
**Desarrollo de un sistema de inteligencia artificial
para la clasificación de cítricos por color, defecto y
tamaño en ambiente industrial**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
P R E S E N T A

ÁNGEL DAGOBERTO CANTÚ CASTRO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. YAHIR HERNÁNDEZ MIER

CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. MARCO AURELIO NUÑO MAGANDA

La tesis presentada por ÁNGEL DAGOBERTO CANTÚ CASTRO fue aprobada por:

DR. YAHIR HERNÁNDEZ MIER, Director

DR. MARCO AURELIO NUÑO MAGANDA, Co-Director

Cd. Victoria, Tamaulipas, México, 19 de Septiembre de 2026

Desarrollo de un sistema de inteligencia artificial para la clasificación de cítricos por color, defecto y tamaño en ambiente industrial

ÁNGEL DAGOBERTO CANTÚ CASTRO, 2026

La presente investigación aplica los conocimientos de control para automatizar un sistema hidropónico de técnica de flujo profundo de manera eficiente. El estudio se enfoca en la implementación de un controlador difuso para reducir la intervención humana y minimizar errores, apoyándose en el internet de las cosas para monitorear las variables de interés en los sistemas hidropónicos: el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura y la humedad del aire de los cultivos. Se explora el diseño y construcción de un sistema hidropónico con actuadores y sensores adecuados para ajustar los parámetros de interés en tiempo real en el desarrollo de los cultivos. También, se diseña e integra un controlador difuso para la toma de decisiones con interfaces de usuario y de monitoreo. Se muestran además los resultados de experimentos realizados con el controlador difuso para compensar perturbaciones en las distintas variables monitoreadas dentro del sistema hidropónico construido. Igualmente, se aborda la viabilidad económica de la implementación de tecnologías automatizadas, considerando tanto los costos iniciales como los ahorros a largo plazo. Como trabajo complementario relacionado, se propuso un prototipo basado en visión por computadora que permitirá monitorear el crecimiento de las plantas en el sistema hidróponico, el cual será de utilidad para quien esté encargado de controlar dicho crecimiento de manera remota. Los resultados experimentales muestran que el controlador implementado permite compensar las perturbaciones introducidas durante el funcionamiento del sistema, lo que confirma su viabilidad de su aplicación en el control automático de sistemas hidropónicos de técnica de flujo profundo. El sistema de monitoreo propuesto efectivamente almacena y permite observar en tiempo real por medio de las interfaces en PC y teléfono móvil el comportamiento de las variables importantes para el sistema.

IMPLEMENTATION OF A DEEP FLOW TECHNIQUE HYDROPONIC SYSTEM CONTROLLED BY FUZZY LOGIC AND MONITORED USING INTERNET OF THINGS

ÁNGEL DAGOBERTO CANTÚ CASTRO, 2026

The present research applies control knowledge to automate a deep flow technique hydroponic system. The study focuses on the implementation of a fuzzy controller to reduce human intervention and minimize errors, relying on the Internet of Things to monitor the variables of interest in hydroponic systems: pH, electrical conductivity, temperature and humidity of the air of crops. The design and construction of a hydroponic system with actuators and sensors suitable for adjusting the parameters of interest in the development of crops in real time is explored. A fuzzy controller for decision making with user and monitoring interfaces is designed and integrated. The results of experiments carried out with the fuzzy controller to compensate for disturbances in the different variables monitored within the constructed hydroponic system are also shown. Likewise, the economic viability of the implementation of automated technologies is addressed, considering both the initial costs and the long-term savings. As a related complementary work, a prototype based on computer vision was proposed that will allow monitoring the growth of plants in the hydroponic system, which will be useful for whoever is in charge of controlling such growth in a remote way. The experimental results show that the implemented controller allows to compensate for the disturbances introduced during the operation of the system, which confirms its viability of its application in the automatic control of hydroponic systems of deep flow technique. The proposed monitoring system effectively stores and allows to observe in real time through the interfaces on PC and mobile phone the behavior of the important variables for the system.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por haberme acompañado en esta gran aventura mi maestría, por ser mi gran fortaleza y brindarme una vida llena de aprendizajes, increíbles experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy sobre todo las gracias a mis padres Domingo y Juana por apoyarme incondicionalmente en todo momento, por inculcarme los valores, y haberme dado la oportunidad de tener mi educación a posgrado en el transcurso de mi vida tal vez unos ya no estén físicamente pero aun así fueron y serán mi mayor ejemplo a seguir.

