

Tendencias en el manejo y tratamiento poscosecha de productos agrícolas: Revisión y análisis

Trends in the postharvest treatment and handling of agricultural products: A Review and analysis

 Carlos Modesto Martínez Hernández*

Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

*Autor para correspondencia: Carlos M. Martínez-Hernández, e-mail: carlosmh@uclv.edu.cu

RESUMEN: Teniendo en cuenta el auge de las nuevas tecnologías de la información científica y la inteligencia artificial (IA) a escala internacional y nacional, los cuales utilizan como herramientas softwares, sensores e instrumentos de medición de nueva generación no destructivos, así como aspectos relacionados con la disminución de la contaminación medioambiental, calidad y trazabilidad de las producciones agrícolas se desarrolló este trabajo. Partiendo de la problemática del uso masivo de los métodos destructivos de análisis de las variables poscosecha de productos agrícolas, se acometió una revisión bibliográfica para conocer cuáles tendencias internacionales se presentarán en este campo, siendo este particular el objetivo del mismo. El trabajo se estructuró en tres partes: primeramente, se describen las tendencias y los métodos para la manipulación, tratamiento y utilización de los productos agrícolas. Posteriormente se abordan las particularidades para utilizar y llevar a cabo estos tratamientos. Finalmente, se analiza su posible utilización en el caso cubano. Como conclusión, se muestra el estado del arte en las tendencias del manejo y tratamiento poscosecha de productos agrícolas en la actualidad y a futuro, sus ventajas y limitaciones.

Palabras clave: inteligencia artificial (IA), sensores e instrumentos de medición no destructivos, trazabilidad, manejo poscosecha.

ABSTRACT: This work was developed considering the rise of new scientific information technologies and artificial intelligence (AI) at both the international and national levels. These technologies utilize software, sensors, and next-generation non-destructive measuring instruments as tools, and are related to reducing environmental pollution and improving the quality and traceability of agricultural production. Starting from the problem of the widespread use of destructive methods for analyzing post-harvest variables in agricultural products, a literature review was undertaken to identify international trends in this field, which was the primary objective of this study. The work is structured in three parts: first, the trends and methods for the handling, treatment, and use of agricultural products are described. Second, the specifics of using and implementing these treatments are addressed. Finally, their potential application in the Cuban context is analyzed. In conclusion, the current and future state of the art in post-harvest handling and treatment trends for agricultural products is presented, along with their advantages and limitations.

Keywords: Artificial intelligence (AI), non-destructive sensors and measuring instruments, traceability, post-harvest handling.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Kader (2002) y Thompson (2015), la agricultura mundial enfrenta uno de sus mayores desafíos: alimentar a una población que alcanzará los 10 mil millones de personas para 2050, mientras enfrenta limitaciones de recursos, cambio climático y altos niveles de desperdicio alimentario. Según la FAO, aproximadamente el 14% de los alimentos se pierden entre la cosecha y la venta minorista, porcentaje que aumenta drásticamente en regiones en desarrollo y para productos perecederos.

La etapa poscosecha representa un eslabón crítico donde se concentran pérdidas económicas significativas y reducción de calidad nutricional. Simultáneamente, los consumidores exigen cada vez más transparencia y trazabilidad sobre el origen, condiciones de producción y

manejo de sus alimentos, impulsados por preocupaciones de seguridad alimentaria, sostenibilidad y autenticidad (Dentoni, 2021).

La convergencia de tecnologías digitales está transformando radicalmente la gestión agrícola. La Agricultura 4.0 integra sensores IoT, drones, satélites, inteligencia artificial y big data para crear sistemas agroalimentarios más eficientes, resilientes y transparentes.

El sector agrícola y agroindustrial está experimentando una transformación fundamental en sus métodos de control de calidad y evaluación de productos. Históricamente, los métodos destructivos (muestreo aleatorio seguido de análisis de laboratorio) han dominado debido a su precisión analítica. Sin embargo, presentan limitaciones críticas tales como:

Recibido: 15/11/2025

Aceptado: 28/03/2026

Conflicto de intereses: El autor de este trabajo declara no presentar conflicto de intereses.

Contribuciones de autor: Conceptualization, Data curation, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing: Carlos Modesto Martínez Hernández.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por el autor ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



- Representatividad limitada (generalmente <1% de la producción);
- Pérdida de producto y valor económico;
- Retroalimentación tardía en la cadena de producción;
- Imposibilidad de evaluación continua.

El nuevo paradigma busca implementar sistemas de inspección 100% no destructivos que permitan:

- Evaluación en tiempo real en líneas de procesamiento;
- Control de calidad integral de toda la producción;
- Preservación del valor comercial del producto;
- Trazabilidad completa de atributos de calidad.

