



# **Algoritmo con IA para planeación de trayectorias de un quadrotor para detección de plagas y estado nutricional de cultivos de *Annona Muricata*.**

TRABAJO DE GRADO

Presentado por

**Juan Gabriel Castro Vega.**

Presentado como requisito para optar al título de  
**Magister en ingeniería mecatrónica.**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

Bogotá D.C., Colombia

Noviembre 2021

# **Algoritmo con IA para planeación de trayectorias de un quadrotor para detección de plagas y estado nutricional de cultivos de *Annona Muricata*.**

**Juan Gabriel Castro Vega.**

APROBADO:

---

**Olga Lucia Ramos Sandoval**

Tutor

---

Ing. Diego Alfonso Rojas

Firma

---

Ing. Juan Ricardo Clavijo Mendoza

Firma

Bogotá D.C. noviembre 2021

## **NOTA DE ADVERTENCIA**

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus proyectos de trabajo de grado, sólo velará por la calidad académica de los mismos, en procura de garantizar su desarrollo de acuerdo con la actualidad del área disciplinar respectiva. En el caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el estudiante – autor asumirá toda la responsabilidad y saldrá en defensa de los derechos. Para todos los derechos la universidad actúa como un tercero de buena fe”. (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995)

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por su bendición y gracia en todo momento de mi vida, por nunca desampararme y siempre guiar mi camino a lo mejor, para hacer de mí una persona íntegra.

Le doy gracias a la profesora Olga Lucia Ramos Sandoval por ser la persona que me mostró la importancia del trabajo duro y en equipo, además por incentivar y procurar que fuera el mejor en cada área de mi vida, gracias por brindar de su conocimiento, dirección y colaboración en el transcurso del desarrollo de este trabajo, y agradecer al profesor Darío por la confianza depositada en mí para el desarrollo de este proyecto. Agradezco al grupo de investigación GAV y a sus integrantes por su colaboración en las diferentes tareas realizadas en este tiempo.

Reconocer a cada uno de mis amigos por su colaboración por enseñarme el valor de la amistad y de la incondicionalidad en todo momento en especial de Christian Ruiz, Ricardo Heredia, Daniel López, Diego Prieto y Juan David Chaparro, gracias por estar presentes y brindarme su amistad y consejos en cada momento que lo necesite. Agradezco a todos los profesores con los que tuve clases ya que estos aportaron de sus conocimientos y experiencia en sus respectivas áreas ya que todos blindaban lo mejor para que cada uno de sus estudiantes llegaran a ser los mejores profesionales.

De igual forma toda mi gratitud con la Universidad Militar Nueva Granada, por abrirme sus puertas, a todo el programa de maestría en ingeniería mecatrónica y demás facultades las cuales buscan formar personas integras para el progreso y desarrollo del país siempre buscando formar los mejores profesionales, por el apoyo financiero y administrativo para el desarrollo de actividades investigativas en diferentes áreas. **Trabajo realizado durante 2 años como producto derivado del proyecto IMP-ING-3119: “Identificación y predicción de alteraciones fisiológicas, deficiencia nutricional en cultivos de *Annona Muricata* utilizando robótica aérea, visión de máquina e inteligencia artificial” financiados por la Vicerrectoría de Investigaciones de la UMNG- vigencia 2020 y 2021**, respectivamente. Además del apoyo a los asistentes graduados, estipulado en la resolución 1811-2018 de la UMNG.

# DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios, por ser mi mayor inspiración, por guiarme, por darme fuerza y valentía en los momentos más cruciales, además de permitirme culminar otra etapa en mi vida con grandes bendiciones, permitirme conocer personas y profesores excelentes en el transcurso de mis estudios, gracias a Dios por permitirme terminar este proceso y obtener el título de magister en ingeniería en Mecatrónica, un logro que sin duda marcará el resto de mi vida.

Se lo dedico a mi padre Gabriel Castro y a mi madre Olga Luz Vega por formarme con principios y valores necesarios para salir victorioso en cada una de las etapas de mi vida, así como por enseñarme a ser disciplinado y responsable, honesto y constante para obtener todos los objetivos propuestos en mi vida. A mi hermano Julián Mejía Vega y mi hermana Valentina Mejía Vega por ser un ejemplo que seguir en cada aspecto de la vida, por mostrarme y guiarme el camino. Agradezco a Sandy Yulieth Ortiz mi novia por ser un apoyo fundamental estos años, por darme ánimo y acompañarme en cada momento, por enseñarme a valorar cada oportunidad y ser responsable.

También dedico este trabajo a toda mi familia que ha estado presente y me han ayudado a ser quien soy, por apoyarme y guiarme en el camino de la vida. A todas las personas que he conocido en estos años y que han aportado su granito de arena para que este logro se consiga con excelencia, dedico este trabajo a todos los docentes que creyeron en mí y me brindaron de sus conocimientos. En especial a la profesora Olga Lucia Ramos Sandoval y el profeso Darío Amaya por su acompañamiento, guía y preocupación por que lograra obtener este título.

Gracias.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>11</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGNIFICADOS</b> .....	<b>12</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>14</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>19</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
3.1 MODELO Y CONTROL DE UN QUADROTOR .....	24
3.1.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL .....	24
3.1.2 MODELO MATEMÁTICO .....	27
3.1.3 COMUNICACIÓN .....	28
3.2 PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS .....	29
3.2.1 ALGORITMOS INTELIGENTES .....	29
3.3 PROCESAMIENTO Y CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES .....	31
<b>4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA</b> .....	<b>34</b>
4.1 METODOLOGÍA .....	34
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS .....	36
4.2.1 DRONE TELLO EDU .....	36
4.2.2 PYTHON Y MATLAB .....	37

4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	37
4.3.1 MODELO MATEMÁTICO .....	37
4.3.2 DISEÑO CONTROLADOR .....	43
4.3.3 PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS .....	49
4.3.4 OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIA.....	53
4.3.5 ESTIMACIÓN CON FILTRO KALMAN .....	57
4.3.6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	59
<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>68</b>
5.1 CONTROLADOR.....	68
5.2 PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS .....	72
5.3 OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS.....	78
5.4 PROCESAMIENTO DE IMAGENES .....	91
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>103</b>
6.1 CONCLUSIONES .....	103
6.2 RECOMENDACIONES .....	104
<b>7. REFERENCIAS .....</b>	<b>106</b>

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 (A) FLOR EN ANTESIS. (B) RAMA FLORÍFERA. (C) INFLORESCENCIA. (D) BAYA EN SECCIÓN LONGITUDINAL. (E) SEMILLAS. (F) BAYA. (DIBUJO DE S. LEIVA, 6571, HAO) (BAZÁN & CHÁVEZ, 2017).....	20
FIGURA 2 ALGORITMOS INTELIGENTES MÁS USADOS PARA LA PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS. (ZHAO ET AL., 2018) .....	23
FIGURA 3 ESTRUCTURA GENERAL QUADROTORES. (A) ESTRUCTURA EN X. (B) ESTRUCTURA EN CRUZ. ....	24
FIGURA 4 DESPLAZAMIENTO Y ROTACIONES, (A) SUSTENTACIÓN, (B) DESPLAZAMIENTO PAR 2-4, (C) DESPLAZAMIENTO PAR 1-3. (D) ROTACIÓN SOBRE EL PROPIO EJE Z. .	25
FIGURA 5 DIAGRAMA DE FUERZAS Y SISTEMA COORDENADO. ....	26
FIGURA 6 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN. ....	28
FIGURA 7 LÓGICA DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA LA PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS.	30
FIGURA 8 LÓGICA DEL ALGORITMO A* PARA LA PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS. ....	31
FIGURA 9 COMUNICACIÓN UDP. ....	36
FIGURA 10 SISTEMA DE COORDENADAS. ....	38
FIGURA 11 SISTEMA DE CONTROL AUTÓNOMO DE UN QUADROTOR.....	49
FIGURA 12 DIVISIÓN POR CUADRANTES. ....	50
FIGURA 13 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS A RECORRER.....	50
FIGURA 14 SEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO. ....	52
FIGURA 15 SEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO A* . ....	53
FIGURA 16 SEUDOCÓDIGO OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS. ....	57
FIGURA 17 ESQUEMA DE CONTROL Y ESTIMACIÓN CON FILTRO DE KALMAN.....	59
FIGURA 18 IMAGEN DE GUANÁBANA NATURAL. ....	60
FIGURA 19 MÉTODO SIFT.....	62
FIGURA 20 CLASIFICADOR DE IMÁGENES.....	65
FIGURA 21 RESULTADOS CLASIFICADOR. ....	66
FIGURA 22 VALIDACIÓN CRUZADA. ....	67
FIGURA 23 ESQUEMA CONTROLADORES PARA SIMULACIÓN. (A) MODELO QUADROTOR EN ESPACIO DE ESTADO. (B) CONSTANTES DE REALIMENTACIÓN. (C) OBSERVADOR DEL SISTEMA. (D) DISCRETIZADORES.....	69
<i>FIGURA 24 RESPUESTA SISTEMA EN EL EJE Z.....</i>	<i>71</i>
<i>FIGURA 25 RESPUESTA SISTEMA EN PITCH Y ROLL.....</i>	<i>71</i>
<i>FIGURA 26 RESPUESTA ROTACIÓN EN YAW.....</i>	<i>72</i>
FIGURA 27 MATRIZ DE PUNTOS PARA TRAYECTORIA. ....	73
FIGURA 28 RESULTADOS PRIMERA TRAYECTORIA. (A) GA HEURÍSTICA 1. (B) A* HEURÍSTICA 1. (C) GA HEURÍSTICA 2. (D) A* HEURÍSTICA 2. (E) GA HEURÍSTICA 3. (F) A* HEURÍSTICA 3. (G) GA HEURÍSTICA 4. (H) A* HEURÍSTICA 4. ....	74
FIGURA 29 GRÁFICO CAJAS Y BIGOTES DE LOS ALGORITMOS.....	75



