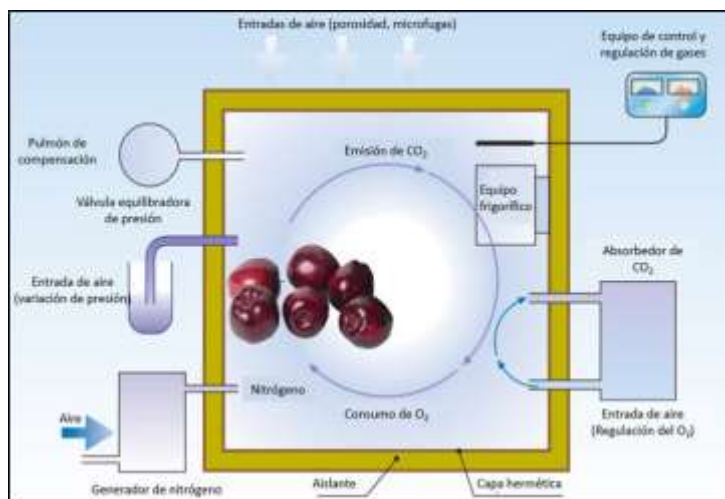


Figura 12. Cámara de atmósfera controlada. Tomado de (Intagri, 2023)

Las tecnologías de atmósfera controlada y modificada han demostrado ser cruciales en la extensión de la vida útil de las frutas. Al reducir la cantidad de oxígeno disponible, se limita la proliferación de microorganismos y la degradación enzimática de los alimentos. Esto contribuye a la prevención de la descomposición y la pérdida de nutrientes en los procesos de postcosecha de las frutas.

Los tratamientos postcosecha, como la aplicación de ceras y recubrimientos comestibles, han avanzado significativamente. Estos recubrimientos protectores no solo mejoran la apariencia de las frutas, sino que también reducen la pérdida de agua y minimizan la proliferación microbiana. Además, la implementación de técnicas como el lavado con soluciones antimicrobianas y el uso de radiación ultravioleta contribuye a la desinfección y alargamiento de la vida útil. De acuerdo con Miranda et. al. (2022) desarrollaron una nano-emulsión de cera mediante el uso de un procesamiento de alta presión para aplicar como un recubrimiento comestible para frutas y verduras como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. (a) Detalle de la apariencia de la emulsión de cera de carnauba para nano emulsión (CWN). (b) apariencia lechosa para la cera de carnauba convencional (CWM).

Los resultados mostraron que los tomates que fueron expuestos al tratamiento de nano-emulsión de cera presentaron los índices de firmeza y color más altos que los tomates a los que no fueron expuestos al tratamiento. De igual manera, se presentaron los porcentajes

más altos en la intensidad de compra por parte de los usuarios, evidenciando que la técnica de recubrimiento es idónea para mantener la calidad de las frutas, aumenta el tiempo en que se descompone y extiende la vida útil postcosecha de frutas.

Otra investigación determinó que el control preciso de la humedad y la temperatura es esencial para preservar la calidad de las frutas. Las tecnologías de enfriamiento rápido y almacenamiento en atmósfera controlada aseguran que las frutas se mantengan a temperaturas óptimas para frenar el metabolismo y prevenir el crecimiento microbiano. La tecnología de sensores y monitoreo inteligente está revolucionando la postcosecha de frutas. Sensores de temperatura, humedad, etileno y otros factores clave proporcionan datos en tiempo real sobre las condiciones de almacenamiento. Los sistemas de monitoreo permiten la detección temprana de cambios no deseados y la toma de decisiones precisas para minimizar pérdidas y optimizar la gestión.