Según Valente (2021), la agricultura se encuentra inmersa en una transformación tecnológica sin precedentes. Movida por la necesidad de una mayor eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad, la democratización de herramientas avanzadas está permitiendo que actores históricamente relegados como agricultores medianos y cooperativas accedan a capacidades que antes eran dominio exclusivo de grandes empresas. Dos pilares fundamentales de esta revolución han sido sin dudas: la miniaturización y abaratamiento de sensores y espectrómetros portátiles, así como la creciente accesibilidad de la robótica agrícola. La confluencia de factores como la escasez estructural de mano de obra, que en la Unión Europea (UE) ha significado la pérdida de 2.5 millones de trabajadores en una década, y la madurez tecnológica de la inteligencia artificial (IA), la visión por computadora y la conectividad, ha creado el caldo de cultivo perfecto para esta transición. El resultado es un ecosistema donde la toma de decisiones se basa en datos en tiempo real, recogidos in situ con dispositivos asequibles, y donde tareas repetitivas y críticas como la cosecha comienzan a automatizarse de forma rentable.

Según Pritt y Chern (2017); Kussul (2022), vivimos un punto de inflexión en la historia industrial. Si la primera revolución industrial nos dio la máquina de vapor, la tercera la automatización y la electrónica, hoy estamos presenciando el nacimiento de una cuarta revolución donde el valor ya no se crea únicamente con acero y engranajes, sino con datos, algoritmos y decisiones en tiempo real.

Ante estas perspectivas este trabajo se propuso como objetivo fundamental investigar las tendencias actuales y futuras de los métodos y tecnologías para el análisis de las variables poscosecha de productos agrícolas.

DESARROLLO

Para la realización de este trabajo se partió de palabras clave en el tema objeto de estudio (tendencias en el manejo y tratamiento poscosecha de productos agrícolas); así como de la búsqueda en internet a través de plataformas especializadas e inteligencia artificial. De esta forma fueron objeto de análisis diferentes conceptos tales como: tecnologías IoT en

agricultura, drones, teledetección y satélites, poscosecha y trazabilidad entre otros. Como resultado de la búsqueda en estas temáticas fueron consultados trabajos científicos comprendidos entre (2019 y 2025) en revistas tales como: Computers and Electronics in Agriculture (Elsevier); Biosystems Engineering (Elsevier); Precision Agriculture (Springer); Remote Sensing (MDPI); IEEE Transactions on AgriFood Electronics; Postharvest Biology and Technology (Elsevier); Food Control (Elsevier).

También se consultaron: informes técnicos y guías, agencias gubernamentales, consorcios y asociaciones, recursos en línea y plataformas, estándares técnicos, bases de datos de investigación, cursos y programas de capacitación. Motivado por el gran espectro de información analizada, los resultados obtenidos han sido expuestos por aspectos tratados tales como: tipos, características del dispositivo, ventajas, aplicaciones, regulaciones y estándares internacionales, limitaciones técnicas, limitaciones actuales y desafíos tecnológicos, barreras para adopción masiva, áreas de investigación activas, casos de éxitos y aplicaciones comerciales, ejemplos industriales implementados y perspectivas futuras. De esta forma se posibilita su contraste y valoración.

De acuerdo con Ferrández (2022); Ruiz (2022); Chen (2023); Kamilaris (2023); Zhang (2023); Mukhopadhyay y Postolache (2021), el Internet de las Cosas (IoT) para agricultura comprenden cuatro componentes esenciales:

- Dispositivos sensores: Convierten parámetros físicos/químicos/biológicos en señales eléctricas;
- Conectividad: Protocolos de comunicación (LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, WiFi, 5G);
- Plataforma de procesamiento: Almacenamiento, análisis y visualización de datos;
- Interfaz de usuario: Dashboards, alertas, sistemas de control automatizado.

En el caso de la poscosecha existen algunas especificidades las cuales pueden clasificarse como:

Sensores para Condiciones Ambientales en Almacenamiento

Sensores de temperatura: Termistores, RTD, termopares, sensores infrarrojos;

Rango típico: -40°C a +85°C;

Precisión: $\pm 0.1^\circ\text{C}$ a $\pm 0.5^\circ\text{C}$;

Ubicación estratégica: puntos críticos en cámaras frigoríficas;

Sensores de humedad relativa: Capacitivos, resistivos, de punto de rocío;

Rango: 0-100% HR;

Precisión: $\pm 1.5\%$ a $\pm 3.5\%$;

Aplicación: prevención de condensación y desarrollo de hongos;

Sensores de atmósfera controlada/modificada:

- Concentración de O₂: Sensores electroquímicos, ópticos (0-25%);

- Concentración de CO₂: Sensores NDIR, químicos (0-20%);
- Concentración de etileno: Sensores fotoacústicos, electroquímicos (ppb a ppm);
- Sensores de calidad del aire: COV, amoníaco, sulfuro de hidrógeno;

Sensores de Calidad y Estado del Producto·

Sensores de firmeza: Sensores de fuerza/presión no destructivos;

Sensores espectrales portátiles: NIR, VIS-NIR para sólidos solubles, acidez, madurez;

Sensores de clorofila fluorescencia: Indicadores de estrés fisiológico;

Biosensores: Detección de patógenos (E. coli, Salmonella, Listeria);

Sensores electrónicos de nariz y lengua: Perfiles de volátiles y sabores.