A mis hermanos Eugenio por ayudarme y aconsejarme en todo lo posible y hasta lo imposible, a Sabina por ser mi alegría en todo momento.

A mis grandes amigos y compañeros que estuvieron para mí y brindarme su confianza y creer en mí, y hacer mi etapa posgrado una experiencia que jamás podría repetirse.

Le agradezco de corazón por el apoyo y dedicación de su tiempo a mis profesores por haber compartido conmigo muchas partes de su conocimiento y sobre todo su amistad Dr. Said, Dr. Pech, Dr. Benjamin y Dr. Rocha.

Gracias a mi director de tesis el Dr. Nuño y mi co-director Dr. Yahir por creer en mí, y haberme brindado la oportunidad de desarrollar mi tesis de posgrado en base a sus enseñanzas.

Mamaina Sabina Castillo Rodríguez que, aunque ya no te encuentres con nosotros físicamente a ti te lo agradezco todo tú fuiste mi más grande ejemplo inigualable por creer en mi hasta los últimos momentos.

Índice General

Resumen	III
Abstract	VI
Nomenclatura	XVI
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Justificación	3
1.5. Diseño de investigación	4
1.5.1. Pregunta de investigación	5
1.5.2. Hipótesis	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Importancia del cítrico <i>Citrus limon</i> en México	7
2.2. Clasificación de cítricos en procesos industriales	7
2.3. Visión por computadora en la agricultura de precisión	7
2.4. Procesamiento digital de imágenes para inspección de frutas	8
2.5. Segmentación y detección de defectos en cítricos	8
2.6. Redes neuronales profundas aplicadas a clasificación de frutas	8
2.7. Integración de sistemas inteligentes en líneas de producción	9
2.8. Beneficios de la implementación de sistemas de IA en la clasificación de cítricos . . .	9

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Nomenclatura

ACHPA	Automatically Controlled Hydro-Ponic Agriculture
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
BGR	Blue Green Red
CE	Conductividad Eléctrica
DFT	Deep Flow Technique
DRFT	Dynamic Root Floating Technique
HSV	Hue Saturation Value
Hp	Horsepower
IoT	Internet of Things
MicroSD	Micro tarjeta de memoria Secure Digital
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NFT	Nutrient Film Technique
OD	Oxígeno Disuelto
pH	Potencial de Hidrógeno
PIB	Producto Interior Bruto
Pi OS	Sistema Operativo recomendado para la computadora Raspberry Pi
PLC	Programmable Logic Controller
PVC	Polyvinyl Chloride
PMW	Pulse Width Modulation
USB	Universal Serial Bus

1

Introducción

La creciente demanda de productos agrícolas de alta calidad ha impulsado el desarrollo de tecnologías automatizadas capaces de optimizar los procesos de selección y clasificación en el sector agrícola. En la industria citrícola esta el reto de clasificar grandes volúmenes de frutas en función de características como color, tamaño y defectos, con el objetivo de garantizar estándares de calidad en los mercados nacionales e internacionales.

Por lo tanto en este proyecto se tiene como finalidad el desarrollo de un sistema de inteligencia artificial capaz de clasificar cítricos de manera precisa y eficiente en un entorno industrial. El sistema propuesto estará basado en el entrenamiento de algoritmos de aprendizaje profundo que, a partir de un conjunto de imágenes recolectadas y etiquetadas, aprenderán a identificar patrones visuales que permitan determinar el estado y la calidad de cada fruto.

Para la propuesta ya se cuenta con el diseño y construcción de la estructura física necesaria para la adquisición de datos y la integración de sensores y actuadores industriales, así también se hará uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes para mejorar la extracción de las características necesarias para cada clasificación. El sistema deberá operar con una exactitud superior al 95 %, con lo cual ya sería posible su aplicación real en líneas de producción automatizadas.

