

## Evaluación de una plataforma inteligente dotado de un sistema de recolección para la fruta del dragón.

Asenjo, C.<sup>a,\*</sup>, Rovira-Más, F.<sup>a</sup>, Cuenca-Cuenca, A.<sup>a</sup>, Blanes, C.<sup>b</sup>, Ortiz, C.<sup>a</sup>, Alegre, V.<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

<sup>b</sup> Instituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

<sup>c</sup> GreenVision - Quality Sorting Systems, Carrer Catadau, 10, 46450 Benifaió, Valencia

### Resumen

El cultivo de pitahaya (fruta del dragón) ha crecido en el Mediterráneo por su alta demanda y rentabilidad. En este contexto, el proyecto Dragonbot desarrolló un sistema robótico inteligente para la recolección selectiva de pitahaya según su estado de madurez. El sistema se compone de una plataforma autónoma con tracción a las cuatro ruedas, dirección en dos, un brazo robótico UR5e y dos herramientas de corte: una hoja vibratoria y unas tijeras neumáticas. Se diseñaron dedos neumáticos flexibles para manipular los frutos sin dañarlos. Las pruebas en campo identificaron tres desafíos principales: el peso del fruto, su fragilidad y el difícil acceso al pedúnculo. Más del 75 % de los frutos maduros fueron recolectados con éxito y menos del 12 % sufrió daños, sin diferencias relevantes entre sistemas de corte ni relación con la firmeza o contenido de azúcares. Estos resultados validan la viabilidad de ambas soluciones para la recolección autónoma de frutos delicados.

*Palabras clave: pitahaya, plataforma móvil, garra robótica.*

### Abstract

The cultivation of pitahaya (dragon fruit) has grown in the Mediterranean due to its high demand and profitability. In this context, the Dragonbot project developed an intelligent robotic system for the selective harvesting of pitahaya according to its ripeness. The system consists of an autonomous platform with four-wheel drive, two-wheel steering, a UR5 robotic arm and two cutting tools: a vibrating blade and pneumatic scissors. Flexible pneumatic fingers were designed to handle the fruits without damaging them. Field trials identified three main challenges: the weight of the fruit, its fragility and the difficult access to the stalk. More than 75 % of ripe fruits were successfully harvested and less than 12 % were damaged, with no relevant differences between cutting systems and no relationship with firmness or sugar content. These results validate the feasibility of both solutions for autonomous harvesting of delicate fruit. The use of harvesting robots still has many limitations, but each advancement can be utilized in the future to implement automated assistance systems that reduce the costs of harvesting fresh fruits and vegetables.

*Keywords: pitaya, mobile platform, robotic gripper.*

### 1. Introducción

La pitahaya, también conocida como fruta del dragón, es un cultivo tropical de alto valor nutricional y económico que requiere una manipulación cuidadosa debido a su fragilidad (Chu y Chang, 2022). En el contexto de la agricultura moderna, los cultivos especializados como la pitahaya enfrentan importantes desafíos estructurales, tales como la escasez de mano de obra, el envejecimiento de la población rural, y los altos costos de recolección (Kootstra et al., 2021). Estas problemáticas comprometen la sostenibilidad y competitividad

del sector, especialmente en lo referente a las tareas de recolección, que son intensivas en trabajo y sensibles al daño del producto (Kaleem et al., 2023).