Sensores para Monitoreo Logístico

Sensores de impacto y vibración: Acelerómetros triaxiales;

Sensores de inclinación: Para monitorizar orientación de carga;

Sensores de luminosidad: Detección de apertura de contenedores;

Sensores GPS/GNSS: Localización en tiempo real.

Sensores para Embalajes Inteligentes

Indicadores de tiempo-temperatura (TTI);

Indicadores de frescura: Sensores de pH, gases específicos;

RFID/NFC activos y semiactivos;

LoRa/LoRaWAN: Alcance 5-15 km rural, baja potencia, bajo costo;

Sigfox: Alcance 10-40 km, mensajes muy pequeños;

NB-IoT: Sobre infraestructura celular, mayor ancho de banda.

Comunicaciones por Satélite IoT:

- Para áreas remotas sin cobertura terrestre;
- Proveedores: Iridium, Orbcomm, Swarm Technologies.

Plataformas IoT Especializadas

Propósitos generales: AWS IoT, Microsoft Azure IoT, Google Cloud IoT;

Especializadas agrícolas: Arable, Pessl Instruments, CropX;

Plataformas open-source: ThingsBoard, Node-RED, Home Assistant.

En la temática relativa a drones en la agricultura existe una gran variedad de fuentes de información que tratan el tema relativo a diferentes tipologías y usos. Dentro de los autores que han tratado el tema se consultaron a [García *et al.* \(2021\)](#); [Jafarbiglu y Pourreza \(2022\)](#); [Tripicchio \(2022\)](#); [Zhang \(2022\)](#); [Thenkabail y Lyon \(2023\)](#).

Drones (UAVS) en la gestión poscosecha

Tipologías y Configuraciones Específicas

Drones Multirrotor (Multicópteros);

Ventajas: Vuelo estacionario, vertical take-off and landing (VTOL);

Configuraciones: Cuadricópteros, hexacópteros, octocópteros;

Capacidad de carga: 0.5-10 kg;

Autonomía: 15-40 minutos;

Aplicaciones: Inspección detallada, interiores de almacenes

Drones de Ala Fija

Ventajas: Mayor autonomía, cobertura extensa;

Autonomía: 1-3 horas;

Velocidad: 50-100 km/h;

Aplicaciones: Monitoreo de grandes instalaciones, patios de acopio.

Drones Híbridos (VTOL + Ala Fija)

Combinación de ventajas: despegue vertical + eficiencia en vuelo;

Aplicaciones emergentes en logística agrícola;

Sensores Embarcados Especializados.

Cámaras Multiespectrales

Bandas típicas: Verde (550 nm), Rojo (660 nm), Red Edge (735 nm), NIR (790 nm);

Índices derivados:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): Salud vegetal;
- NDRE (Normalized Difference Red Edge): Contenido de clorofila;
- GNDVI (Green NDVI): Estrés temprano;
- Resolución: 2-20 MP;

Aplicaciones poscosecha: Detección de daños mecánicos, desórdenes fisiológicos.

Cámaras Térmicas

Rango espectral: 7.5-13.5 μ m (infrarrojo térmico);

Resolución térmica: <0.05°C;

Aplicaciones:

- Detección de puntos calientes en almacenamiento;
- Fugas en sistemas de refrigeración;
- Mapeo térmico de instalaciones.
- Cámaras Hiperespectrales
- Bandas espectrales: 100-300 bandas contiguas;
- Rango: 400-1000 nm (VNIR) o 900-2500 nm (SWIR);

Aplicaciones avanzadas:

- Detección de descomposición temprana;
- Clasificación por calidad/madurez;
- Identificación de contaminantes.

Sensores LiDAR (Light Detection and Ranging)

Principio: Medición de distancia con pulsos láser;

Aplicaciones poscosecha:

- Modelado 3D de instalaciones;
- Medición de volúmenes de almacenamiento;

- Inspección estructural de infraestructuras.
- Cámaras RGB de Alta Resolución
- Resolución: 20-45 MP;

Aplicaciones:

- Inspección visual detallada;
- Lectura automatizada de códigos QR/etiquetas;
- Documentación de condiciones.

Aplicaciones Operativas en Poscosecha:

- Inspección y Mantenimiento de Infraestructuras
- Mapeo térmico de cámaras frigoríficas;
- Detección de aislamientos deficientes;
- Inspección de sistemas de ventilación/refrigeración.