Las investigaciones de sistemas de clasificación de frutas, no es un tema reciente o nuevo mas sin embargo su implementación en un ambiente industrial y la experimentación con diferentes tipos de algoritmos desde enfoques clásicos hasta modelos basados en redes neuronales convolucionales y la implementación final en una minicomputadora adaptada al sistema físico existente es una combinación de varias clasificaciones en un mismo sistema.

Con este desarrollo, se busca no solo mejorar la eficiencia del proceso de clasificación, sino también demostrar la viabilidad de aplicar soluciones de inteligencia artificial en la automatización de tareas agrícolas, contribuyendo así al avance tecnológico del sector.

1. Introducción

1.1 Motivación

La agricultura representa uno de los pilares fundamentales de la economía en México, y particularmente en el estado de Tamaulipas, donde se concentra una producción significativa de cítricos como limones, naranjas y toronjas. Esta actividad agrícola no solo sostiene a miles de familias, sino que también abastece mercados nacionales e internacionales.

Uno de los principales desafíos que enfrenta la industria citrícola es la necesidad de clasificar grandes volúmenes de fruta con alta precisión, minimizando la intervención humana y maximizando la eficiencia en tiempo real. Esta necesidad va en aumento debido a la competencia del mercado global, los efectos del cambio climático sobre la producción y la variabilidad en la calidad de los frutos cosechados.

La motivación de este proyecto radica en la aplicación de inteligencia artificial y procesamiento digital de imágenes como herramientas innovadoras para transformar el proceso de clasificación tradicional en un sistema automatizado, confiable y escalable. Mediante el diseño e implementación de un algoritmo inteligente capaz de detectar características visuales como el color, los defectos y el tamaño de los cítricos, se busca dar una solución adaptable al entorno industrial, reduciendo errores humanos, aumentando la productividad y asegurando la calidad final del producto.

1.2 Planteamiento del problema

Ajustar referencias

Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), México se posiciona entre los principales productores de cítricos a nivel mundial, siendo estados como Veracruz, Tamaulipas y San Luis Potosí actores clave en esta industria. Particularmente, Tamaulipas ha mantenido una producción significativa de cítricos que abastece tanto al mercado interno como al de exportación. Sin embargo, esta cadena productiva enfrenta diversos retos que limitan su eficiencia, entre ellos la variabilidad en la calidad del fruto, la dependencia de mano de obra para procesos de selección y empaque, y la necesidad de cumplir con estándares internacionales de clasificación.

La creciente demanda de cítricos de alta calidad y el incremento de los costos laborales han ocasionado la necesidad de modernizar los sistemas tradicionales de clasificación. A esto se suman los efectos del cambio climático, que afectan la homogeneidad de los cultivos y generan frutas con mayores variaciones en color, tamaño y defectos físicos, dificultando su procesamiento eficiente en entornos industriales. Por lo tanto, las empresas productoras se ven obligadas a buscar soluciones automatizadas y precisas que optimicen la clasificación de los frutos, reduzcan el margen de error humano y mejoren la competitividad en los mercados.

Actualmente, en muchas empacadoras y centros de distribución, el proceso de selección de cítricos sigue siendo manual o semi-automatizado, lo cual no solo limita la velocidad de procesamiento, sino que también incrementa los costos y la probabilidad de errores. Esta problemática abre una ventana de oportunidad para la implementación de tecnologías de inteligencia artificial, visión por computadora y procesamiento digital, que permitan desarrollar sistemas inteligentes capaces de identificar con precisión las características externas del fruto.