En Rai, Kumari, y Vashi (2022) han realizado un estudio sobre daños en frutas por la cadena de enfriamiento en el proceso de postcosecha. Sin embargo, en la investigación se encontró que, la baja temperatura puede inducir un daño en las frutas que podría limitar el tiempo de almacenamiento. El frío es comúnmente utilizado en la industria agrícola y de alimentos para extender el tiempo de almacenamiento de productos frescos y minimizar el deterioro (Figura 14). Aunque el frío inicialmente puede ser beneficioso para la conservación, después de ciertos períodos de tiempo, se observan efectos negativos en la calidad de las frutas. Algunos de los efectos negativos son manchas en la fruta, cambios en el sabor, pérdida de calidad nutricional y la apariencia de la fruta, lo que finalmente afecta la calidad general del producto (Mi et al., 2024). Estos resultados pueden ser importantes para los productores y la industria alimentaria, ya que sugieren que, aunque el frío puede extender la vida útil de los productos, es necesario encontrar un equilibrio para evitar la degradación de la calidad.

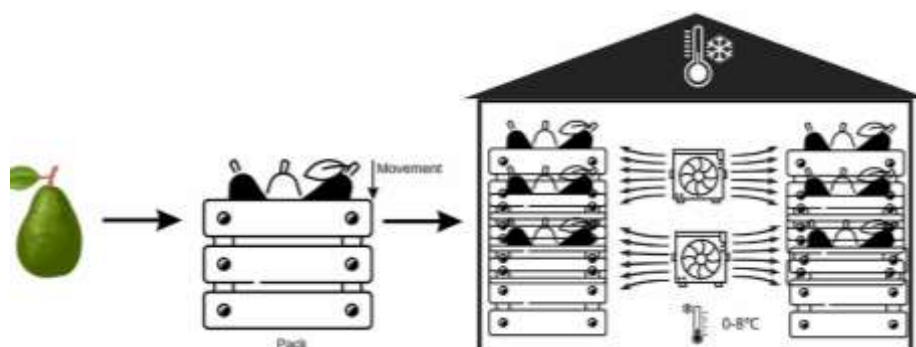


Figura 14. Uso almacenamiento frío para la conservación de frutos de aguacate (Mi et al., 2024)

Una técnica innovadora para la postcosecha de frutas permite el desarrollo de recubrimientos y empaques con propiedades antimicrobianas y de barrera mejoradas. Los nanomateriales aplicados en películas de empaque reducen la migración de gases y la humedad, manteniendo un ambiente óptimo para la conservación de la fruta. Las

aplicaciones de nanotecnología para el manejo de postcosecha en cultivos, entre los cuales se destaca la generación de nano productos para el sector agrícola que son utilizados para desarrollar productos que mejoren la calidad y la vida útil de los productos agrícolas después de la cosecha, en agricultura de precisión para la monitorización y gestión precisa de los cultivos, empaçado de alimentos a través de envases con nanopartículas antimicrobianas que pueden inhibir el crecimiento de bacterias y hongos, manteniendo los alimentos frescos por más tiempo y transferencia de genes a las células de las plantas, permitiendo la introducción de características deseables como resistencia a enfermedades, tolerancia a estrés o mejora de la calidad nutricional.

En Mali, Raj y Trived (2020) se evidenció que la nanotecnología logró reducir la toxicidad, mejorar la vida útil y aumentar la solubilidad de pesticidas, jugando un papel importante para mejorar los procesos postcosecha de las frutas. Sin embargo, el efecto nocivo de los nanomateriales, si los hay, tiene que ser evaluados y atendidos antes de su amplia aplicación para el desarrollo sostenible.

Otra investigación desarrollada en Arabia Saudita por Departamento de Investigación de Enfermedades Epidémicas (Azam Ansari, 2023) se reporta el uso de nanomateriales para la proteger las frutas de microbios y el uso de nanosensores para detección de patógenos sobre los alimentos. En la investigación se analizaron los efectos del proceso de germinación bajo estrés salino mostrando mejoras en el contenido de clorofila y el crecimiento de las plantas que se sometieron a estrés por sequía.