Monitoreo de Condiciones de Almacenamiento Externo:

- Patios de acopio: detección de acumulación de humedad, plagas;
- Silos y bodegas: evaluación de integridad estructural;

Gestión de Inventarios

- Conteo automatizado de pallets, cajas, contenedores;
- Verificación de ubicaciones en patios de almacenamiento.

Control de Calidad:

- Detección temprana de podredumbres, daños;
- Clasificación por tamaño, color, defectos en lotes almacenados.

Seguridad y Vigilancia:

- Monitoreo perimetral de instalaciones;
- Detección de intrusiones, robos. Satélites para monitoreo agrícola y logística. De acuerdo con Lambert (2022) los satélites pueden ser utilizados en diferentes actividades dentro de las cuales está el monitoreo agrícola y logístico. A continuación, se muestran algunos ejemplos.

Satélites de Observación de la Tierra

Satélites de Resolución Media-Alta (10-30 m):

- Sentinel-2 (ESA Copernicus):
- Resolución: 10 m (4 bandas), 20 m (6 bandas), 60 m (3 bandas);
- Banda temporal: 5 días (2 satélites);
- Características: Gratuito, 13 bandas espectrales;

Landsat 8 & 9 (NASA/USGS):

- Resolución: 15 m (pan), 30 m (multiespectral);
- Banda temporal: 16 días;
- Características: Histórico desde 1972, 11 bandas.

Satélites de Radar (SAR)

- Sentinel-1 (ESA): Radar de apertura sintética (C-band);
- Ventaja: Penetra nubes, opera día/noche;
- Aplicaciones: Monitoreo de humedad, deformaciones del terreno;
- SAOCOM (Argentina): L-band SAR;
- Especializado en humedad del suelo.

Sistemas Integrados de Trazabilidad

Con respecto a la trazabilidad Weiss (2023), abordan la utilización de sensores para dar seguimiento a la cadena de Trazabilidad en los productos agrícolas. Por otra parte, Dentoni (2021) expone algunos de los fundamentos de la trazabilidad agroalimentaria:

Fundamentos de Trazabilidad Agroalimentaria

Trazabilidad: Capacidad para seguir el movimiento de un alimento a través de etapas especificadas de producción, procesamiento y distribución (Codex Alimentarius);

Trazabilidad hacia atrás (Backward): Origen de los insumos;

Trazabilidad interna (Internal): Procesos dentro de la organización;

Trazabilidad hacia adelante (Forward): Destino de los productos.

Regulaciones y Estándares Internacionales:

- GS1: Estándares globales de identificación (GTIN, GLN, SSCC);
- ISO 22005:2007: Trazabilidad en la cadena alimentaria;
- FSMA (FDA): Food Safety Modernization Act (EE.UU.);
- Reglamento (UE) 178/2002: Principios generales de trazabilidad en UE;
- GlobalG.A.P.: Buenas prácticas agrícolas.

Integración de Tecnologías para Trazabilidad de Extremo a Extremo

Etapas 1: Producción y Cosecha

Satélites: Verificación de ubicación, condiciones de cultivo;

Drones: Monitoreo de madurez, estimación de cosecha;

IoT: Condiciones ambientales en campo, registros de prácticas.

Etapas 2: Transporte Inicial y Recepción

IoT: Sensores en vehículos (temperatura, humedad, golpes);

GPS/GLONASS: Rastreo de ubicación en tiempo real;

RFID: Identificación automática en recepción.

Etapas 3: Procesamiento y Almacenamiento

IoT: Red de sensores ambientales en instalaciones;

Drones: Inspección de instalaciones, inventario;

Visión por computadora: Control de calidad automatizado;

Blockchain: Registro inalterable de lotes y condiciones;

Etapas 4: Distribución y Transporte Secundario

IoT: Monitores en contenedores/vehículos;
 Sensores de apertura: Integridad de sellos;
 Plataformas logísticas: Optimización de rutas.
 Etapa 5: Venta Minorista y Consumidor
 QR/NFC: Acceso del consumidor a información de trazabilidad;
 Apps móviles: Verificación de autenticidad, historial;
 Sensores en estanterías: Monitoreo de condiciones en punto de venta.

Limitaciones Técnicas

Sensores IoT:

- Vida útil de baterías en ubicaciones remotas;
- Interferencias en comunicaciones inalámbricas;
- Calibración y mantenimiento de sensores;
- Integración de sistemas heterogéneos.

Drones:

- Limitaciones regulatorias (espacio aéreo, alturas, BVLOS);
- Autonomía limitada (especialmente con sensores pesados);
- Condiciones climáticas adversas;
- Procesamiento de grandes volúmenes de datos.

Satélites:

- Resolución espacial/temporal limitada;
- Nubes que bloquean sensores ópticos;
- Latencia en disponibilidad de datos;
- Interpretación compleja de datos.