Por ello, surge la necesidad de desarrollar un sistema eficiente, adaptable a entornos industriales, que sea capaz de clasificar los cítricos en función de sus propiedades visuales como el color, los defectos en la cáscara y su tamaño, utilizando algoritmos de aprendizaje profundo entrenados con imágenes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema basado en inteligencia artificial capaz de clasificar cítricos por color, defectos y tamaño en un entorno industrial, mediante el uso de procesamiento digital de imágenes, algoritmos de aprendizaje profundo y su integración con sensores y actuadores físicos en una estructura automatizada.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Recolectar y etiquetar un conjunto de imágenes de cítricos que presenten variaciones en color, tamaño y defectos visibles.
2. Desarrollar e implementar modelos de aprendizaje profundo, comparando su desempeño con algoritmos clásicos, para la detección automática de las características relevantes de los cítricos.
3. Programar e integrar el algoritmo entrenado en una minicomputadora que controle el sistema de clasificación de forma autónoma en tiempo real.
4. Desplegar una interfaz gráfica y un sistema de monitoreo para visualizar los resultados del proceso de clasificación y los parámetros relevantes del sistema.
5. Evaluar el desempeño del sistema haciendo un análisis de datos.
6. Alcanzar un nivel de precisión mayor al 95 % en las tareas de clasificación en condiciones controladas de ambiente industrial.

1.4 Justificación

La automatización de procesos en el sector agroindustrial se ha convertido en una necesidad estratégica para mejorar la productividad, reducir los costos operativos y garantizar estándares de calidad exigidos por el mercado. En particular, la industria citrícola, ampliamente desarrollada en estados como Tamaulipas, enfrenta grandes retos en sus procesos de selección y clasificación de fruta, los cuales tradicionalmente dependen de la inspección visual humana, propensa a errores, baja eficiencia y altos costos laborales.

La implementación de sistemas inteligentes basados en inteligencia artificial y procesamiento de imágenes representa una solución innovadora, escalable y con un gran potencial de impacto. Estos sistemas permiten analizar imágenes en tiempo real para identificar características como el

1. Introducción

color, tamaño y defectos externos de los cítricos, con una precisión superior al 95 %, mejorando significativamente la consistencia y calidad del producto final.

Además, el desarrollo de este proyecto ofrece múltiples ventajas:

- **Reducción de costos operativos**, al disminuir la necesidad de mano de obra en procesos repetitivos de inspección.
- **Incremento en la velocidad de clasificación**, lo que permite manejar mayores volúmenes de producción en menos tiempo.
- **Adaptabilidad a diferentes tipos de cítricos**, mediante el reentrenamiento del algoritmo con nuevas imágenes.
- **Escalabilidad y fácil integración** en líneas de producción existentes mediante el uso de hardware accesible como minicomputadoras y sensores industriales.

Este proyecto no solo busca resolver una problemática técnica con impacto directo en el proceso de clasificación de cítricos, sino también sentar las bases para futuras investigaciones aplicadas en la industria agricultura.

1.5 Diseño de investigación

El desarrollo de esta investigación exige una planificación estructurada y precisa en torno a los objetivos planteados, así como una metodología que permita validar experimentalmente el desempeño del sistema propuesto. Por ello, se ha optado por un enfoque cuantitativo, dado que el estudio busca medir, analizar y comparar el rendimiento de algoritmos de clasificación basados en inteligencia artificial aplicados a imágenes de cítricos.

Este enfoque permite establecer de manera objetiva las métricas de evaluación, tales como precisión, exactitud, sensibilidad y especificidad, necesarias para determinar la eficacia del modelo entrenado en condiciones controladas. Además, el proceso contempla la integración del sistema con componentes físicos como sensores, cámaras y actuadores, lo cual requiere un análisis cuantificable del desempeño del hardware y la interacción entre los elementos del sistema.

El diseño de la investigación es de tipo experimental, ya que implica la manipulación directa de variables independientes, como el tipo de algoritmo, los parámetros de entrenamiento, o la calidad de imagen, para observar su impacto en la variable dependiente: la precisión del sistema de clasificación. Las pruebas serán realizadas utilizando un conjunto de datos recolectado en condiciones reales de producción, lo cual garantiza la validez del estudio para aplicaciones industriales.