En una investigación similar se desarrollaron recubrimientos alimenticios utilizando un innovador nanocompuesto basado en biopolímeros. Estos recubrimientos muestran propiedades inteligentes y activas, en este caso, específicamente para la detección de temperatura y además actúa como un indicador de temperatura, cambiando de color cuando la temperatura alcanza ciertos umbrales (Kritchenkov, et al, 2021).

De la misma manera, la IA y el aprendizaje automático se utilizan para predecir la madurez, calidad y vida útil de las frutas. Los algoritmos analizan datos de sensores y factores ambientales para ofrecer recomendaciones sobre el manejo y la distribución, minimizando pérdidas y garantizando que las frutas lleguen a los consumidores en su mejor estado. En una investigación desarrollada recientemente por (Zhou et al., 2023) se revisaron una serie de aplicaciones de la inteligencia artificial (IA) en la clasificación y el transporte de frutas en la explotación agrícola, además, se analizaron los desafíos que enfrentan los métodos manuales tradicionales, como los altos costos de mano de obra y la menor eficiencia. Finalmente, se destacan los beneficios de los sistemas basados en IA, incluida una mayor eficiencia de producción, menores pérdidas postcosecha y mejores instalaciones y niveles de seguridad para las tareas humanas. En la Figura 15, se describen las operaciones para la clasificación y transporte de frutas.



Figura 15. Diagrama de flujo de las operaciones involucradas en la clasificación y el transporte en la granja. Tomada de (Zhou et al., 2023).

Se realizó una revisión de la literatura de los estudios existentes sobre las aplicaciones de IA en la clasificación y el transporte en la granja. En Tabla 1 se muestran ejemplos de tareas de clasificación en la granja resueltas por modelos de Inteligencia Artificial.

Tabla 1. Modelos de IA para clasificación de frutas

Objetivos	Problemáticas que requieren manejo dentro de las granjas	Referencia
Detección de defectos	Clasificación de frutas podridas y frescas	Kang y Gwak (2021)
	Pardeamiento interno en mangos	Gabriels et al., (2020)
	Detección de magulladuras internas en arándanos	Kuzy et al., (2018)
	Detección de defectos internos en mangos	Raghavendra et al., (2021)
Detección de contenido	Manejo Detección de sólidos solubles en dátiles "Medjool"	Ben-Zvi et al., (2017)
	Degradación de clorofila y detección de antocianinas en cerezas	Overbeck et al., (2017)
	Determinación de sólidos solubles, índice de patrón de almidón e índice de Streif en manzanas	Cetin et al., (2022)
	Determinación de sólidos solubles en manzanas	Wang et al., (2022)
Detección de maduración	Clasificación de firmeza de kiwi	Torkashvand et al., (2017)
	Clasificación de madurez del coco filipino	Caladcad et al., (2020)
	Identificación de firmeza en aguacates	Jaramillo-Acevedo et al., (2020)
	Estimación de madurez en cereza	Overbeck et al., (2017)

	Estimación de madurez del mango	Wendel et al., (2018)
Evaluación de calidad (tamaño, masa, y color)	Clasificación por masa de mangos.	Momin et al., (2017)
	Sistema de clasificación y selección para manzanas	Zhang et al., (2021)
	Desarrollo de máquina clasificadora para la cosecha de manzanas.	Zhang et al., (2021)

Fuente: (Zhou et al., 2023)

Los resultados obtenidos les permitió descubrir que los sistemas basados en IA se han aplicado con éxito en tareas de clasificación y transporte en la granja, incluida la evaluación de la madurez, la identificación de la calidad, la detección de lesiones y la detección de enfermedades. También descubrieron que la visión artificial es una solución potencialmente viable para mejorar la eficiencia de la cosecha al proporcionar una forma alternativa de clasificar automáticamente y de forma no destructiva las frutas cosechadas en el campo. Por otra parte, la IA también ha permitido el desarrollo de Bio-Recubrimientos para la Conservación de Frutas y Verduras Frescas como lo mencionan en un estudio realizado por la Facultad de Ingeniería Química y Biotecnologías de la Universidad Politécnica de Bucarest-Rumania (Ungureanu et al., 2023). Los Bio-Recubrimientos son capas delgadas de material que se aplican a la superficie de frutas y verduras para evitar su deterioro y prolongar su vida útil. Además, existen diversos métodos de aplicación de biorrecubrimientos que permiten reducir el deterioro y mejorar la calidad de los productos frescos.