Por otra parte, según Thompson (2015); Thenkabail (2021); Petropoulos y Srivastava (2023), las Tecnologías dominantes en la nueva generación de sensores incluyen:

- Espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) hiperespectral y multiespectral:
- Avance fundamental: De espectros puntuales a imágenes espectrales;
- NIRS tradicional: Proporciona un espectro promedio de un área pequeña;
- NIRS hiperespectral: Captura imágenes con cientos de bandas espectrales continuas;
- NIRS multiespectral: Utiliza bandas espectrales seleccionadas estratégicamente.

Aplicaciones revolucionarias:

- Mapeo de distribución de compuestos: Visualización espacial de azúcares, humedad, acidez, compuestos fenólicos;
- Detección de defectos internos: Manchas marrones, daños por congelación, glassiness;
- Clasificación por calidad interna: Diferenciación de frutas según parámetros químicos;

- Predicción de vida útil: Modelado de maduración y deterioro.

Ventajas operativas:

- Velocidad: Hasta 10-20 frutas/segundo en líneas de clasificación;
- Precisión: $R^2 > 0.90$ para sólidos solubles en frutas como manzanas, uvas;
- Integración: Compatible con sistemas de clasificación existentes;
- No contacto: Elimina contaminación cruzada.

Imágenes térmicas y de fluorescencia:

- Termografía agrícola: Más allá de la temperatura superficial;
- Principio físico: Detecta emisión infrarroja (8-14 μm) relacionada con temperatura y propiedades fisiológicas;
- Resolución térmica: $<0.1^\circ\text{C}$ en sistemas avanzados;

Aplicaciones en cultivos:

- Estrés hídrico temprano: Detección antes de síntomas visibles mediante análisis de temperatura del dosel;
- Detección de enfermedades: Patrones térmicos anómalos por actividad metabólica de patógenos;
- Evaluación de daño por frío: Cambios en conductancia estomática y transpiración;
- Optimización de riego: Zonificación de necesidades hídricas dentro de la parcela;
- Imágenes de fluorescencia de clorofila:
- Inducción Kautsky: Mide eficiencia fotosintética (F_v/F_m) como indicador de estrés;
- Fluorescencia multicolor: Diferencia tipos de estrés (nutricional, hídrico, patológico);
- Detección ultra-temprana: Hasta 5-7 días antes de síntomas visibles de infecciones.

Imágenes de resonancia magnética (MRI) y tomografía computarizada (CT) portátiles:

- Miniaturización de tecnología médica para agroindustria;
- Sistemas de bajo campo: 0.1-0.5 Tesla (vs 1.5-3T médicos);
- Geometrías especializadas: Diseñadas para productos agrícolas específicos;
- Costos decrecientes: De >500.000 € a <100.000 € para sistemas especializados;
- Aplicaciones en frutas de alto valor;
- Visualización interna no destructiva: Huecos, daños por granizo, pudrición interna;
- Análisis de textura: Distribución de espacios de aire, densidad de tejidos;

- Estudios de maduración: Cambios estructurales durante el almacenamiento;
- Selección de parentales: En programas de mejoramiento genético;

CT agrícola (Rayos X de baja energía):

- Resolución sub-milimétrica: Detección de huesos en frutas deshuesadas, insectos en granos;
- Análisis 3D: Reconstrucción de estructuras internas complejas;
- Seguridad alimentaria: Detección de cuerpos extraños no metálicos.

Sensores táctiles y de impacto:

- Robótica de inspección con retroalimentación óptica;
- Sensores de fuerza distribuidos: Matrices táctiles con resolución espacial;
- Actuación adaptativa: Brazos robóticos que ajustan presión según respuesta del producto;
- Aprendizaje automático: Correlación entre respuestas mecánicas y atributos de calidad;

Parámetros medibles:

- Firmeza objetiva: Force-deformation curves con precisión >95% vs penetrómetro;
- Elasticidad/viscosidad: Propiedades reológicas mediante pruebas dinámicas;
- Homogeneidad de textura: Detección de áreas localmente blandas/duras;
- Clasificación por madurez: Basada en propiedades mecánicas evolutivas;

Sistemas de impacto no destructivo:

- Análisis de respuesta acústica: Frecuencias características relacionadas con firmeza;
- Sensores de aceleración: Patrones de desaceleración durante impacto controlado;
- Aplicación en línea: Hasta 30-40 mediciones/segundo en sistemas industriales.

Integración tecnológica y tendencias convergentes:

Fusión sensorial (Sensor Fusión):

- Combinación NIRS + táctil: Atributos químicos + mecánicos en una medición;
- Térmica + fluorescencia: Diagnóstico integral de estado fisiológico;
- MRI/CT + espectroscopía: Correlación estructura interna + composición química.

Inteligencia Artificial y Big Data:

- Redes neuronales convolucionales: Para análisis de imágenes hiperespectrales;

- Modelos predictivos multivariados: PLS, SVM, Random Forest para calibración;
- Sistemas de recomendación: Sugerencias de manejo basadas en datos sensoriales.