Ante este escenario, la automatización mediante robótica agrícola se presenta como una solución prometedora. En las últimas décadas, se han desarrollado diversos sistemas robóticos para la cosecha de frutas, integrando visión artificial, sensores y efectores diseñados para minimizar el daño mecánico (Xiao et al., 2024; Zhang et al., 2024). No obstante, su aplicación en condiciones reales sigue siendo limitada,

\*Autor para correspondencia: criasmad@agf.upv.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

debido a factores como la variabilidad del entorno agrícola, las condiciones climáticas y los altos costos de implementación. La recolección robótica de pitahaya representa un reto técnico particular, dada su estructura física —incluyendo el pedúnculo— y su alta susceptibilidad a magulladuras. En este contexto, el diseño de efectores finales elásticos y autoadaptativos resulta esencial. Esta investigación se centra en el desarrollo y evaluación de un sistema robótico personalizado para la cosecha de pitahaya, basado en principios de agricultura de precisión y recolección diferencial, con el objetivo de optimizar la eficiencia, reducir el desperdicio y garantizar una alta calidad del producto final.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Plataforma robótica y entorno de cultivo

El clima mediterráneo se está consolidando como un entorno ideal para el cultivo de pitahaya en España, extendiéndose desde las Islas Canarias y Málaga hacia Almería, Murcia y el este de Valencia. Recientemente, se ha comenzado a cultivar en invernaderos, adaptando el cultivo a climas más fríos. Para mejorar la rentabilidad, el proyecto Dragonbot ha desarrollado un robot cosechador automatizado equipado con un brazo robótico y un sistema de navegación autónoma.

Este sistema requiere plantaciones adaptadas, con hileras separadas por al menos 2 metros y frutas ubicadas a una altura mínima de 1 metro, lo que limita el acceso a ciertos frutos. El robot cuenta con una plataforma móvil con tracción eléctrica, dirección tipo Ackermann y dos modos de control: manual (mediante joystick) y automático.

El brazo robótico UR5e incorpora un efector final blando con dedos flexibles y una sierra para cortar el tallo. Para soportar su peso y mejorar la estabilidad, el chasis del robot móvil ha sido reforzado y la suspensión trasera equipada con muelles más rígidos.

El sistema de navegación ofrece dos modos automáticos: mapeo y recolección. Utiliza sensores 2D, 3D y ultrasónicos para guiarse sin necesidad de un mapa previo del terreno. En modo recolección, el robot avanza en tramos cortos, detecta frutos mediante una cámara de color, y recoge aquellos que estén maduros y accesibles, operando en modo “stop-and-go” para mayor precisión y seguridad.

Este enfoque permite una cosecha eficiente, reduciendo daños y optimizando el proceso gracias a la automatización y la integración de tecnologías de visión e inteligencia artificial.



Figura 1: Plataforma robótica

### 2.2. Garra Robótica

Uno de los principales desafíos en la recolección robótica de frutas es la extracción y sujeción de productos delicados, como la pitahaya, que son susceptibles a daños mecánicos. Diversas investigaciones han demostrado que el manejo sin contacto, donde no se toca el pericarpio del fruto, reduce significativamente el riesgo de daño y es comúnmente utilizado en la cosecha de frutas frágiles como fresas y tomates. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizan métodos que aplican fuerza externa sobre el tallo del fruto, como el corte, la tracción o el vacío, adaptados al tipo de fruto y su fragilidad. Sin embargo, este tipo de manipulación no es posible realizarla en la fruta del dragón por tener el pedúnculo inmerso en la penca.

El diseño de los dispositivos para la recolección robótica debe tener en cuenta tanto el tipo de fruta como su forma y características físicas. Los actuadores neumáticos son adecuados para objetos delicados o de formas irregulares, mientras que los eléctricos proporcionan un control más preciso. En particular, los dedos flexibles neumáticos son ideales para manipular frutas sin dañarlas. La recolección de pitahayas es especialmente desafiante debido a su variabilidad en peso, sensibilidad al daño por contacto, irregularidad de formas y el pedicelo lignificado, lo que requiere un diseño especializado en los sistemas de recolección para minimizar los daños y garantizar la eficiencia.

Por ello, se han desarrollado y evaluado dos dispositivos robóticos con sistemas de corte diferenciados: uno con una hoja de sierra vibratoria activada eléctricamente y otro con tijeras accionadas neumáticamente. Ambos dispositivos incorporan cuatro dedos flexibles huecos hechos de TPU por impresión 3D, diseñados para adaptarse a la morfología de la pitahaya y permitir un movimiento curvo al ser activados neumáticamente que permiten una sujeción delicada durante la recolección.