Los Bio-Recubrimientos naturales, como los derivados de extractos de plantas, generalmente se prefieren a los recubrimientos sintéticos debido a su seguridad y respeto al medio ambiente. La investigación también arrojó como resultado que el método de aplicación utilizado para los Bio-Recubrimientos puede afectar su efectividad, y algunos métodos dan como resultado recubrimientos más uniformes y consistentes.

Del mismo modo, se han utilizados algoritmos de visión de máquina e IA para la detección en línea del estado de maduración de las frutas en (Chakraborty et al., 2023), en esta investigación se presenta un sistema de visión artificial que utiliza una cámara para capturar imágenes de la fruta en una cinta transportadora y luego aplica técnicas de procesamiento de imágenes para determinar la madurez de la fruta. El sistema se probó en manzanas y peras, donde se logró determinar con precisión la madurez de la fruta con un alto grado de precisión a través de un clasificador de máquina de vectores de soporte (SVM).

El sistema se probó en manzanas y peras, lográndose determinar con precisión la madurez de la fruta obteniendo una tasa de precisión del 96,5 % para las manzanas y del 95,8 % para las peras. El sistema también pudo detectar fruta demasiado madura o poco madura y distinguir variedades de fruta. El sistema tiene el potencial de mejorar la eficiencia y la precisión de las operaciones de clasificación y clasificación de frutas, y podría usarse potencialmente en otras aplicaciones, como la recolección y el empaque automatizados de

frutas. La alta tasa de precisión del sistema y su capacidad para detectar frutas demasiado maduras o poco maduras lo convierten en una herramienta valiosa para la industria frutícola.

De igual forma, se han utilizado los sistemas de imágenes hiperespectrales e inteligencia artificial para la evaluación de la calidad de frutas, hortalizas y champiñones (Wieme et al., 2022), en la investigación se analiza el uso de sistemas de imágenes hiperespectrales e inteligencia artificial (IA) para la evaluación de la calidad de frutas, verduras y hongos. Los autores brindan una descripción general de los principios y la teoría de las imágenes hiperespectrales, así como las técnicas emergentes para monitorear y evaluar los parámetros de calidad en los productos. También analizan el uso actual y potencial de la IA y sus subdominios, el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo, para el análisis de imágenes hiperespectrales en la horticultura. En la Figura 16, se muestra una comparación del número de artículos de revistas publicados entre 2000 y 2020 relacionadas con el objeto de estudio.

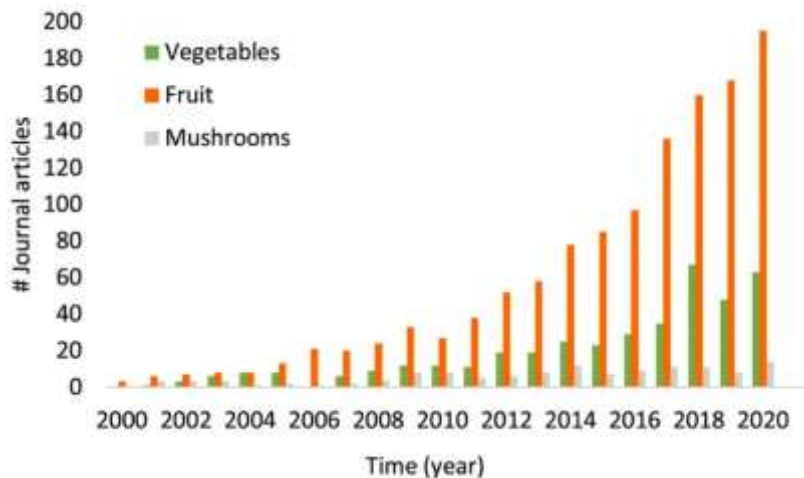


Figura 16. Número de artículos de revistas publicados entre 2000 y 2020 que utilizan el término "imágenes hiperespectrales" y sus diversas variaciones, como "imágenes espectrales", "imágenes químicas" y "espectroscopia de imágenes", así como el término "fruta", "vegetal" o "hongo".