FIGURA 30 TABULACIÓN DE LOS MEJORES RESULTADOS POR ALGORITMO Y HEURÍSTICA.	76
FIGURA 31 PUNTOS A RECORRER SIMULACIÓN TRAYECTORIA DE PRUEBA CON QUADROTOR.	77
FIGURA 32 SIMULACIÓN DE TRAYECTORIA QUADROTOR.	77
FIGURA 33 REFERENCIAS DE POSICIÓN PARA SIMULACIÓN DE TRAYECTORIAS.	78
FIGURA 34 OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS. (A) OPTIMIZACIÓN TRAYECTORIA EN EL EJE $X$ . (B) OPTIMIZACIÓN TRAYECTORIA EN EL EJE $Y$ .	79
FIGURA 35 VELOCIDADES PARA TRAYECTORIA MÍNIMA DISTANCIA. (A) VELOCIDADES EN EL EJE $X$ . (B) VELOCIDADES EN EL EJE $Y$ .	80
FIGURA 36 RESULTADOS DE VELOCIDADES. (A) OPTIMIZACIÓN DE ACELERACIÓN EN $(X, Y)$ . (B) OPTIMIZACIÓN DE VIBRACIONES EN $(X, Y)$ . (C) OPTIMIZACIÓN INSTANTÁNEA EN $(X, Y)$ .	81
FIGURA 37 RESULTADOS DE ACELERACIÓN EN $(X, Y)$ CON LA OPTIMIZACIÓN DE ACELERACIÓN. (A) ACELERACIONES EN $X$ . (B) ACELERACIONES EN $Y$ .	81
FIGURA 38 PERFILES DE ACELERACIÓN. (A) ACELERACIONES EN $X$ . (B) ACELERACIONES EN $Y$ .	82
FIGURA 39 TRAYECTORIA HELICOIDAL OPTIMIZADA.	83
FIGURA 40 GRAFICAS POSICIÓN Y VELOCIDAD TRAYECTORIA HELICOIDAL.	85
FIGURA 41 TRAYECTORIA REALIZADA POR EL QUADROTOR.	86
FIGURA 42 TRAYECTORIA OPTIMIZADA PARA LOS EJES $(X, Y, Z)$ .	87
FIGURA 43 REFERENCIA DE VELOCIDAD PARA $(X, Y, Z, \Psi)$	88
FIGURA 44 RESPUESTA ESTADOS SENSORES DEL QUADROTOR.	88
FIGURA 45 RESPUESTA REFERENCIA VELOCIDAD Y MEDICIÓN EN LOS EJES $(X, Y, Z)$	89
FIGURA 46 RESPUESTA FILTRADA CON FILTRO KALMAN.	89
FIGURA 47 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN SIN FILTRO.	90
FIGURA 48 ESTIMACIÓN POSICIÓN XYZ CON FILTRO DE KALMAN.	91
FIGURA 49 GUANÁBANA.	92
FIGURA 50 PREPROCESAMIENTO NIVEL DE INTENSIDAD DE LA IMAGEN.	92
FIGURA 51 TRANSFORMADA DE FOURIER.	93
FIGURA 52 IMAGEN FILTRADA PASA ALTAS.	93
FIGURA 53 PUNTOS DE INTERÉS ÁRBOL GUANÁBANA.	94
FIGURA 54 CARACTERÍSTICAS FIGURA MODIFICADA.	95
FIGURA 55 CORRESPONDENCIA DE LA FIGURA 38 Y FIGURA 39.	95
FIGURA 56 RESULTADO CORRELACIÓN ENTRE IMÁGENES.	96
FIGURA 57 EXTRACCIÓN CARACTERÍSTICAS GUANÁBANA.	97
FIGURA 58 COMPARACIÓN IMÁGENES MODIFICADAS.	97
FIGURA 59 GUANÁBANA BASE SEGMENTACIÓN.	98
FIGURA 60 PREPROCESAMIENTO DE LA GUANÁBANA PARA SEGMENTACIÓN.	99

FIGURA 61 SEGMENTACIÓN DE UNA GUANÁBANA. (A) SEGMENTACIÓN DEL FONDO DE LA IMAGEN. (B) SEGMENTACIÓN DEL FRUTO. ....	99
FIGURA 62 CLASES PARA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES.....	100
FIGURA 63 CLASIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES.....	101
FIGURA 64 SIMILITUD ENTRE IMÁGENES.....	101

# LISTA DE TABLAS

TABLA 1 CONSTANTES DE CONTROL.....	45
TABLA 2 CONDICIONES DE VUELO PARA TRAYECTORIA.....	54
TABLA 3 VARIABLES PARA OPTIMIZACIÓN.....	55
TABLA 4 FUNCIONES RESULTANTES PARA OPTIMIZACIÓN.....	56
TABLA 5 DATAGRAMA COMUNICACIÓN CON TELLO EDU.....	57
TABLA 6 MATRIZ DE CONFUSIÓN.....	67
TABLA 7 PARÁMETROS FÍSICOS PARA DISEÑO.....	68
TABLA 8 RESULTADOS CONSTANTES DE CONTROL.....	70
TABLA 9 CONSTANTES DE REALIMENTACIÓN OBSERVADOR DISCRETO.....	70
TABLA 10 CONDICIONES DE VUELO TRAYECTORIA HELICOIDAL.....	84

# LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGNIFICADOS

**A\*:** Algoritmo de búsqueda inteligente A-star.

**DRONE:** Sistema aéreo no tripulado.

**GA:** Algoritmo Genético.

**IA:** Inteligencia Artificial.

**KF:** Filtro del Kalman.

**PID:** algoritmo de control Proporcional Integral Derivativo.

**QUADROTOR:** Quadcopter, cuadricóptero, cuadrirrotor, es un helicóptero que posee 4 rotores.

**UART:** Universal Asynchronous Receiver Transmitter.

**UAV:** Unmanned Aerial Vehicle.

**UDP:** Protocolo de Datagramas de usuario.

**VANT:** Vehículo Aéreo No Tripulado.

**WI-FI:** Protocolo de comunicación para intercambio de datos o conexión a internet.

# RESUMEN

La agricultura en Colombia juega un papel fundamental en la economía del país, el desarrollo de nuevas técnicas de optimización de los procesos ayuda al crecimiento de este sector. Con la ayuda de nuevas tecnologías y la optimización de los procesos es posible disminuir las pérdidas en las cosechas, mejorar la calidad de los productos y generar una mayor rentabilidad a los campesinos. La agricultura de precisión es una tendencia en el mundo, la cual busca aumentar la capacidad de producción y mejorar la calidad de los cultivos, disminuyendo la cantidad de insumos y químicos requeridos.

En este documento se trabajó con un Drone Tello Edu para monitorear el estado de un cultivo de *Annona Muricata* también conocido como guanábana. Para esta tarea se desarrolló un algoritmo con IA para la planeación de trayectorias del quadrotor, con el fin de minimizar la distancia que este debía recorrer en el cultivo por su limitada capacidad y duración de batería. Adicionalmente, se optimizó este recorrido para tener una mayor estabilidad en el vuelo y poder por medio de la cámara abordo tomar fotografías de los frutos. Las fotografías obtenidas fueron procesadas y clasificadas para determinar el estado general del cultivo.

Con el propósito de alcanzar el objetivo propuesto se realizó el modelo matemático del quadrotor, el algoritmo de planeación de trayectorias y la optimización de estas. También se realizó un algoritmo para la clasificación de las imágenes, donde se buscaba determinar los frutos que presentaban algún tipo de enfermedad o presencia de plagas, generando así la posibilidad de toma de decisiones de forma efectiva que garanticen el adecuado tratamiento del cultivo.

Con este proyecto se logró identificar los principales problemas que afectan a los cultivos de *Annona Muricata* como lo es la plaga de la "Avispita" y la enfermedad de la antracnosis causada por *Colletotrichum spp*, además, se desarrolló un sistema de monitoreo para este tipo de cultivos, en el que se optimiza el recorrido que debe realizar un quadrotor para supervisar el cultivo, minimizando la distancia del trayecto. Adicionalmente se logró por medio de algoritmos de inteligencia artificial y técnicas de procesamiento de imágenes clasificar las imágenes de cultivos de *Annona Muricata*, esta clasificación de imágenes permite identificar frutos las imágenes con una exactitud del 79.4%.

**Palabras clave:** Algoritmos inteligentes, Planificación de trayectorias, Quadrotores, Agricultura de precisión, Inteligencia artificial, Optimización.

# ABSTRACT

Agriculture in Colombia plays a fundamental role in the country's economy, the development of new techniques of optimization of processes helps the growth of this sector. With the help of new technologies and the optimization of processes it is possible to decrease the losses on the crops, improve the quality of the products and generate greater profitability to the peasants. Precision agriculture is a trend in the world, which seeks to increase production capacity and improve the quality of crops, decreasing the number of required inputs and chemicals.