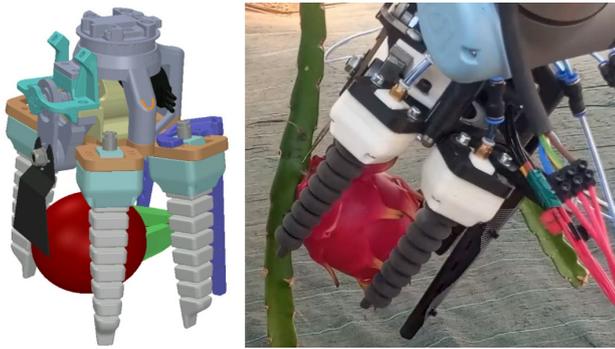


Figura 2: Prototipo garra robótica

Los ensayos se han llevado a cabo en dos fases: la primera, en julio de 2024, mediante operación manual; y la segunda, en octubre de 2024, con los dispositivos montados sobre un brazo robótico colaborativo UR5e integrado en una plataforma móvil. En total, 60 frutos de pitahaya roja (*H. polyrhizus*) fueron recolectados en julio y 27 en octubre. Todos los frutos recolectados mediante la garra se encontraban en un estado óptimo de madurez de recolección.

El efector final con sierra, de 1,8 kg, maneja frutos de hasta 500 g con diámetros entre 60 y 100 mm. Su sistema de corte emplea una hoja vibratoria impulsada por un motor brushless de 105 W, y la apertura de los dedos se controla mediante presiones positivas (cóncavo), atmosféricas (recto) y de vacío (convexo), gestionadas por una válvula solenoide de tres posiciones. Una red integrada evita la posible caída del fruto tras el corte del pedúnculo.

El efector final con tijeras, de 2 kg, presenta un mecanismo de corte mediante cuchillas activadas por un cilindro neumático a 0,45 MPa. Las cuchillas tienen una apertura de 50 mm y una profundidad de 40 mm, adecuada para frutos similares a los manipulados por la sierra. También incorpora una red de retención.

Durante la operación, el robot identifica la fruta y ejecuta una secuencia programada. En esta fase del proyecto la operación de identificación se realiza de forma manual, pero se está avanzando para poderla determinar en un futuro mediante dos sistemas de visión artificial 3D. En el caso de la sierra, el robot entra en modo de control de fuerza durante la fase del corte para asegurar un corte preciso aplicando 40 N normales al eje del fruto. En el dispositivo con tijeras, el corte se realiza sin control de fuerza, verificando posteriormente la correcta separación del fruto. Ambos sistemas han demostrado capacidad de recolección eficiente y adaptabilidad al entorno de cultivo controlado.



Figura 3: Brazo robótico sobre plataforma

### 2.3. Caracterización de la fruta mediante imagen

La caracterización física y química de los frutos ha sido fundamental para determinar su estado de madurez y calidad, lo que nos ha permitido establecer criterios precisos para una recolección selectiva. Este enfoque ha resultado especialmente relevante en la automatización de la cosecha, ya que ha garantizado que solo se recolectaran aquellos frutos que cumplieran con los estándares óptimos de madurez, asegurando una alta calidad comercial y reduciendo las pérdidas poscosecha.



Figura 4: Prototipo de análisis de imagen de los frutos

Para llevar a cabo las mediciones de caracterización e identificación de la idoneidad de los frutos para ser recogidos, además de con el fin de evaluar posibles daños en los frutos a posteriori, se empleó un prototipo de análisis de imagen desarrollado por Greenvision (GreenVision Quality Sorting Systems, Calle Catadau, 10, Benifayó, Valencia, [www.greenvision.com](http://www.greenvision.com)), que permitió determinar parámetros

como área, diagonales máxima y mínima, perímetro y coordenadas de color RGB, Figura 4.