El plan de trabajo incluye etapas bien definidas como: la revisión del estado del arte, la adquisición y preprocesamiento del dataset, el diseño del sistema físico y su integración con el modelo de inteligencia artificial, la validación del rendimiento y la documentación de resultados. A su vez, se consideran herramientas de análisis estadístico para comparar los resultados entre distintos modelos implementados, y se aplicarán estándares técnicos que aseguren la reproducibilidad de las pruebas. Cabe destacar que hasta el momento se ha avanzado en aproximadamente un 30 % del proyecto, lo cual incluye la estructuración física preliminar del sistema, la evaluación de sensores y cámaras

adecuados, la definición del cronograma de trabajo y el diseño de los instrumentos necesarios para la recolección y etiquetado de imágenes. En conjunto, este diseño de investigación permite abordar de manera rigurosa los objetivos tanto generales como específicos, asegurando una base sólida para el desarrollo de un sistema eficiente, confiable y adaptable al entorno industrial real.

1.5.1 Pregunta de investigación

- ¿Es posible implementar un sistema basado en inteligencia artificial capaz de clasificar con precisión industrial los cítricos según su madurez, presencia de defectos y tamaño?

1.5.2 Hipótesis

- La implementación de un sistema de clasificación automatizada basado en inteligencia artificial permite identificar con una precisión superior al 95 % las características de madurez, presencia de defectos y tamaño de cítricos en un entorno industrial, mediante el uso de redes neuronales entrenadas con procesamiento digital de imágenes.

2.1 Importancia del cítrico *Citrus limon* en México

México se posiciona como uno de los principales productores de cítricos a nivel mundial, y el estado de Tamaulipas destaca como una de las regiones con mayor volumen de producción de limón (*Citrus limon*). Este cultivo tiene un impacto económico significativo tanto en el consumo interno como en la exportación, especialmente hacia los mercados de Estados Unidos y Europa [1].

Según estudios recientes, la calidad visual del fruto —en términos de madurez, tamaño y presencia de defectos visibles— es un factor determinante para su aceptación en el mercado internacional. De ahí la necesidad de implementar sistemas de inspección automatizados que permitan mejorar la eficiencia, precisión y trazabilidad del proceso de clasificación [2].

2.2 Clasificación de cítricos en procesos industriales

Los sistemas industriales de clasificación, como las máquinas Sunkist, realizan procesos de separación de fruta en función de parámetros visuales. Tradicionalmente, estos parámetros han sido evaluados mediante sensores simples o inspección humana, pero esto ha demostrado ser insuficiente frente a los altos volúmenes de procesamiento y los estándares de exportación actuales [3].

La implementación de sistemas inteligentes que integren procesamiento digital de imágenes con redes neuronales profundas permite abordar esta problemática de manera precisa y en tiempo real, especialmente cuando se aplican sobre líneas de producción ya existentes [4].

2.3 Visión por computadora en la agricultura de precisión

La visión por computadora es una rama de la inteligencia artificial que permite interpretar imágenes digitales para extraer información significativa. En el contexto agroindustrial, ha sido aplicada con éxito en tareas como detección de madurez, identificación de plagas y clasificación por tamaño y calidad [5].

2. Marco Teórico

El uso de imágenes RGB, procesadas mediante algoritmos de segmentación y extracción de características, permite la generación de representaciones visuales que pueden alimentar modelos de aprendizaje automático para la clasificación automática de frutas [6].

2.4 Procesamiento digital de imágenes para inspección de frutas

El procesamiento digital de imágenes es una herramienta fundamental para analizar características visuales de los frutos en entornos industriales. Este procesamiento permite aplicar operaciones como la conversión de color, filtrado, umbralización y detección de bordes, para facilitar la extracción de información relevante que servirá como entrada a modelos de clasificación [7].

En aplicaciones agroindustriales, la combinación de segmentación por bordes y análisis de color en imágenes RGB ha demostrado ser efectiva para separar el fruto del fondo, identificar regiones dañadas y calcular medidas como área proyectada o proporciones entre ancho y alto [8]. Estas características son especialmente útiles para detectar defectos físicos y evaluar la madurez del cítrico.