Los autores descubrieron que las imágenes hiperespectrales son una herramienta eficaz para evaluar los parámetros de calidad en los productos, incluidas propiedades complejas como la madurez y la calidad. Identificaron las longitudes de onda más utilizadas en imágenes hiperespectrales, que están en el rango de 601-850 nm que se usan en más del 50% de los estudios. Los autores también encontraron que las máquinas de vectores de soporte (SVM) y la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) son los modelos más utilizados para el aprendizaje automático en imágenes hiperespectrales. Señalaron que las técnicas de aprendizaje profundo no se han explorado ampliamente en la horticultura, pero tienen el potencial de mejorar la precisión y la eficiencia de la evaluación de la calidad.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo de la calidad de las frutas y verduras utilizando la IA en (Maqsood et al., 2022), la investigación explora el uso de la inteligencia artificial (IA) y las tecnologías de visión por computadora para evaluar la calidad de las frutas y verduras. Los autores revisan varios estudios que han utilizado estas tecnologías para evaluar factores como madurez, color, tamaño y defectos en los productos. También discuten los posibles beneficios y limitaciones del uso de técnicas de evaluación de calidad asistidas por IA en la industria alimentaria.

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos de investigación publicados entre 2011 y 2022 que se centraron en el uso de la IA y la visión artificial para evaluar la calidad de frutas. Analizaron los datos de estos estudios para identificar tendencias y temas comunes en la investigación. Los autores encontraron que las tecnologías de inteligencia artificial y visión por computadora tienen el potencial de mejorar la precisión y la eficiencia de la evaluación de la calidad de frutas y verduras. Estas tecnologías pueden ayudar a los agricultores y procesadores de alimentos a identificar defectos y otros problemas de calidad antes en el proceso de producción, lo que puede reducir el desperdicio y mejorar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, los autores también señalan que existen desafíos para implementar estas tecnologías, como la necesidad de experiencia y equipo especializado.

CONCLUSIONES

Esta investigación ha resaltado la importancia y el impacto significativo de las tecnologías innovadoras en el manejo eficiente de los cultivos, particularmente en la producción de frutas. A lo largo del estudio, se exploraron y describieron diversas herramientas y enfoques que están revolucionando la forma en que los agricultores abordan los desafíos de la producción de frutas. Las tecnologías de sensores remotos y teledetección han demostrado ser herramientas valiosas para la observación y análisis precisos de variables clave en la producción de frutas, como el estado del cultivo, la salud de las plantas y las condiciones climáticas. Así mismo, los sistemas de riego inteligente se han destacado como una solución efectiva para optimizar el uso del agua en la agricultura. Al ajustar la cantidad y el momento de riego, según las necesidades reales de las plantas, se logra un uso más eficiente del recurso hídrico, lo que resulta en ahorros de agua y costos para los productores. Por su parte las tecnologías de comunicación y las plataformas en línea han facilitado la recopilación y monitoreo en línea por parte de los agricultores, investigadores y expertos agrícolas, lo que a su vez contribuye a la adopción más amplia de prácticas innovadoras y toma de decisiones de manejo informadas.