In this document we worked with a Drone Tello Edu to monitor the state of an Annona Muricata cultivation. For this task an algorithm with AI was developed for the planning of trajectories of the Quadrotor, to minimize the distance that this had to travel in the cultivation by its limited capacity and battery life. Additionally, this journey was optimized to have a greater stability in the flight and power through the camera on board with photographs of the fruits. The photographs obtained were processed and classified to determine the general condition of the crop.

To reach the proposed objective, the mathematical model of the quadrotor was performed, the trajectory planning algorithm and the optimization of these. An algorithm for the classification of the images was also performed, where it was sought to determine the fruits that presented disease or presence of pests, thus generating the possibility of decision-making effectively that guarantee the adequate treatment of crop.

With this project, it was possible to identify the main problems that affect the crops of Annona Muricata as it is the pest of the "alarm" and the disease of the anthracnose caused by Colletotrichum SPP, in addition, a monitoring system for this type of type was developed Crops, which optimizes the route that a quadrotor must perform to monitor the crop, minimizing the distance of the journey. Additionally, it was achieved through artificial intelligence algorithms and imaging techniques classifying the crop images of Muricata, this image classification allows to identify fruits the images with an accuracy of 79.4%.

**Keywords: Smart algorithms, Path planning, Quadrotors, Precision agriculture, Artificial intelligence, Optimization.**

# 1. INTRODUCCIÓN

En los cultivos se presentan constantemente problemas para los agricultores como son las plagas, la maleza y las deficiencias nutricionales de la planta o del suelo. En la actualidad, se han realizado diferentes estudios para la identificación de plagas y enfermedades que se presentan en el cultivo de *Annona Muricata* (Martín et al., 2015) debido a que estas causan grandes pérdidas en la producción. Los agricultores han optado por la implementación de estrategias para el control de estas, mediante el suministro de pesticidas y fertilizantes. Sin embargo, el uso desmedido de estos químicos puede traer riesgos de contaminación en el suelo y en el agua de riego, también existe riesgo de explosión por el almacenamiento de estos productos (Mengistie et al., 2017). Algunos de los productos que se usan han sido ineficaces para el control de insectos o plagas por la aparición de nuevas especies y enfermedades.

Es necesario el planteamiento de nuevas estrategias, para lograr la integración y manejo de todas las plagas, malezas o enfermedades que se presentan en los cultivos, para esto es necesario la verificación y monitoreo del estado de los cultivos, con el cual es posible realizar un diagnóstico con el fin de determinar cuáles son las acciones necesarias para el beneficio del cultivo (Galarza et al., 2016). Actualmente existen diferentes métodos y acciones preventivas que se usan para asegurar una buena calidad en las cosechas, reduciendo la cantidad de fertilizantes e insecticidas que pueden resultar tóxicos para el ambiente y los humanos. Todas estas condiciones nos llevan al estudio de la agricultura de precisión, que busca el aumento de la producción, disminuyendo los recursos utilizados para obtener un mayor rendimiento (Krishna, 2016). El uso de drones para el monitoreo de cultivos ha sido usado significativamente en grandes cultivos, debido a la capacidad de estos para sobrevolar y capturar imágenes en tiempo real para su posterior procesamiento.

Aunque existen guías técnicas para la identificación y clasificación de enfermedades en la mayoría de los cultivos, algunas de estas, solo están determinadas para zonas específicas, países, o tipos de cultivos, y muchas de estas guías no se basan en una herramienta tecnológica, técnica o científica, sino en la experiencia de los agricultores, lo que conlleva al gasto de recursos en zonas del cultivo que no requieren el uso de insumos, por esta razón los drones han adquirido gran relevancia en el monitoreo de los cultivos y toma de imágenes aéreas para la identificación de zonas afectadas.

El poco desarrollo y uso de técnicas modernas en la agricultura colombiana ha generado que muchas cosechas se pierdan por poca demanda o por factores como las plagas, maleza y deficiencias nutricionales en los cultivos (Beleño, 2018). Es por estos hechos que se hace necesario desarrollar e implementar nuevas técnicas de agricultura de precisión, comparación de mercados para la venta de las cosechas (Orjuela, 2020a), desarrollo de algoritmos inteligentes para la optimización de recorridos para monitoreo y la implementación de inteligencia artificial que permita la identificación de zonas afectadas por alguna de las patologías mencionadas anteriormente (Yingkun, 2018). Estos sistemas van a permitir tener un mayor control de los cultivos mejorando la producción y la calidad de la cosecha, ayudando a los agricultores y labriegos para que obtengan mayores beneficios de sus tierras, evitando contaminar las cosechas y las fuentes hídricas con pesticidas (Orjuela, 2020b).

Los cultivos de *Annona Muricata* tienen un gran potencial económico, debido a que este fruto es considerado exótico, además de que tiene una gran demanda en toda Colombia y en diversas zonas del mundo por sus características nutricionales (Chaparro, Sandra P; Tavera, Mónica L; Martínez, José J; Gil, 2014), además este fruto puede ser comercializado en diferentes subproductos (Lucas Aguirre et al., 2016; Omar et al., 2021). La guanábana como es conocida en diferentes países ha sido de gran interés para investigaciones de diversas índoles, entre ellas los posibles efectos anticáncer que pueden poseer estos frutos (Aumeeruddy &



Mahomoodally, 2021; Ministerio de agricultura y ganaderia, 1991), sus propiedades antioxidantes, anti diabéticas entre otras (Badmus et al., 2020). Con la situación actual del Covid-19, se han realizado pruebas e investigaciones sobre las propiedades de la *Annona Muricata*, y se logró encontrar un gran potencial en este fruto (Prasad et al., 2021) para combatir esta enfermedad.

En este documento se plantea una sistema de monitoreo, que puede ser usado para incrementar la producción agrícola, gracias a la identificación de zonas afectadas por plagas o malezas (Orjuela. Y, 2019), además de brindar alternativas para el desarrollo del sector agrícola en el país, específicamente haciendo uso de robótica aérea para monitoreo y toma de decisiones. En el mismo, se exploran algoritmos inteligentes para la planeación de trayectorias y técnicas de optimización para mejorar la supervisión de un cultivo de *Annona Muricata* en Colombia.

Para el desarrollo del sistema de monitoreo y tomas fotográficas de un cultivo, se hizo uso de robótica aérea, en específico de un quadrotor Tello Edu con el cual fue posible realizar diferentes pruebas y algoritmos para el monitoreo, además, de clasificación de imágenes a través del procesamiento y extracción de características para identificar zonas afectadas por algún tipo de plaga o enfermedad, lo que ayuda a la disminución del gasto de recursos en zonas no afectadas, que no requieren del uso de pesticidas y herbicidas (Kamata, 2019), entre otros. Este proceso se realizó por medio de la planeación de trayectorias con algoritmos de inteligencia artificial y optimización de los recorridos realizados por el quadrotor, el drone sigue una trayectoria establecida para transmitir y capturar imágenes, que posteriormente fueron clasificadas según el estado y las características presentadas por los frutos.

Este documento es un producto derivado del desarrollo del proyecto de investigación IMP-ING-3119 titulado: "*Identificación y predicción de alteraciones fisiológicas, deficiencia nutricional en cultivos de Annona Muricata utilizando robótica aérea, visión de máquina e inteligencia artificial*" proyecto que se desarrolló en el grupo de investigación GAV en la línea de inteligencia artificial y procesamiento de señales, desarrollando un algoritmo para la planeación, optimización y

seguimiento de trayectorias, procesamiento y clasificación de imágenes para detección de enfermedades en un cultivo de *Annona Muricata* o guanábana.

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un algoritmo inteligente para la planeación de trayectorias de un quadrotor, y optimización de la distancia que debe recorrer este al realizar el monitoreo de un área de 1 hectárea dentro de un cultivo de *Annona Muricata* haciendo uso de algoritmos para procesamiento de imágenes por medio de la identificación de deficiencias nutricionales y plagas presentes en el cultivo.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un algoritmo para la planeación de una trayectoria que minimice la distancia que debe recorrer el quadrotor entre diferentes puntos, teniendo en cuenta el modelo y las dinámicas de este, utilizando algoritmos inteligentes de búsqueda.
- Realizar un sistema de supervisión por medio de procesamiento de imágenes e inteligencia artificial, para la identificación de zonas afectadas por plagas presentes en el cultivo, en especial la identificación de la plaga de la “Avispita” o *Bephratelloides cubensis* y la enfermedad de la antracnosis causada por *Colletotrichum* spp.
- Realizar pruebas de campo con un quadrotor implementando los algoritmos para la planeación de trayectorias y de procesamiento de imágenes, para determinar su precisión y con esto validar el proyecto.

## 2. ESTADO DEL ARTE

El cultivo de *Annona Muricata* conocido también como cultivo de guanábano es un árbol frutal el cual puede estar entre los 3 y los 10 metros de alto como se plantea en (Berumen-Varela et al., 2019), este tipo de árboles crece en los climas tropicales, Su fruto la guanábana de color verde sin brillo en su etapa madura puede alcanzar tamaños entre los 10 y los 40 cm de largo, además todo el fruto está cubierto de espinas suaves. El principal aporte de este documento es mejorar la comprensión de este fruto, comprender los beneficios que pueden llegar a tener en el ser humano y adoptar nuevas técnicas para mejorar la calidad del fruto. Existen diversos estudios sobre la morfología de la familia de frutos *Annona*, en el documento (Bazán & Chávez, 2017) se presenta un estudio sobre las diferentes características de esta familia de frutos, sus posibles orígenes y el valor nutritivo que presenta el *Annona Cherumola Mill*, la cual presenta características similares al *Annona Muricata*, como resultado de la investigación realizada en este documento se afirma que los frutos de la familia *Annona* han sido utilizados como una fuente de alimento desde épocas prehispanicas, por todas sus características nutricionales y beneficios para el ser humano, en la Figura 1 se puede observar una ilustración de las principales características de este fruto.