Además, se tomaron medidas de calidad de los frutos. El peso fue medido con una balanza electrónica de precisión (Mettler Toledo AL104, Im Langacher 44, 8606 Greifensee, Suiza). La firmeza con una máquina universal de ensayo de tracción-compresión (Ibertest, modelo IBTH 2730, [www.ibertest.es](http://www.ibertest.es)) con una velocidad constante de 1,67 mm/s, tres medidas por fruto en la zona ecuatorial con un bástago de 0,008 m, tanto con piel (firmeza del fruto entero) como sin ella (firmeza de la pulpa). Finalmente, se determinó el contenido de sólidos solubles con un refractómetro digital (Atago modelo PAL-3; Atago Co., Tokio, Japón).

#### 2.4. Comunicación interna

Para la coordinación de los distintos subsistemas del robot, hemos planteado una arquitectura distribuida basada en dos unidades computacionales: una dedicada exclusivamente a la navegación autónoma de la plataforma móvil y otra responsable de las funciones de percepción, control del brazo robótico y evaluación de la calidad del fruto. La comunicación entre ambos ordenadores se realiza mediante un protocolo OPC UA, implementado sobre una máquina de estados que regula el intercambio de información y la secuenciación de tareas. Este enfoque modular permite una integración flexible y escalable de los distintos componentes del sistema. Actualmente, el desarrollo e implementación de esta estructura de comunicación se encuentra en curso.

### 3. Resultados

#### 3.1. Plataforma robótica y navegación

Se han realizado los primeros ensayos de campo en un huerto comercial de pitahaya con el objetivo de evaluar la estabilidad de navegación del robot Dragonbot en modo continuo. Esta modalidad es esencial tanto para el monitoreo del desarrollo del cultivo como para el desplazamiento eficiente del robot entre puntos de trabajo y durante la extracción del fruto recolectado. El robot navegó autónomamente a lo largo de seis hileras, registrando datos de navegación para su análisis posterior.

El algoritmo de navegación, basado en el desarrollado para el robot VineScout, ha sido adaptado para permitir un desplazamiento descentrado hacia la hilera de recolección, optimizando así la proximidad del brazo robótico a la copa del cultivo. Los resultados mostraron una navegación estable, con ángulos de dirección registrados ( $0,24^\circ$ ) muy próximos a los comandos calculados

#### 3.2. Garra Robótica

Los primeros resultados, obtenidos de la campaña 2024, mostraron que más del 87 % de los frutos fueron desprendidos y recogidos, cuando se consideraron solo aquellos frutos que

estaban al alcance del mecanismo de agarre del robot, y más del 75 % cuando se consideraron todos los frutos.

Además, se observó que menos del 15 % de los frutos recolectados presentaban daños. Al comparar los dos sistemas de corte evaluados, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a la eficacia del desprendimiento. No se pudo establecer una relación entre el daño en los frutos y características como su firmeza o el contenido de azúcar. Sin embargo, el tamaño del fruto sí tuvo un efecto considerable tanto en la tasa de desprendimiento como en el nivel de daño causado.

Los diseños propuestos podrían ser una opción prometedora para el desarrollo de robots móviles destinados a la cosecha de frutas delicadas, al ofrecer una capacidad eficiente de sujeción y desprendimiento sin producir daño al producto.

#### 3.3. Caracterización de la fruta mediante imagen

El sistema de visión desarrollado mostró capacidad para identificar de forma no destructiva los frutos en estado óptimo para ser recolectados. Las variables no destructivas obtenidas fueron capaces de estimar el tamaño de los frutos con un  $R^2$  del 85.8 % (con un error absoluto medio de 24.5 g, media 270.8 g). Además, en el caso de la variedad 'Purple' se consiguieron resultados prometedores de estimación del contenido en sólidos solubles con coeficiente de determinación de más de 80 %. Además, el sistema de imagen fue capaz de clasificar, mediante análisis discriminante en base a las variables de imagen, los frutos en las tres variedades estudiadas obteniendo más de un 80 % de frutos correctamente clasificados.