Miniaturización y democratización:

- Sensores en smartphones: Espectrómetros NIR portátiles por <5.000 €;
- Drones equipados: Termografía y fluorescencia aérea de precisión;
- Sistemas IoT: Redes de sensores distribuidos en campo y poscosecha.

Limitaciones actuales y desafíos tecnológicos:

Barreras para adopción masiva:

- Costo inicial: Aunque decreciente, aún significativo para pequeños productores;
- Complejidad de calibración: Requiere muestreo representativo y mantenimiento;
- Velocidad vs. Precisión: Compromiso en sistemas de alta velocidad;
- Variabilidad natural: Adaptación a diferencias entre cultivos, variedades, condiciones;
- Infraestructura de datos: Necesidad de conectividad y procesamiento robusto.

Áreas de investigación activa:

- Reducción de tiempo de adquisición: Técnicas de compresión espectral;
- Estandarización de protocolos: Metrología para agricultura de precisión;
- Fusión de datos multi-fuente: Integración satélite/drones/suelo;
- Modelos físicos interpretables: Más allá de "cajas negras" de IA.

Casos de éxito y aplicaciones comerciales:

Ejemplos industriales implementados:

- Clasificación de manzanas por dulzura: Sistemas NIRS hiperespectral en líneas de empaque (Unión Europea, EE.UU.);
- Detección de daño por congelación en cítricos: Termografía + NIR (España, Israel);
- Selección de aguacates por madurez: MRI portátil para mercado de alto valor (México, Perú);
- Robots cosechadores con retroalimentación táctil: Para frutas delicadas (Japón, Países Bajos);

ROI documentado:

- Reducción de merma: 15-30% en frutas perecederas;
- Incremento en valor de producto: 20-50% por clasificación Premium;

- Ahorro en mano de obra: 40-70% en labores de inspección;
- Optimización de recursos: 10-25% en agua, fertilizantes, energía.

Perspectivas futuras (2025-2035):

Tendencias emergentes:

- Sensores cuánticos: Espectroscopía de terahercios para análisis molecular;
- Nanosensores implantables: Para monitorización continua dentro de plantas;
- Realidad aumentada: Superposición de datos sensoriales en campo;
- Blockchain de calidad: Registro inmutable de atributos medidos;

Escalabilidad esperada:

- Reducción adicional de costos: 30-50% en próximos 5 años;
- Automatización completa: Sistemas autocalibrantes y autodiagnósticos;
- Integración vertical: Del campo al consumidor con datos continuos;
- Democratización global: Acceso para pequeños y medianos productores.

Hoy existe una amplia gama de dispositivos portátiles, asequibles y de fácil uso, dentro de los cuales se pueden mencionar:

- Medición de Clorofila y "Verdor": Dispositivos como el medidor de clorofila portátil (ejemplo: rango 0.0-99.9 SPAD) permiten evaluar el estado nutricional y de salud de la planta, correlacionándose directamente con su potencial fotosintético y rendimiento. Estas herramientas ofrecen lecturas en menos de 3 segundos y son lo suficientemente compactas para su uso diario en el campo.
- Análisis de Sólidos Solubles ($^{\circ}$ Brix): Los refractómetros, instrumentos ópticos para medir azúcares, son fundamentales para determinar el momento óptimo de cosecha en frutas y hortalizas. Los modelos digitales portátiles han simplificado enormemente esta tarea, ofreciendo compensación automática de temperatura y una precisión comparable a la de equipos de laboratorio, pero con un costo y una curva de aprendizaje radicalmente menores.
- Análisis integral de suelos y savia: Kits portátiles permiten medir múltiples parámetros simultáneamente. Un ejemplo es el kit de sensores LAQUAtwin, que puede medir pH, conductividad eléctrica (CE), nitratos (NO_3), calcio (Ca), potasio (K) y sodio (Na) en extractos de savia o suelo, con una precisión del 90-95% frente a la cromatografía iónica.

Esto convierte al agricultor en su propio analista de nutrición vegetal.

La robótica agrícola está pasando de ser un concepto futurista y de alto costo a una solución práctica para problemas acuciantes. Su adopción ya no se cuestiona, sino que se centra en el "cómo" y el "cuándo" integrarla de forma rentable. El despliegue de robots se ve acelerado por una tormenta perfecta de factores:

- Crisis laboral: La escasez y el encarecimiento de la mano de obra, que puede representar hasta el 38% de los costos de producción en frutales, hacen de la automatización una necesidad económica, no solo una opción tecnológica.
- Madurez tecnológica habilitadora: La combinación de visión artificial con IA, sensores avanzados (LiDAR, multispectrales) y sistemas de navegación autónoma (GNSS RTK centimétrico) ha resuelto los principales desafíos técnicos para operar en entornos agrícolas complejos y no estructurados.
- Modelos de negocio y reducción de costos: La fabricación a mayor escala, la competencia entre proveedores y el surgimiento de modelos de "Robots como Servicio (RaaS)" están reduciendo la barrera de entrada de capital. Las proyecciones indican que la robótica puede reducir los costos de cosecha entre un 30% y un 50%.