En los últimos años el uso de nuevas tecnologías para la supervisión y monitoreo de los cultivos ha adquirido gran relevancia, debido a la gran importancia de la calidad de los productos y el aumento de la producción por el crecimiento de la población según se muestra en (Venkata Subba Rao & Gorantla, 2019), en el cual se realiza el diseño de un quadrotor pilotado manualmente o semiautomáticamente, la conclusión y aporte de este documento es el diseño de nuevas técnicas para realizar planeación de misiones de sobrevuelo con un quadrotor.

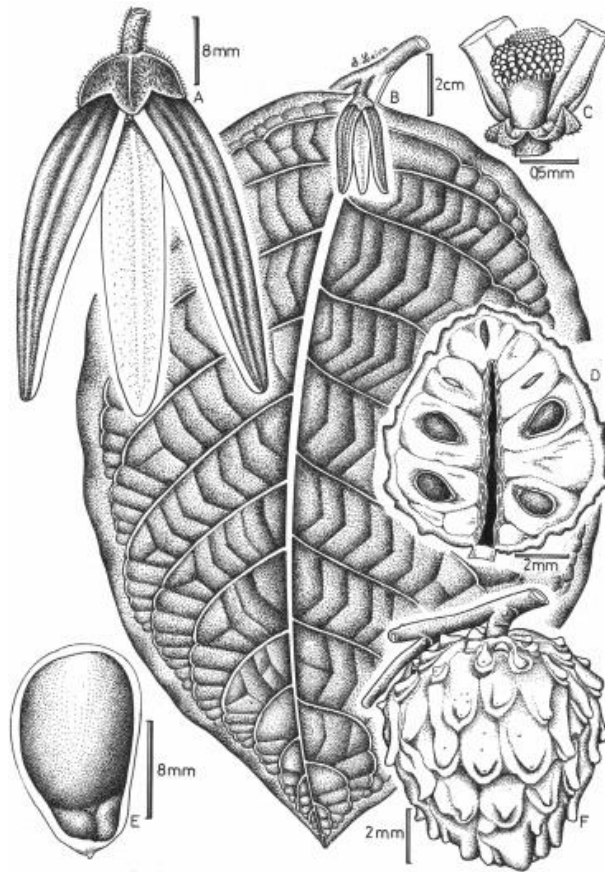


Figura 1 (A) Flor en antesis. (B) Rama florífera. (C) Inflorescencia. (D) Baya en sección longitudinal. (E) Semillas. (F) Baya. (dibujo de S. Leiva, 6571, HAO) (Bazán & Chávez, 2017).

Otros aspectos importantes para el uso de nuevas técnicas de control y monitoreo de los cultivos es el cambio climático, las plagas, las malezas y las deficiencias nutricionales las cuales son aspectos negativos que afectan la producción en la calidad y cantidad, en (Hernández et al., 2014) se describen las principales plagas, enfermedades y malezas que afectan este tipo de cultivos, en este documento se logra identificar la plaga de la “*Avispita*” también conocida como Barrenador de la semilla (*Bephratelloides cubensis*). En el trabajo desarrollado en (Gabriel, 2018) se busca disminuir los efectos adversos en la postcosecha de la guanábana y la afectación por las principales plagas. Así mismo la principal enfermedad presentada en el cultivo de *Annona Muricata* es la antracnosis causada por la *Colletotrichum.spp*. Como se describe en (Trinidad & Calderón, 2017) en el cual se

describen diferentes cepas con diferentes morfologías, por esto en (Negash et al., 2019) se desarrolla un estudio de diversos métodos y aplicaciones utilizadas en la agricultura, una comparación entre agricultura satelital y el uso de drones en la agricultura, con esta comparación llevan a la identificación de puntos clave para la implementación de drones en la supervisión de los cultivos. Así mismo, en (Liu & Wang, 2018) se presentan las características de los quadrotores que los hacen ser especiales por su gran maniobrabilidad, capacidad de vuelo estacionario para tomas fotográficas, su estructura simple y el bajo costo de producción que los han convertido en elementos esenciales para la agricultura, en resumen los autores de este documento plantean diversos métodos de control y técnicas para abordar problemas de carga o presencia de vientos fuertes al realizar el seguimiento de una trayectoria.

Para el uso de quadrotores es necesario el desarrollo y obtención del modelo matemático del sistema, en el trabajo propuesto en (FRANCESCO SABATINO, 2015) se desarrolla el modelo matemático de un quadrotor implementado con las ecuaciones de Euler-Lagrange el cual también puede ser realizado por el método de Newton-Euler, en ambos métodos el resultado es un modelo aproximado. Contar con el modelo matemático del sistema permite realizar simulaciones, diseño de controladores y actualizaciones de métodos más robustos como se muestra en (Kiyashko et al., 2017) donde se realizó el modelo matemático de un quadrotor, para el cual fue desarrollado y aplicado un controlador PID, el principal aporte de esta investigación es que este tipo de controladores pueden ser usados en los quadrotores sin embargo, el mejoramiento en los diseños, en la aerodinámica y en las técnicas de control que garanticen puntos de operación más estables son requeridos para aplicaciones cada vez más robustas.

En los últimos años se han desarrollado algoritmos para la planificación de trayectorias con drones como el trabajo realizado en (Kharuf-Gutierrez et al., 2018), en el cual se planificaban trayectorias con el fin de adquirir imágenes multiespectrales de los cultivos para el monitoreo y toma de decisiones aumentando

la velocidad de respuesta de los agricultores, donde se demostró que los drones son una herramienta de gran utilidad, debido a la flexibilidad y capacidad de uso en diferentes entornos. La planificación de trayectorias para los quadrotores es de suma importancia, ya que es necesario asegurar que se tenga un recorrido completo para la adquisición de datos importantes de todo el cultivo, existen diversos métodos y algoritmos que se han desarrollado para dar cumplimiento a esta tarea de la como el desarrollado en (Fan et al., 2017), en este documento se propone el diseño de un controlador no lineal para el seguimiento de trayectorias y eliminación de perturbaciones, para lograr el seguimiento y control no lineal de un recorrido se hace mediante el uso de un algoritmo integral adaptativo según los resultados obtenidos. Siguiendo con el desarrollo de técnicas de control para el seguimiento de recorridos en (Cabecinhas et al., 2019) se plantea la necesidad de incluir la carga que se vaya a transportar o que lleven consigo los quadrotores debido a que estos han sido usados para la entrega y el traslado de insumos de un punto a otro llevando cámaras, tanques para el riego de los cultivos o domicilios.

En las tareas de exploración y de supervisión se han implementado algoritmos de inteligencia artificial o de *machine learning* para optimizar las trayectorias que se generan, buscando minimizar aspectos como el tiempo de vuelo, la energía consumida por el quadrotor, la distancia recorrida entre otros. En el documento propuesto en (Wai & Prasetia, 2019) se desarrolla un sistema de vigilancia con quadrotores, en el cual se implementan desde controles de vuelo hasta sistemas de planeación de trayectorias con algoritmos inteligentes, en conclusión se pudo determinar que el uso de algoritmos inteligentes como el A\* puede reducir el gasto energético utilizado en el seguimiento de una trayectoria. En los últimos años ha aumentado considerablemente las publicaciones y los estudios acerca de la planificación de trayectorias en (Zhao et al., 2018) se realiza la recopilación de los algoritmos inteligentes más utilizados, además, se concluye que los algoritmos más

recurrentes en este ámbito son los algoritmos genéticos y las variaciones del algoritmo A\* como se puede observar en la Figura 2.

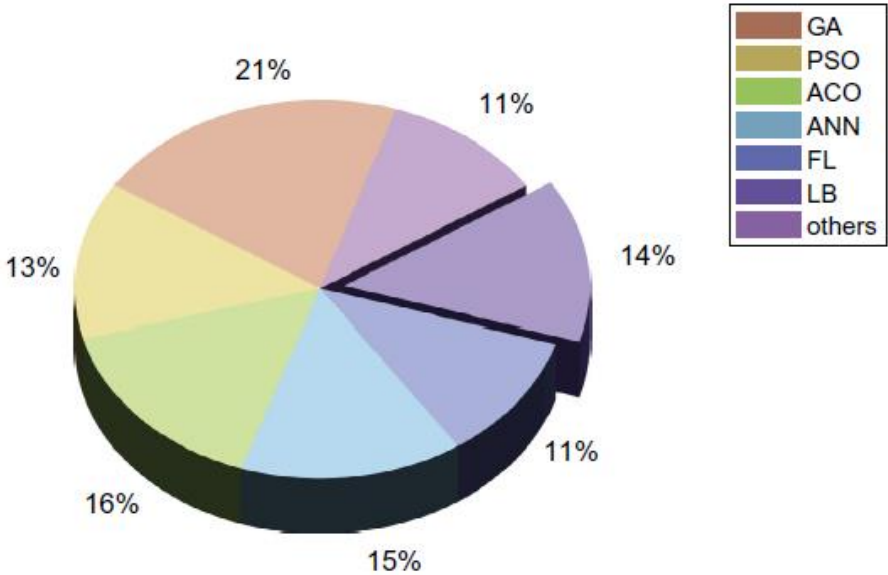


Figura 2 Algoritmos inteligentes más usados para la planeación de trayectorias. (Zhao et al., 2018)

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 MODELO Y CONTROL DE UN QUADROTOR

Los recientes desarrollos y avances tecnológicos en elementos como los sensores, actuadores y baterías han permitido el desarrollo de nuevos prototipos de Drones (Karahan & Kasnakoglu, 2019). Estos nuevos modelos han sido de vital importancia para realizar diferentes tareas desde el aire, en especial tareas civiles y militares, sin embargo, para el desarrollo de estos nuevos modelos es necesario conocer las dinámicas y el modelo matemático del quadrotor (Suthanthira Vanitha et al., 2020). Con el modelo del sistema es posible diseñar un sistema de control robusto que controle las dinámicas del quadrotor, en los últimos años este ha sido un punto de atracción para la investigación y desarrollo (Chen et al., 2021).