La adopción de tecnologías es necesaria en todas las etapas productivas incluyendo la postcosecha de frutas. La cual está siendo transformada por un conjunto diverso de tecnologías innovadoras. Desde el control de atmósfera hasta la IA y la nanotecnología, estas herramientas están mejorando la calidad, prolongando la vida útil y reduciendo las pérdidas de las frutas. La adopción de estas tecnologías no solo beneficia a los productores y distribuidores, sino también a los consumidores al garantizar que disfruten de frutas

frescas, saludables y sabrosas. La continua investigación y desarrollo en este campo promete un futuro emocionante para la postcosecha de frutas y la industria agrícola en su conjunto. La aplicación de la nanotecnología en procesos de postcosecha de frutas tiene el potencial de revolucionar la forma en que se manejan y conservan estos productos agrícolas. A través de la utilización de nanomateriales y técnicas avanzadas, se pudo observar que la nanotecnología incorpora mejoras significativas en la calidad, la vida útil y la seguridad de las frutas durante el proceso de postcosecha.

La inteligencia artificial y la nanotecnología ofrecen un enfoque innovador para abordar los desafíos en la postcosecha de frutas, mejorando la calidad, la vida útil y la seguridad de estos productos. Sin embargo, es crucial abordar cuidadosamente los aspectos técnicos, regulatorios y de comunicación para asegurar una adopción exitosa y responsable en la industria. La IA tiene el potencial de revolucionar la clasificación y el transporte en la granja al aumentar la eficiencia, reducir las pérdidas y mejorar la seguridad. La investigación futura debería centrarse en abordar los desafíos que enfrentan los sistemas basados en IA y explorar nuevas oportunidades, para que esta se aplicada de manera eficiente en la clasificación y el transporte en la granja.

El uso de biorrecubrimientos para conservar frutas frescas es una tecnología prometedora que puede ayudar a reducir el desperdicio de alimentos y mejorar la seguridad alimentaria. La elección del material de Bio-Recubrimiento y el método de aplicación depende del tipo de producto y su uso previsto. Se necesita más investigación para desarrollar biorrecubrimientos más efectivos y sostenibles para optimizar sus métodos de aplicación en diferentes tipos de productos.

AGRADECIMIENTOS

A la universidad de Cundinamarca por la financiación del proyecto 109, titulado: Desarrollo de un sistema de evaluación de la fusariosis en plántulas de gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis*) mediante sistemas de visión por computador como herramienta de diagnóstico y manejo, de la IV convocatoria interna.

REFERENCIAS

- Azam Ansari, M. (2023). Nanotechnology in Food and Plant Science: Challenges and Future Prospects. *Plants*, 1-34. doi:<https://doi.org/10.3390/plants12132565>
- Baker , B. P., Green, T. A., y Loker, A. J. (2020). Biological control and integrated pest management in organic and conventional systems. *Biological Control*, 1, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104095>
- Bwambale , E., Abagale, F. K., y Anornu, G. K. (2023). Data-driven model predictive control for precision irrigation management. *Smart Agricultural Technology*, 3, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100074>
- Chakraborty, S. K., Rahul Potdar, S. A., Singh Chandel, N., Jat, D., Dubey, K., y Shelake, P. (2023). AI-enabled farm-friendly automatic machine for washing, image-based sorting,