Mediante el uso de redes neuronales mostraron buenos resultados para mejorar las relaciones obtenidas, que junto con los nuevos datos de la próxima campaña 2025 ayudarán al desarrollo de modelos más robustos.

### 4. Conclusiones

Los resultados muestran como el prototipo robot es capaz, de manera independiente, de: navegar correctamente por un medio de condiciones campo, identificar mediante imagen la fruta que reúne las características para ser cosechada y desprender y recoger los frutos de pitahaya sin dañarlos. No obstante, es necesario proceder a la integración de todas las operaciones.

Un paso adicional sería la integración eficiente de todas las operaciones. El uso de robots de recolección presenta numerosas limitaciones, pero cada uno de los avances realizados puede ser aprovechado en el futuro para implementar sistemas automáticos de asistencia que reduzcan los costos de la recolección de frutas y hortalizas frescas.

A pesar de los avances logrados en el desarrollo del DragonBot, se han identificado una serie de limitaciones operativas que condicionan su rendimiento en campo. En primer lugar, el desempeño del robot depende en gran medida del diseño del terreno de cultivo. Para garantizar su correcta

circulación, es necesario que el campo cuente con una anchura de fila y una distancia de cabecera previamente definidas y compatibles con las dimensiones y capacidades de maniobra del robot. Esta necesidad limita su aplicabilidad a sistemas agrícolas que no cumplan con estos requisitos estructurales.

Además, el rango de alcance del brazo robótico ciertas presenta restricciones. Las pitayas que se encuentran a alturas muy elevadas o muy próximas al suelo, así como las que están ocultas por otras ramas, pueden quedar fuera del área operativa del brazo, lo que reduce la eficiencia global del sistema y obliga a intervenciones manuales en estos casos.

Estas limitaciones evidencian la necesidad de continuar con el desarrollo del sistema, especialmente en lo relativo a la adaptabilidad al entorno agrícola, la extensión del rango operativo del brazo y la mejora en la percepción y navegación en entornos complejos.

### 3. Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación de la Agencia Valenciana de la Innovación (AVI) y está cofinanciado por la Unión Europea a través del Programa Operativo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), con la subvención INNEST/2023/154. Los autores agradecen a MIPITAYA el habernos permitido ensayar en su campo de pitaya.

### Referencias

- Chu, Y. C., & Chang, J. C. (2022). Codification and description of the phenological growth stages of red-fleshed pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) using the extended BBCH scale-with special reference to spines, areole, and flesh color development under field conditions. *Scientia Horticulturae*, 293, 110752.  
DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110752
- Kootstra, G., Wang, X., Blok, P. M., Hemming, J., & Van Henten, E. (2021). Selective harvesting robotics: current research, trends, and future directions. *Current Robotics Reports*, 2, 95-104.  
DOI: 10.1007/s43154-020-00034-1
- Kaleem, A., Hussain, S., Aqib, M., Cheema, M. J. M., Saleem, S. R., & Farooq, U. (2023). Development challenges of fruit-harvesting robotic arms: A critical review. *AgriEngineering*, 5(4), 2216-2237.  
DOI: 10.3390/agriengineering5040136
- Xiao, X., Wang, Y., & Jiang, Y. (2024). Review of research advances in fruit and vegetable harvesting robots. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 19(1), 773-789.  
DOI: 10.1007/S42835-023-01596-8
- Zhang, J., Kang, N., Qu, Q., Zhou, L., & Zhang, H. (2024). Automatic fruit picking technology: A comprehensive review of research advances. *Artificial Intelligence Review*, 57(3), 54.  
DOI: 10.1007/s10462-023-10674-2