#### 3.1.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL

Un quadrotor es un vehículo aéreo no tripulado, el cual está formado por una estructura en cruz que cuenta con un motor en cada extremo. En la Figura 3 se observan las 2 configuraciones de orientación en las que se puede trabajar con los quadrotores.

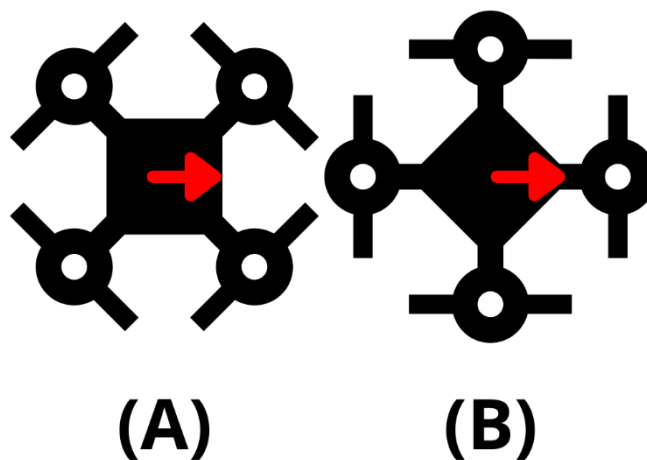


Figura 3 Estructura general quadrotores. (A) Estructura en X. (B) Estructura en Cruz.



En la Figura 3 en la parte (A) se muestra la estructura en X, esta es la configuración más habitual para trabajar con los quadrotores, dado el hecho que la mayoría de estos sistemas poseen cámaras en la parte inferior. Por lo cual esta configuración da un mayor grado de visibilidad hacia el frente. Toda la carga y elementos que transporta el quadrotor como la batería, los sensores, la cámara y demás elementos son situados hacia el centro de este (Sánchez Yoldi & Ruiz Tadeo, 2011). Para realizar la fuerza de sustentación que se necesita para elevar el quadrotor, es necesario ejercer una fuerza de empuje en los cuatro extremos de este. Este empuje se consigue gracias a la rotación ejercida por los motores y las hélices, para lograr elevar el quadrotor la fuerza que ejercen estos cuatro rotores debe ser mayor a la que ejerce el peso.

Los quadrotores son sistemas de seis grados de libertad, sin embargo, el control y los movimientos independientes que se pueden realizar son solo 4. El control de la altura  $Z$ , la inclinación en el eje  $Y$  o Roll ( $\theta$ ), la inclinación en el eje  $X$  o Pitch ( $\Phi$ ) y la rotación u orientación en el eje  $Z$  o Yaw ( $\Psi$ ) (Moyano Díaz, 2014). En la Figura 4 se muestran las 4 combinaciones para realizar los desplazamientos del quadrotor.

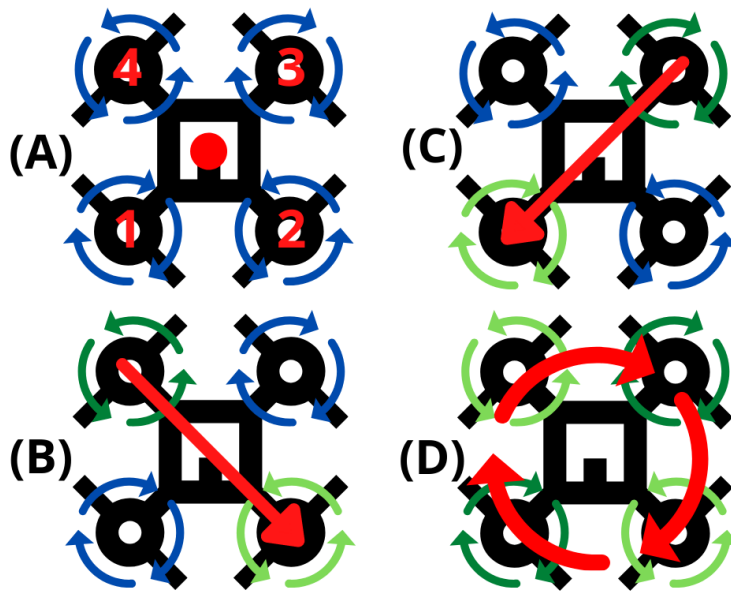


Figura 4 Desplazamiento y rotaciones, (A) Sustentación, (B) Desplazamiento par 2-4, (C) Desplazamiento par 1-3. (D) Rotación sobre el propio eje Z.

En la Figura 4 es importante recalcar la dirección de giro de los motores, donde el motor 1 y 3 giran en sentido horario, mientras que los motores 2 y 4 giran en sentido contrario. Este cambio de giro en los pares de los motores se realiza para compensar los momentos que se generan por el giro de los rotores (Oktay & Köse, 2019). De igual forma en la Figura 4 se puede observar los cambios de velocidad en los motores para generar diferentes desplazamientos, en (A) se observa que los 4 rotores giran a la misma velocidad, esto para generar una fuerza de empuje suficiente para elevar a el quadrotor. En (B) se genera un desplazamiento sobre el eje de los motores 2-4 debido a un incremento en la velocidad en el 4 y disminución en el 2, lo que genera una rotación  $\Phi$ . En (C) ocurre el mismo proceso de (B) solo que sobre el par de rotores 1-3 generando una rotación  $\theta$ , por último, en (D) hay un cambio de velocidades en ambos pares de rotores, este desequilibrio produce un momento general en el quadrotor y lo hace rotar sobre el eje Z un ángulo  $\Psi$  (Gonzalez et al., 2018). En la Figura 5 se presenta el diagrama de fuerzas presentes en el quadrotor, además se muestra el sistema coordenado que se tiene en cuenta para realizar el modelo matemático.

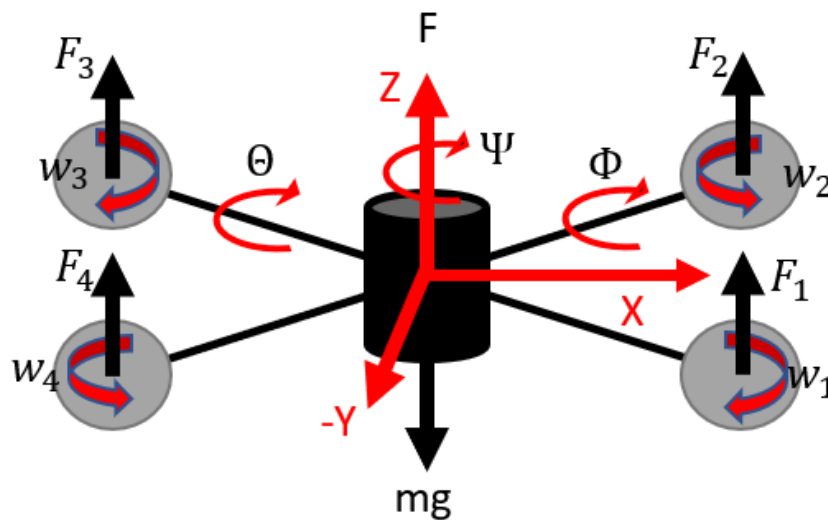


Figura 5 Diagrama de fuerzas y sistema coordenado.

### 3.1.2 MODELO MATEMÁTICO

Para la realización del modelo matemático es necesario establecer el método por el cual se puede desarrollar el modelo, existen diferentes posibilidades y tipos de modelado para este tipo de sistemas, en este caso se hace uso de las ecuaciones de Euler-Lagrange (Ruíz, 2015) para obtener la función de transferencia o el método de Newton-Euler para determinar el espacio de estados que representa las dinámicas del quadrotor. El modelo matemático por mecánica Lagrangiana se realiza mediante el cálculo de la energía cinética y potencial, posteriormente se calcula la ecuación Lagrangiana del sistema, una vez se tienen las ecuaciones se deben resolver para cada uno de los grados de libertad (Libardo Duarte , Juan Madrid, Brayan Montero Arévalo, Paolo. A. Ospina-Henao., 2016).

En este modelo se realizaron consideraciones como las presentadas en (Matencio et al., 2018):

- La estructura del quadrotor es simétrica y en cruz, para compensar las inercias del sistema.
- Los motores están divididos en 2 pares, motores 1 y 3 girando en sentido horario, motores 2 y 4 girando en sentido antihorario. Para compensar los momentos generados por las hélices.
- Inicialmente el punto de operación se considera cercano al punto de vuelo estacionario para la linealización del sistema.
- No se consideran en el modelo fuerzas giroscópicas y ni la presencia del efecto Coriolis.
- Se considera que la altura de vuelo es suficiente para que no se presenten turbulencias bajo las hélices.