2.5 Segmentación y detección de defectos en cítricos

La segmentación de imágenes es una etapa crítica que consiste en dividir la imagen en regiones homogéneas con base en propiedades como color, textura o forma. Entre las técnicas más utilizadas para frutas se encuentran la segmentación basada en umbral adaptativo, la segmentación por bordes y la segmentación semántica mediante redes neuronales profundas [9].

En el caso de cítricos como el limón, estudios han demostrado que es posible identificar defectos como manchas, magulladuras o cicatrices mediante la combinación de técnicas tradicionales de visión por computadora con aprendizaje profundo [10]. El uso de algoritmos robustos de segmentación mejora considerablemente la precisión de los modelos de clasificación al reducir el ruido y enfocar el análisis únicamente en el fruto.

2.6 Redes neuronales profundas aplicadas a clasificación de frutas

Las redes neuronales convolucionales (CNN) han sido ampliamente aplicadas en tareas de clasificación de frutas debido a su capacidad para aprender características visuales jerárquicas de manera automática. Modelos como VGG16, MobileNetV2, EfficientNet y ResNet han mostrado resultados sobresalientes en tareas de clasificación multiclase y detección de defectos superficiales en frutas [11], [12].

Estos modelos pueden ser entrenados con imágenes RGB obtenidas directamente de la línea de producción, permitiendo una clasificación precisa en tiempo real. Además, mediante técnicas como

el fine-tuning y el aprendizaje transferido, es posible adaptar modelos preentrenados en grandes bases de datos a conjuntos de datos específicos, como en este caso con imágenes propias de limón.

El uso de redes neuronales en ambientes industriales requiere también considerar aspectos computacionales y de hardware, por lo que se han utilizado herramientas como TensorFlow, Keras y Scikit-learn, integradas en sistemas embebidos o minicomputadoras, permitiendo implementar soluciones eficientes, portables y escalables [13].

2.7 Integración de sistemas inteligentes en líneas de producción

La integración de modelos de inteligencia artificial en líneas industriales de clasificación de frutas requiere un enfoque multidisciplinario que combine visión por computadora, procesamiento de datos, control automático e interfaces físicas con sensores y actuadores. En el caso de los cítricos, muchas empacadoras utilizan maquinaria especializada como las clasificadoras Sunkist, las cuales pueden ser mejoradas mediante la incorporación de sistemas de inspección inteligente que operen en tiempo real [14].

Una arquitectura típica incluye cámaras RGB para adquisición de imágenes, sistemas de iluminación controlada, procesamiento embebido en minicomputadoras (como Jetson Nano o Raspberry Pi), y mecanismos de retroalimentación conectados a los actuadores existentes. Esta integración permite aumentar la precisión del proceso de clasificación, reducir el error humano, y adaptarse rápidamente a cambios en las condiciones del fruto o en los estándares de exportación [15].

Además, la incorporación de un sistema supervisado por operadores humanos con capacidad de intervención mejora la usabilidad y confiabilidad del sistema, haciendo que su adopción en entornos reales sea más viable y segura [16].

2.8 Beneficios de la implementación de sistemas de IA en la clasificación de cítricos

El uso de redes neuronales profundas y visión por computadora en el proceso de clasificación de cítricos ofrece múltiples beneficios:

- *Mejora en la precisión de clasificación:* los modelos de IA pueden alcanzar niveles de precisión superiores al 95 %, superando la clasificación visual humana en consistencia y rapidez.
- *Reducción de costos operativos:* al automatizar el proceso, se disminuye la dependencia de mano de obra intensiva.
- *Incremento en la velocidad de procesamiento:* los sistemas inteligentes pueden trabajar a la misma velocidad que la línea de producción sin interrupciones.
- *Escalabilidad y adaptabilidad:* la arquitectura del sistema puede reentrenarse para otros tipos de fruta o defectos específicos sin necesidad de rediseñar la infraestructura.

2. Marco Teórico

- *Trazabilidad y análisis de datos*: se pueden almacenar registros visuales y analíticos de cada fruto procesado para fines de calidad y auditoría.

Estos beneficios respaldan la transición hacia una agricultura inteligente e industrializada, donde la inteligencia artificial actúa como catalizador para mejorar la competitividad, sostenibilidad y eficiencia del sector agroalimentario.