- and weight grading of citrus fruits: Design optimization, performance evaluation, and ergonomic assessment. *Journal of Field Robotics*. doi:<https://doi.org/10.1002/rob.22193>
- Chanchí-Golondrino, G. E., Ospina-Alarcón, M. A., y Saba, M. (2022). IoT System for Monitoring of Climatological Variables in Urban Agriculture Crops. *Revista Científica*, 44(2), 257-271. doi:<https://doi.org/10.14483/23448350.18470>
- De Armas Costa, R. J., Martín Gómez, P. F., y Rangel Díaz, J. E. (2022). Gulupa fruit (*Passiflora edulis* Sims), its export potential, matrix and ripening signature: a review. *Ciencia y agricultura*, 19(1), 15-27. doi:<https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13822>
- De la Vega, J. C., Cañarejo, M. A., y Pinto, N. S. (2017). Avances en Tecnología de Atmósferas Controladas y sus Aplicaciones en la Industria De la Vega. *Información Tecnológica*, 75-86. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-0764201700030000>
- Georgiev, G., Beloev, I., Hristov, G., y Zahariev, P. (2022). LoRa Network-Based System for Remote Monitoring of Agricultural Crops. *2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM)*, 1-4. doi:<https://doi.org/10.3390/s22186743>
- Hassan, W., Manzoor, T., Jaleel, H., y Muhammad, A. (2021). Demand-based water allocation in irrigation systems using mechanism design: A case study from Pakistan. *Agricultural Water Management*, 256(1). doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107075>
- huidaagtech.com. (2023). *Intelligent Irrigation Solutions*. Recuperado el 10 de 08 de 2023, de <https://www.huidaagtech.com/intelligent-irrigation-solutions.html>
- ICA. (2011). *Manejo de problemas fitosanitarios del cultivo de Gulupa*. Bogotá: Produmedios. Obtenido de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/2262/44992_60739.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Intagri. (14 de 08 de 2023). *Atmósferas Controladas y Modificadas en Postcosecha*. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/poscosecha-comercializacion/atmosferas-controladas-y-modificadas-en-postcosecha>
- Jain, R. K. (2023). Experimental performance of smart IoT-enabled drip irrigation system using and controlled through web-based applications. *Smart Agricultural Technology*, 4, 1-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100215>
- Korotcenkov, G., Simonenko, N., Simonenko, E., Sysoev, V., y Brinzari, V. (2023). Paper-Based Humidity Sensors as Promising Flexible Devices, State of the Art, Part 2: Humidity-Sensor Performances. *Nanomaterials*, 13(1381), 1-63. doi:<https://doi.org/10.3390/nano13081381>
- Kritchenkov, A. S., Egorov, A. R., Volkova, O. V., Artemjev, A., Kurliuk, A. V., Le, T. A., . . . Khrustalev, V. (2021). Novel biopolymer-based nanocomposite food coatings that exhibit active and smart properties due to a single type of nanoparticles. *Food Chemistry*, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128676>
- Ligiang, Z., Shouvi, Y., Leibo, L., Zhen, Z., y Shaojun, W. (2011). A Crop Monitoring System Based on Wireless Sensor Network. *Procedia Environmental Sciences*, 558-565. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.088>

- Liu, Q., Gu, X., Chen, X., Mumtaz, F., Liu, Y., Wang, C., . . . Zhan, Y. (2022). Soil Moisture Content Retrieval from Remote Sensing Data by Artificial Neural Network Based on Sample Optimization. *Sensors*, 22(1611), 1-21. doi:<https://doi.org/10.3390/s22041611>
- Lu, Y., Huang, Y., y Lu, R. (2017). Innovative Hyperspectral Imaging-Based Techniques for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables: A Review. *applied Sciences*, 7(189), 1-36. doi:<https://doi.org/10.3390/app7020189>
- Mali, S. C., Raj, S., y Trived, R. (2020). Nanotechnology a novel approach to enhance crop productivity. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 1-4. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100821>
- Maqsood, U., Abbas, A., Rehman, S., Asghar, A., Kanwal, B., y Saud Shoukat, R. (2022). Comparative Analysis of Fruits and Vegetables Quality Using AI Assisted Technologies: A Review. *Foundation University Journal of*, 1-25. doi:<https://doi.org/10.33897/fujeas.v3i2.688>
- Miranda, M., Ribeiro, M. D., Spricigo, P. C., Pilon, L., Mitsuyuki, M. C., Correa, D. S., y Ferreira, M. D. (2022). Carnauba wax nanoemulsion applied as an edible coating on fresh tomato for postharvest quality evaluation. *Heliyon*, 21-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09803>
- Oon, A., Ahmad, A., Sah, S. M., Abdul Maulud, K. N., Syafiq Yahya, M., Lechner, A. M., y Azhar, B. (2023). The conservation of biodiverse continuous forests and patches may provide services that support oil palm yield: Evidence from satellite crop monitoring. *Cleaner Production Letters*, 4, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cpl.2023.100036>
- Mi, D., Thao, V., Thi, T., Thi, K., y Thuy, H. (2024). A review of preservation approaches for extending avocado fruit shelf-life. *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 16, 2666-1543. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101102>.
- Poenaru, V., Badea, A., Cimpeanu, S. M., y Irimescu, A. (2015). Multi-temporal multi-spectral and radar remote sensing for agricultural monitoring in the Braila Plain. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 506-516. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.134>
- Rai, A., Kumari, K., y Vashi, P. (2022). Umbrella review on chilling injuries: Post-harvest issue, cause, and treatment in tomato. *Scientia Horticulturae*, 1-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110710>
- Singh, P., y Saikia, S. (2016). Arduino-based smart irrigation using water flow sensor, soil moisture sensor, temperature sensor and ESP8266 WiFi module. *2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 1-4. doi:<https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2016.7906792>
- Ungureanu, C., Tihan, G., Zgâr, R., y Pandelea, G. (2023). Bio-Coatings for Preservation of Fresh Fruits and Vegetables. *Coatings*, 1-34. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings13081420>
- Veeramanikandasamy, T., Sambath, K., Rajendran, K., y Sangeetha, D. (2014). Remote Monitoring and Closed Loop Control System for Social Modernization in Agricultural System Using GSM and Zigbee Technology. *International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, 1-4. doi:<https://doi.org/10.1109/ICAEE.2014.6838438>