De acuerdo con [Tramallino y Zeni \(2024\)](#), el avance de la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático se caracteriza por:

- IA como cerebro del ecosistema de datos enmarcado en el siguiente contexto:
- La proliferación de sensores (IoT) genera volúmenes masivos de datos;
- Los datos sin procesamiento inteligente son solo "ruido";

La IA como sistema nervioso central:

- Integra datos heterogéneos;
- Aprende patrones complejos;
- Toma decisiones autónomas.

Estos sistemas tienen innumerables aplicaciones en la industria y la agricultura tales como:

- Mantenimiento predictivo en aerogeneradores usando datos de vibración + modelos híbridos;
- Detección de defectos imperceptibles para el ojo humano;
- Control de calidad: Detección de grietas en piezas fundidas;
- Predecir fallos antes de que ocurran;
- Detección de defectos en capas internas entre otros.

Resumiendo: se ha podido constatar en este trabajo que las tendencias predominantes de los métodos y tecnologías para el análisis de las variables poscosecha de productos agrícolas están relacionadas con la utilización de: Internet de las Cosas (IoT), Sensores, Drones, Comunicaciones por Satélite IoT y Plataformas IoT Especializadas.

Análisis

En Cuba hasta el presente muy pocas de estas tecnologías son utilizadas a nivel de campo, sin embargo, a nivel de proyectos de investigación; así como en algunas Universidades y centros de investigación se dan los primeros pasos. En este sentido el censado remoto de la salinidad de suelos [García et al. \(2021\)](#), la humedad de los suelos, el potencial de nutrientes de diferentes suelos y cultivos, los daños por impacto en productos agrícolas han sido estudiado en años recientes con diferentes técnicas tales como: las técnicas VIS-NIR por diferentes autores. Actualmente, la utilización de drones para la aplicación de fertilizantes y la introducción de paneles solares para el riego y secado de productos agrícolas son algunas de las tendencias actuales en Cuba hoy. En las nuevas tecnologías del manejo y tratamiento poscosecha de productos agrícolas, la literatura que trata el tema es prioritariamente internacional y pocas referencias bibliográficas de nuestro país aportan al tema de análisis en este trabajo. Se debe destacar que estas tecnologías se pueden considerar maduras y en otros casos, en proceso de maduración, sin embargo, a nuestro criterio, la limitante en este sentido es su alto precio o valor, pero en este caso siempre que se piense en la introducción de algunas de estas, lo primero a realizar será un análisis de factibilidad económica para delimitar en qué contexto pueden ser utilizadas inmediatamente y en cuáles no.

El desarrollo de cada una de estas técnicas de manipulación y tratamiento poscosecha de productos agrícolas se basan en protocolos y normas, nacionales e internacionales, las cuales son de estricto cumplimiento de acuerdo con las leyes de cada país; sin embargo, se hace necesario constar con la capacitación y el equipamiento suficiente para poder decidir cuál de ellas es más racional. En el caso cubano, esto es posible y factible ya que se cuenta con ambas premisas.

Como se puede observar en las condiciones actuales y futuras, un amplio espectro de posibilidades para la medición, monitoreo, control y trazabilidad de los productos agrícolas cosechados y por cosechar se abren paso día a día. De aquí la importancia de mantenerse informado y preparado para la aplicación de todas o algunas de estas tecnologías en dependencia de las condiciones objetivas económicas-financieras de cada país para su implementación. A criterio del autor, la fortaleza fundamental de esta investigación consiste en brindar a los investigadores y a los productores en el manejo y tratamiento poscosecha de productos agrícolas,

un compendio de los principales métodos y tecnologías actuales y futuras necesarias para la investigación y aplicación de resultados a nivel productivo en el marco de sus posibilidades tecnológicas y financieras.

CONCLUSIONES

La miniaturización y democratización de la tecnología está reconfigurando el panorama agrícola, acercando las herramientas de la agricultura de precisión a una base mucho más amplia de productores. Los espectrómetros y sensores portátiles han convertido la medición precisa de parámetros clave en una rutina rápida, económica y en el campo, desplazando a los laboratorios tradicionales para numerosas aplicaciones. Paralelamente, la robótica agrícola está superando la fase piloto para consolidarse como una respuesta tangible y cada vez más accesible a los retos de costos laborales, calidad y trazabilidad. La sinergia entre el internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y la computación en tiempo real no es una tendencia futura, sino una realidad operativa actual. La integración de estas tecnologías está creando ecosistemas industriales donde:

- Los sensores son los sentidos que capturan la realidad física.
- La inteligencia artificial (IA) es el cerebro que interpreta y comprende.
- Los modelos predictivos son la intuición que anticipa.