Bibliografía

- [1] FAO, «FAOSTAT: Food and Agriculture Data,» Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020, Available at <https://www.fao.org/faostat/en/>.
- [2] E. Vidal y J. e. a. Castro, «Deep learning-based lemon quality classification using hyperspectral imaging,» Biosystems Engineering, vol. 203, págs. 145-156, 2021. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2021.01.005](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.01.005).
- [3] M. Arias y D. Salazar, «Integration of AI in citrus packing lines: industrial challenges and benefits,» Computers and Electronics in Agriculture, vol. 195, pág. 106 830, 2022. DOI: [10.1016/j.compag.2022.106830](https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106830).
- [4] H. Masuda y K. Takahashi, «AI-based inspection system for citrus defect detection in real-time industrial environments,» Journal of Food Engineering, vol. 282, pág. 110 032, 2020. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2020.110032](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110032).
- [5] A. Kamilaris y F. X. Prenafeta-Boldú, «Deep learning in agriculture: A survey,» Computers and Electronics in Agriculture, vol. 147, págs. 70-90, 2018. DOI: [10.1016/j.compag.2018.02.016](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016).
- [6] J. Peña y L. Moreno, «Automatic fruit classification using convolutional neural networks and real-time embedded systems,» Sensors, vol. 21, n.º 5, pág. 1656, 2021. DOI: [10.3390/s21051656](https://doi.org/10.3390/s21051656).
- [7] K. Zuiderveld, «Contrast limited adaptive histogram equalization,» págs. 474-485, 1994. DOI: [10.1016/B978-0-12-336155-4.50065-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-336155-4.50065-6).
- [8] Q.-H. Nguyen y D.-T. Duong, «An automated citrus sorting system using computer vision and artificial intelligence,» Computers and Electronics in Agriculture, vol. 186, pág. 106 180, 2021. DOI: [10.1016/j.compag.2021.106180](https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106180).
- [9] S. Minaee et al., «Image segmentation using deep learning: A survey,» IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 44, n.º 7, págs. 3523-3542, 2021. DOI: [10.1109/TPAMI.2021.3059968](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3059968).
- [10] J. G. A. Barbedo, «Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning,» Computers and Electronics in Agriculture, vol. 161, págs. 12-20, 2019. DOI: [10.1016/j.compag.2018.03.030](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.030).
- [11] S. P. Mohanty, D. P. Hughes y M. Salathé, «Using deep learning for image-based plant disease detection,» Frontiers in Plant Science, vol. 7, pág. 1419, 2016. DOI: [10.3389/fpls.2016.01419](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419).
- [12] A. Kumar, S. Singh et al., «Review on deep learning in agriculture: A case study on citrus disease detection,» Artificial Intelligence in Agriculture, vol. 6, págs. 78-90, 2022. DOI: [10.1016/j.aiia.2022.02.002](https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.02.002).

BIBLIOGRAFÍA

- [13] S. Rani y S. Hooda, «Review on implementation of machine learning and deep learning algorithms for detection of fruits and vegetables,» Materials Today: Proceedings, vol. 47, págs. 6000-6006, 2021. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.06.284](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.284).
- [14] L. Zhao y M. e. a. Li, «Integrated computer vision system for automated citrus grading in post-harvest industry,» Postharvest Biology and Technology, vol. 189, pág. 111 912, 2022. DOI: [10.1016/j.postharvbio.2022.111912](https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111912).
- [15] V. Leemans y M. F. Destain, «Defects segmentation on 'Golden Delicious' apples by using colour machine vision,» Computers and Electronics in Agriculture, vol. 35, n.º 2-3, págs. 215-226, 2002. DOI: [10.1016/S0168-1699\(02\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00020-9).
- [16] B. Russell y X. Pantazi, «Human-in-the-loop artificial intelligence for efficient annotation and real-time feedback in agriculture,» AI in Agriculture, vol. 4, págs. 24-31, 2020. DOI: [10.1016/j.aiia.2020.04.002](https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.002).