- Veys, C., Chatziavgerinos, F., AlSuwaidi, A., Hibbert, J., Hansen, M., Bernotas, G., . . . Grieve, B. (2019). Multispectral imaging for presymptomatic analysis of light leaf spot in oilseed rape. *Plant Methods*, 15(4), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1186/s13007-019-0389-9>
- Wieme, J., Mollazade, K., Malounas, I., Zude-Sasse, M., Zhao, M., Gowen, A., . . . Van Beek, J. (2022). Application of hyperspectral imaging systems and artificial intelligence for quality assessment of fruit, vegetables and mushrooms: A review. *Biosystems Engineering*, 156-176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.07.013>
- Xu, J., Gu, B., y Tian, G. (2022). Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 10-22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>
- Yamini, B., Pradeep, G., Kalaiyarasi, D., Jayaprakash, M., Janani, G., y Uthayakumar, G. S. (2024). Theoretical study and analysis of advanced wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Measurement: Sensors*, 33, 101098. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101098>
- Zhang, Z., y Zhu, L. (2023). A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications. *Drones*, 7(398), 42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>
- Zhou, X. X., Li, Y. Y., Luo, Y. K., Sun, Y. W., Su, Y. J., Tan, C. W., y Liu, Y. J. (2022). Research on remote sensing classification of fruit trees based on Sentinel-2 multi-temporal imageries. *Scientific Reports*, 12(1), 11549. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112333>
- Zhou, Z., Zahid, U., Majeed, Y., Nisha, Mustafa, S., Sajjad, M., . . . Fu, L. (2023). Advancement in artificial intelligence for on-farm fruit sorting and transportation. *Frontiers in Plant Science*. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1082860>

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Javier Hernando Gracia Gil. Ingeniero electrónico, Magister, Decano de la facultad de ingeniería de la Universidad de Cundinamarca, representante de los decanos ante el comité del profesor. Docente con experiencia mayor a 17 años.

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Stephany Hurtado Clopatosky. Ingeniera agrónoma, Magister en Ciencias Agrarias con énfasis en Fitopatología, docente investigadora de tiempo completo ocasional en el programa de ingeniería agronómica de la Universidad de Cundinamarca.



Edgar Eduardo Roa Guerrero. Ingeniero electrónico, Magister en Automatización y control industrial, coordinador del Programa de ingeniería electrónica de la Universidad de Cundinamarca, con experiencia docente e Investigador categorizado como asociado según Min ciencias.