La calibración en tiempo real es el aprendizaje continuo que adapta.

Las herramientas y algoritmos están disponibles, accesibles y probados.

La transición hacia sistemas de censado no destructivo 100% representa un cambio paradigmático con implicaciones profundas:

- Económicas: Maximización del valor y reducción de pérdidas;
- Ambientales: Optimización de insumos y sostenibilidad;
- Sociales: Trazabilidad y transparencia para consumidores;
- Científicas: Nueva comprensión de procesos biológicos.

Las tecnologías descritas (NIRS hiperespectral, termografía, MRI/CT portátil, sensores táctiles) no son tecnologías de futuro, sino realidades implementadas que se están perfeccionando y democratizando. Su convergencia con inteligencia artificial (IA), robótica y ciencia de datos está creando un ecosistema de agricultura de precisión que transformará radicalmente cómo producimos, procesamos y garantizamos la calidad de los alimentos.

El futuro es no destructivo, cuantitativo y total. La capacidad de "ver lo invisible" y "medir sin tocar" está redefiniendo los estándares de calidad y eficiencia en la cadena agroalimentaria global.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHEN, Y.: "A comprehensive review of IoT-based monitoring systems for postharvest quality management", *Computers and Electronics in Agriculture*, 205: 107584, 2023.
- DENTONI, D.: "Blockchain and Other Emerging Technologies for Food Traceability", *Revista Internacional Administración & Finanzas*, 7(5): 61-76., 2021.
- FERRÁNDEZ, F.J.: *IoT and Smart Technologies for Sustainable Agriculture*, MDPI Books ed., 2022.
- GARCÍA, R.A.; POSADA, M.D.G.; TORRES, K.; VILLAZÓN, J.A.; ABELLÓN, M.I.; VELÁZQUEZ, E.C.: "Remote Sensing of Salinity in Agroecosystem of Mayarí, at Holguín Province, Cuba", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(1): 26-32, 2021, ISSN: 1010-2760.
- JAFARBIGLU, H.; POURREZA, A.: *Unmanned Aerial Systems in Precision Agriculture*, Ed. Elsevier., 2022.
- KADER, A.A.: *Postharvest technology of horticultural crops.*, 2002, ISBN: 1-879906-51-1.
- KAMILARIS, A.: "A review of the combination of IoT, blockchain and AI for sustainable food supply chains", *IEEE Internet of Things Journal*, 10(5): 3871-3890, 2023.
- KUSSUL, N.: *Deep Learning for Satellite Image Analysis*, Springer, 2022.
- LAMBERT, M.J.: "Satellite-based verification of geographical origin for high-value agricultural products", *Food Control*, 133: 108621, 2022.
- MUKHOPADHYAY, S.C.; POSTOLACHE, O.A.: *Internet of Things for Agricultural Applications*, Springer, 2021.
- PETROPOULOS, G.P.; SRIVASTAVA, P.K.: *Satellite Remote Sensing of Agricultural Land*, Elsevier, 2023.
- PRITT, M.; CHERN, G.: "Satellite image classification with deep learning", En: *2017 IEEE applied imagery pattern recognition workshop (AIPR)*, Ed. IEEE, pp. 1-7, 2017, ISBN: 1-5386-1235-6.
- RUIZ, L.: "Low-cost IoT-based sensor system for real-time monitoring of fruit cold chain", *IEEE Sensors Journal*, 22(5): 4223-4232, 2022.
- THENKABAIL, P.S.: *Remote Sensing of Agriculture and Land Cover/Land Use Changes*, CRC Press, 2021.
- THENKABAIL, P.S.; LYON, J.G.: *Drone Technology in Agriculture: Principles and Applications*, CRC Press, 2023.
- THOMPSON, A.K.: *Fruit and vegetable storage: hypobaric, hyperbaric and controlled atmosphere*, Ed. Springer, 2015, ISBN: 3-319-23591-5.
- TRAMALLINO, C.P.; ZENI, A.M.: "Avances y discusiones sobre el uso de inteligencia artificial (IA) en educación", *Educación*, 33(64): 29-54, 2024.
- TRIPICCHIO, P.: "Towards smart farming and sustainable agriculture with drones", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, ser. IoT and AI, 71: 1-11, 2022.
- VALENTE, J.: *Robotics and Automation for Improving Agriculture*, Burleigh Dodds Science Publishing, 2021.
- WEISS, M.: "Remote sensing for agricultural supply chain traceability: A review", *Remote Sensing of Environment*, 284: 113338, 2023.
- ZHANG, C.: "Automatic detection of postharvest fruit defects using drone-based multispectral imaging", *Precision Agriculture*, 23(3): 987-1005, 2022.
- ZHANG, Q.: *Internet of Things for Smart Agriculture: Technologies and Applications*, Springer, 2023.