El análisis y modelo del sistema se trabajarán en 2 subsistemas, uno es el sistema de translación en  $XYZ$ , en el segundo subsistema se tienen en cuenta las rotaciones  $\Phi\Theta\Psi$ . Este método de trabajo permite posteriormente el diseño de los controles de orientación y elevación por separado (Ortiz Gonzales, 2014). Estos controladores

serán usados para validar los resultados en simulación de los diferentes algoritmos planteados en este documento.

### 3.1.3 COMUNICACIÓN

Para enviar los comandos al quadrotor Tello, se utiliza el protocolo de comunicación UDP (Protocolo de Datagramas de usuario). Los sistemas para la operación del drone se presentan en la Figura 6, por medio de este protocolo es posible enviar señales, las cuales permiten que el quadrotor realice las tareas indicadas, debido a este sistema es posible la visualización de las imágenes tomadas por la cámara anclada al quadrotor en tiempo real.

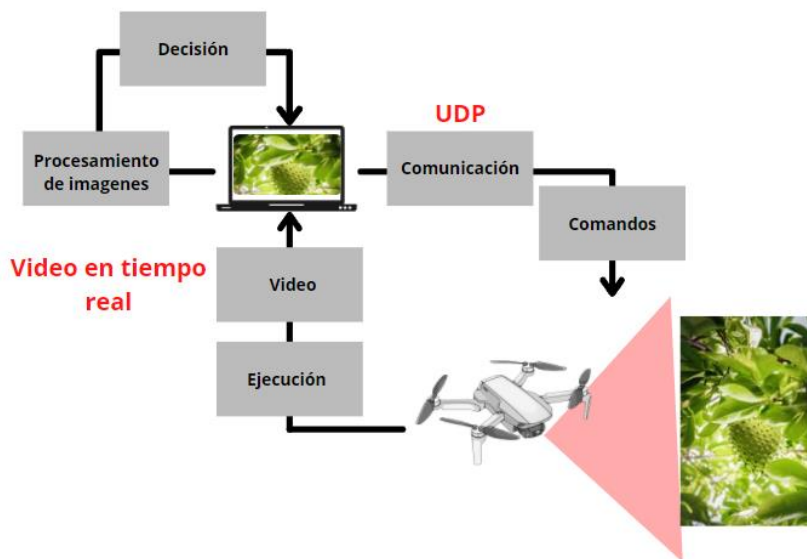


Figura 6 Protocolo de comunicación.

Las imágenes obtenidas del quadrotor son procesadas por la computadora, y posteriormente son enviados una nueva serie de comandos al Tello el cual realiza nuevas operaciones para el cumplimiento de las diferentes tareas.

La ventaja principal de usar un protocolo UDP, es que admite el envío muy rápido de datagramas, esto sin la necesidad de una conexión, o la respuesta del receptor. Para el *streaming* de video o de audio es sumamente usado este protocolo. Para ello se requiere especificar una dirección IP y un puerto por el cual se envían los datagramas, así mismo es necesario establecer por cual puerto se escucha la información que se envía al quadrotor por medio de este protocolo.

## **3.2 PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS**

### **3.2.1 ALGORITMOS INTELIGENTES**

La planeación de trayectorias es un tema de gran interés en la robótica, ya que con estos algoritmos los robots logran tener un mayor grado de libertad y de autonomía para desarrollar diferentes tareas. La mayoría de los algoritmos utilizados son algoritmos inteligentes que permiten obtener una solución óptima para la aplicación o la tarea que se desea realizar (Podvalny et al., 2019). La finalidad de la planeación de trayectorias es encontrar una sucesión de posiciones o movimientos que debe realizar un robot para alcanzar un punto final desde un punto inicial, en el caso de los algoritmos de planificación inteligente, se busca optimizar alguna condición de operación, ya sea la suavidad del movimiento, la distancia más corta, el menor tiempo, la menor velocidad, el menor gasto energético, entre otros parámetros que se pueden optimizar con estos algoritmos.

#### **ALGORITMO GENÉTICO.**

El algoritmo genético está basado en el funcionamiento y la mezcla de varias funciones biológicas (Castillo, 2016), como lo son la herencia, mutación y la combinación de genes para la búsqueda de soluciones, así como se observa en la Figura 7, en la cual se plantea un diagrama de operación para la programación del algoritmo genético que se implementó, para encontrar el recorrido más corto para realizar las trayectorias con el quadrotor.

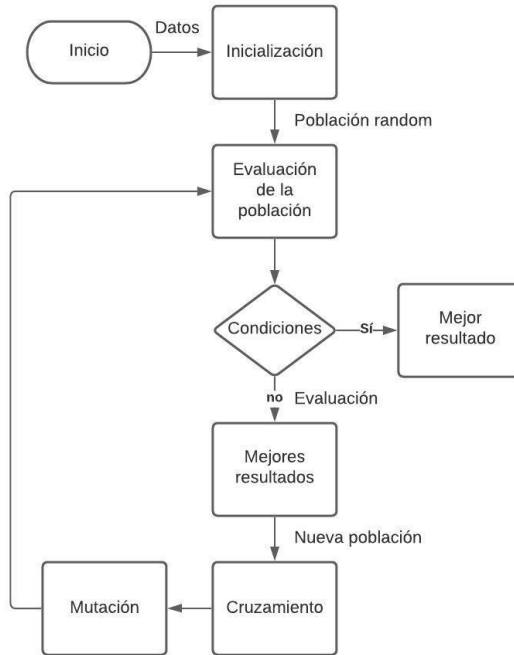


Figura 7 Lógica del algoritmo Genético para la planeación de trayectorias.

En la Figura 7 se muestra el diagrama del algoritmo genético, en este se inicia el proceso con una población aleatoria, luego es evaluado el resultado (distancia) para determinar la menor distancia, con los mejores resultados se realizan cruzamientos para asegurar la Elite (menores distancias) y se modifican los demás resultados por si se encuentran mejores trayectorias.

### ALGORITMO A\*.

Este algoritmo es utilizado para encontrar la solución óptima a un problema de búsqueda, en el caso de este estudio la trayectoria más corta que se debe realizar para el recorrido de un quadrotor, en la Figura 8 se muestra un diagrama para la programación del algoritmo, en el cual se toman las coordenadas en una lista. Teniendo en cuenta el punto de inicio se calcula la distancia a los demás puntos,

posteriormente se selecciona el punto con la menor distancia y se repite el proceso hasta que todos los puntos hayan sido asignados en la trayectoria.

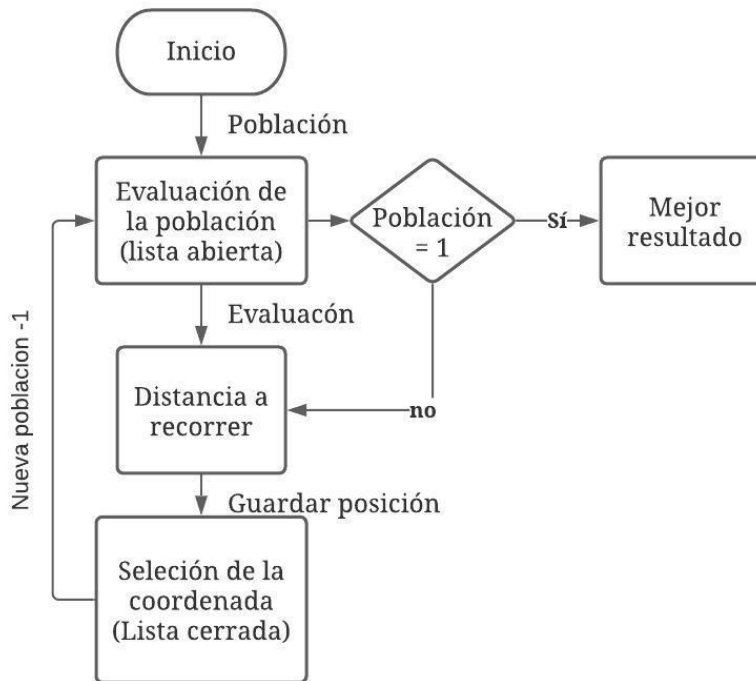


Figura 8 Lógica del algoritmo A\* para la planeación de trayectorias.

Estos dos algoritmos se implementaron para encontrar la distancia mínima que debe recorrer el quadrotor entre los diferentes puntos del cultivo, se compararon los resultados y se usó el que brindaba mejores resultados.

### 3.3 PROCESAMIENTO Y CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES

En una imagen digital se define como el dominio espacial a la imagen digitalizada, y al trabajar sobre este dominio se afectan directamente los píxeles de la imagen.

Mientras que un dominio de frecuencia es aquel que puede llegar a transformarse en un dominio espacial; para pasar de un dominio espacial a un dominio frecuencial es necesario hacer uso del teorema de Fourier.

Para obtener imágenes a partir de otras, se usan fundamentalmente el dominio temporal y el de la frecuencia, cada uno de estos en los que se trabaja con las imágenes depende de la aplicación que se le esté dando al sistema, puede ser más conveniente trabajar sobre un determinado dominio que sobre otro. Al trabajar con este cambio de dominio se pueden lograr objetivos como:

- Suavizar la imagen.
- Eliminar ruido.
- Realzar bordes.
- Detectar bordes.

Las transformaciones usando el teorema de Fourier se usan para convertir imágenes, señales de tiempo o espacio a imágenes en el dominio de la frecuencia; así se obtiene el espectro de la imagen original. Esta transformación además puede usarse para dar una definición o un detalle más amplio a ciertas zonas de una imagen

Para realizar una clasificación correcta de las imágenes es muy importante generar el proceso específico con el cual se pueden extraer tanto los patrones como las principales características, siendo estas etapas claves para obtener los resultados adecuados. Es determinante generar el número de clases u objetos, así como las propiedades a las que van a ser relacionadas dichas clases que se pretenden identificar dentro de la imagen. Al definir estas propiedades y clases se debe hacer la asignación de cada imagen a cada clase usando una regla de decisión establecida al determinar las propiedades y clases de cada imagen. Existen 2 formas de clasificación:

- Clasificación supervisada.
- Clasificación no supervisada.

La clasificación supervisada parte de un conjunto de clases y propiedades conocidas con anterioridad, mientras que la clasificación no supervisada no establece ninguna clase a priori, aunque es necesario determinar el número de clases que se requieren o se desean establecer y que estas sean definidas por procesos estadísticos. La asignación de cada uno de los individuos a las clases obtenidas anteriormente puede hacerse mediante diferentes procedimientos:

- No estadísticos (árboles de decisión, mínima distancia, paralelepípedos).



- Estadísticos clásicos (máxima probabilidad).
- Algoritmos basados en inteligencia artificial (lógica borrosa, redes neuronales).
- Algoritmos que utilizan información contextual.

Dependiendo de la ejecución, podemos hablar de detección de un objeto o de reconocimiento de un objeto, que, aunque sean técnicas similares, van a ser diferentes dependiendo del método de acción en el que se esté desarrollando. A la acción de localizar un elemento dentro de una imagen lo podemos llamar como detección de un objeto; permitiendo la identificación de uno o más elementos. Mientras que al hablar de detección de un objeto se sigue un proceso diferente y se conoce como clasificación de imágenes, a continuación, se especifican los 5 pasos para realizar la detección de los objetos en una imagen.

1. Preprocesamiento: aplicar técnicas de mejoramiento de contraste, reducción de ruido, realce de características, etc., de modo que la imagen se adecue para los siguientes procesos.
2. Segmentación: aislar los objetos de interés de la imagen.
3. Extracción de características: describir numéricamente la naturaleza de los objetos segmentados como su forma, color, textura, etc.
4. Clasificación: asignar una clase o categoría a cada objeto de la imagen basado en sus rasgos.
5. Interpretación: distinguir sobre los elementos presentes en la escena y tomar las decisiones pertinentes.

La base de conocimiento incluye el conocimiento previo del problema que debe ser resuelto, de modo que sirva en el diseño de cada etapa para la selección de las técnicas de procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones más adecuadas.

## 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

### 4.1 METODOLOGÍA

Este estudio es una investigación aplicada, ya que busca implementar algoritmos de inteligencia artificial para fortalecer el sector agrícola, desarrollando sistemas de optimización de trayectorias, sistemas de supervisión y procesamiento de imágenes para un cultivo de *Annona Muricata* con el fin de identificar problemas tanto nutricionales como de plagas, haciendo uso de algoritmos con IA. Para la investigación experimental se usa un drone Tello Edu, al que se le programa un algoritmo para generar la trayectoria optima que debe recorrer el quadrotor, minimizando la distancia dentro del área de cultivo, también pueden capturar imágenes del fruto, para posteriormente procesarlas y clasificarlas, permitiendo la identificación de anomalías. Este proceso busca minimizar el uso de plaguicidas perjudiciales no solo para la salud humana y animal; si no también para el medio ambiente.

Para el desarrollo de este estudio se llevaron a cabo las siguientes labores en función de dar cumplimiento a los objetivos específicos. Para el primer objetivo específico se realizaron las siguientes tareas:

- Se hizo el desarrollo del modelo matemático por ecuaciones de Euler-Lagrange y el espacio de estados del quadrotores, esto para identificar las ecuaciones y dinámicas del sistema.
- Se realizó una revisión bibliográfica sobre los diferentes métodos de control para las dinámicas del quadrotor, se diseñó el controlador por realimentación de estados y se realizaron las pruebas y simulaciones del sistema.
- Se identificaron 2 algoritmos de búsqueda inteligentes (AG y A\*) para realizar pruebas y determinar cuál de estos 2 permitían obtener la trayectoria más corta.

- Con el modelo, el control y la trayectoria que se debía recorrer se decidió realizar un algoritmo de optimización para el recorrido.

Para dar cumplimiento del segundo objetivo específico se desarrollaron las siguientes tareas.

- Revisión de la bibliografía respecto a estas enfermedades y las características del cultivo de *Annona Muricata*.
- Realización de una base de imágenes para entrenamiento y validación de los algoritmos para clasificación de imágenes.
- Desarrollo del algoritmo de clasificación, para este proceso se extrajeron las características principales, se realizaron los descriptores para lograr la identificación de las imágenes y posteriormente se entrenó al clasificador para separar las clases de las imágenes.

En el desarrollo del tercer objetivo específico se realizaron diferentes tareas.

- Se realizaron pruebas de campo con un quadrotor implementando los algoritmos para la planeación de trayectorias y de procesamiento de imágenes, para determinar la precisión de los algoritmos y con esto validar el proyecto
- Comunicación y control del quadrotor en tiempo real desde la computadora o base de operación.
- Implementación de filtro de Kalman para realimentación de estados y posición del quadrotor, envió de datos para la realización de trayectorias para supervisión del cultivo, gráfica de resultados de posición y análisis.
- Clasificación de imágenes por sectores del cultivo, análisis y resultados obtenidos por el algoritmo.

## 4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.2.1 DRONE TELLO EDU

El drone Tello Edu, es un quadrotor que contiene un sistema de posicionamiento y control internos, que facilitan realizar diversas maniobras durante su vuelo. Este es un quadrotor pequeño, con dimensiones de  $98 \times 92.5 \times 41 \text{ mm}$ , un peso de  $80 \text{ g}$ , con una batería LiPo  $3.8 \text{ V}$  ( $1100 \text{ mAh}$ ) que se encarga de la alimentación de la energía, permitiendo un vuelo continuo aproximado de 13 minutos de duración a una velocidad de  $15 \text{ km/h}$  (Robotics, 2018).

El sistema de comunicación que posee este quadrotor está dado por un protocolo UDP (Protocolo de Datagramas de usuario), con el que es posible el envío de mensajes y comandos desde un servidor hasta el drone como se observa en la Figura 9. Este protocolo hace parte de la familia de comunicación de internet, aunque es de resaltar que esta comunicación puede establecerse sin la necesidad de una conexión a internet. Este drone cuenta con una cámara a bordo, la cual permite la captura de imágenes.

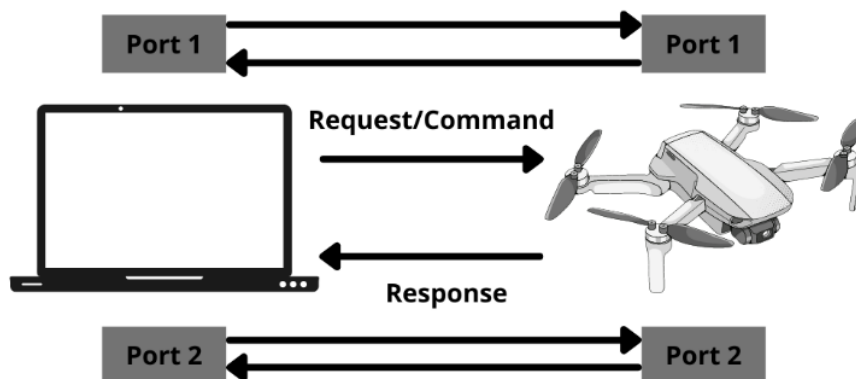


Figura 9 Comunicación UDP.

## 4.2.2 PYTHON Y MATLAB

Con ayuda del software Matlab® y Python se realizan las simulaciones de este proyecto, en algunas de las simulaciones la comunicación por sockets entre estos 2 programas es esencial para trabajar conjuntamente, dado que la comunicación con el Drone Tello Edu se realiza en Python y la mayoría de las simulaciones en Matlab®.

## 4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este proyecto, se describe el modelo matemático de un quadrotor, se muestran técnicas de planeación de trayectorias, así como la optimización de estas y se crea un algoritmo para clasificación de imágenes.

### 4.3.1 MODELO MATEMÁTICO

En los últimos años la utilización de quadrotores se ha visto incrementada gracias a su maniobrabilidad, bajo costo de producción y sencillez estructural. Debido a que poseen sistemas de tipo no lineal, los modelos y tipos de control presentados se han estudiado de manera acelerada, recurriendo a diversas técnicas para controlar y seguir trayectorias. Para la realización de este proyecto se hizo uso de un sistema simplificado para un punto de operación lineal.

Los quadrotores dentro de su sistema poseen 6 grados de libertad, tres usados en el desplazamiento  $(X, Y, Z)$  y tres relacionados con la rotación primitiva de cada eje, estos grados de libertad se conocen como Alabeo, Cabeceo y Guiñada o (Pitch, Roll, Yaw), representados por los ángulos  $(\theta, \phi, \psi)$ . El diagrama de cuerpo libre del sistema puede verse en la Figura 10, en este se ubican las principales fuerzas generadas por el quadrotor. Se establece como punto de origen 0 para el modelo matemático y para marcar el eje coordenado de este sistema, pero se hace necesario establecer otro eje coordenado sobre el quadrotor, debido a las rotaciones que puede realizar este.

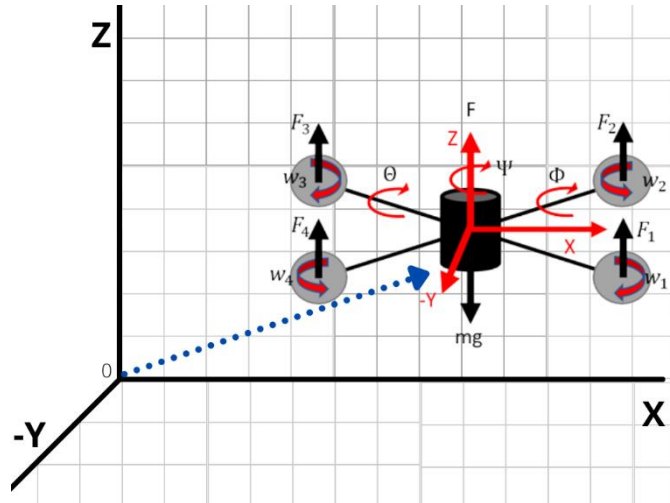


Figura 10 Sistema de coordenadas.

Es necesario para modelar el sistema una matriz de rotación teniendo en cuenta los ejes coordenados presentados en la Figura 10, con la cual se pueda establecer la orientación del quadrotor respecto al punto de origen, se hace necesario acudir a las rotaciones primitivas  $R(Z, \Psi)$ ,  $R(X, \theta)$  y  $R(Y, \Phi)$ , descritas por la ecuación (1). Para relacionar todas las rotaciones del sistema se haya la matriz  $\mathcal{R} = R(Z, \Psi)R(X, \theta)R(Y, \Phi)$  con la cual se identifica la orientación en la cual se localiza el quadrotor en cada intervalo de tiempo. La matriz de orientación completa del sistema puede ser observada en la ecuación (2).

$$\begin{aligned}
 R(Y, \Phi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\Phi & -S\Phi \\ 0 & S\Phi & C\Phi \end{bmatrix} \\
 R(X, \theta) &= \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \\
 R(Z, \Psi) &= \begin{bmatrix} C\Psi & -S\Psi & 0 \\ S\Psi & C\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\mathcal{R}(\Psi, \theta, \Phi) = \begin{bmatrix} C\Psi C\theta - S\Phi S\Psi S\theta & -C\Phi S\Psi & C\Psi S\theta + C\theta S\Phi S\Psi \\ C\theta S\Psi + C\Psi S\Phi S\theta & C\Phi C\Psi & S\Psi S\theta - C\theta S\Phi C\Psi \\ -C\Phi S\theta & S\Phi & C\Phi C\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

La ecuación Lagrangiana planteada en el modelo matemático de Euler-LaGrange, establece una fórmula que considera las energías que se presentan en el sistema como se ve en la ecuación (3).

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = E_{trans} + E_{rot} + E_{pot} \quad (3)$$

Donde  $E_{trans}$  =energía traslacional o cinética del sistema,  $E_{rot}$  =energías o cinética rotacionales y  $E_{pot}$  =energía potencial adquirida por la altura. Para dar solución a la ecuación (3) es necesaria la identificación de los estados del sistema  $q = [X, Y, Z, \theta, \Phi, \Psi]$  y su primera derivada la cual representa las velocidades lineales y angulares  $\dot{q} = [\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, \dot{\theta}, \dot{\Phi}, \dot{\Psi}]$ . Cada energía que está presente en el sistema está dada por la ecuación (4).

$$E_{trans} = \frac{1}{2} m \dot{\xi}^2$$

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I w^2 \quad (4)$$

$$E_{pot} = mgZ$$

Donde  $m$ = masa del quadrotor,  $\dot{\xi}$ = velocidades lineales,  $I$ = matriz de inercias,  $w$ = velocidades angulares y  $g$ = aceleración de gravedad. Dependiendo del impacto de

las energías en el modelo estas se pueden agrupar, debido a que  $E_{trans}$  y  $E_{pot}$  están directamente relacionadas con los ejes  $(X, Y, Z)$ , mientras que  $E_{rot}$  únicamente afecta a los ángulos de rotación  $(\Theta, \Phi, \Psi)$ . Al seguir la ley de Newton  $F = ma$  y la serie de Euler-LaGrange desarrollada en la ecuación (5), se determinan las ecuaciones que representan la dinámica del sistema.

$$\frac{d\mathcal{L}}{dq} - \frac{d}{dt} \left( \frac{d\mathcal{L}}{d\dot{q}} \right) = [F] \quad (5)$$

Resolviendo la ecuación (5) se obtienen las ecuaciones características del sistema, presentadas en (6).

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{f}{m} (C\Phi S\Theta C\Psi + S\Phi S\Psi) \\ \frac{f}{m} (C\Phi S\Theta S\Psi - S\Phi C\Psi) \\ \frac{f}{m} (C\Phi C\Theta - g) \end{bmatrix} \\ \ddot{\eta} = \begin{bmatrix} \ddot{\Phi} \\ \ddot{\Theta} \\ \ddot{\Psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{I_x + I_y - I_z}{I_x} \dot{\Psi} \dot{\Theta} + \frac{\tau_\Phi}{I_x} \\ \frac{-I_x - I_y + I_z}{I_y} \dot{\Psi} \dot{\Phi} + \frac{\tau_\Theta}{I_y} \\ \frac{I_x - I_y + I_z}{I_z} \dot{\Theta} \dot{\Phi} + \frac{\tau_\Psi}{I_z} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

sin embargo, como resultado se obtuvo un sistema de ecuaciones no lineales por lo cual se realizan algunas consideraciones para trabajar en la zona lineal. Se considera el quadrotor en sobrevuelo (flotando) donde  $\Theta \approx \Phi \approx 0$ ,  $\dot{\Theta} \approx \dot{\Phi} \approx \dot{\Psi} \approx 0$  y  $u_1 = mg$ . Por medio de estas consideraciones y haciendo uso de la serie de Taylor como se observa en la ecuación (7) es posible linealizar el sistema por ángulos pequeños donde  $C\Phi \approx C\Theta \approx C\Psi \approx 1$  y  $S\Phi \approx S\Theta \approx S\Psi$  (Reinoso et al., 2016)(Reinoso et al., 2016)(Reinoso et al., 2016)(Reinoso et al., 2016)(Reinoso et al., 2016)(Reinoso et al., 2016).



$$\begin{aligned}\cos \theta &\approx \cos \theta |_{\theta=0} + \frac{d \cos \theta}{d\theta} |_{\theta=0} \approx 1 \\ \sin \theta &\approx \sin \theta |_{\theta=0} + \frac{d \sin \theta}{d\theta} |_{\theta=0} \approx \theta\end{aligned}\tag{7}$$

Después de la linealización se obtiene (8).

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\Phi} \\ \ddot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{X}_{des} + \Delta \ddot{X} + \Delta X \\ \ddot{Y}_{des} + \Delta \ddot{Y} + \Delta Y \\ \ddot{Z}_{des} + \Delta \ddot{Z} + \Delta Z \\ \frac{1}{g} (\ddot{X} S \Psi - \ddot{Y} C \Psi) \\ \frac{1}{g} (\ddot{X} C \Psi - \ddot{Y} S \Psi) \\ \Psi_{des} \end{bmatrix}\tag{8}$$

Los parámetros de control del sistema permiten realizar los diferentes desplazamientos en  $(Z, \theta, \Phi, \Psi)$  que se pueden controlar directamente,  $(X, Y)$  son desplazamientos resultantes por la inclinación  $(\theta, \Phi)$  respectivamente. En (9) se muestran las igualdades para cada uno de los desplazamientos que es posible controlar.

$$T = \begin{bmatrix} \tau_{\theta} \\ \tau_{\Phi} \\ \tau_{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(F_3 - F_1) \\ l(F_4 - F_2) \\ l(F_1 - F_2 + F_3 - F_4) \end{bmatrix}\tag{9}$$

$$F = [F_z] = [F_1 + F_2 + F_3 + F_4]$$

Donde  $l$ = distancia de los motores al centro de masa,  $F_i$  =Fuerza ejercida por cada uno de los motores dependiendo de una constante de empuje  $K_e$  que se establece

según el tipo y forma de la hélice utilizada ( $F_i = K_e w^2$ ). Para finalizar el modelo del sistema, es necesario identificar las variables de estado con las cuales se trabajan, para representar el modelo en espacio de estados. En (10) podemos observar las variables que se utilizaran para formar las matrices del sistema.

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} X_1 = X \\ X_2 = Y \\ X_3 = Z \\ X_4 = \dot{X} \\ X_5 = \dot{Y} \\ X_6 = \dot{Z} \\ X_7 = \Phi \\ X_8 = \Theta \\ X_9 = \Psi \\ X_{10} = \dot{\Phi} \\ X_{11} = \dot{\Theta} \\ X_{12} = \dot{\Psi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde las posiciones son  $(X, Y, Z)$  y sus respectivas velocidades  $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ , así mismo se controlan los ángulos de Euler  $(\Phi, \Theta, \Psi)$  con sus velocidades angulares  $(\dot{\Phi}, \dot{\Theta}, \dot{\Psi})$ , En la ecuación (11) se plantean las ecuaciones que describen cada una de las variables de estado.

$$\dot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 = \dot{X} \\ \dot{X}_2 = \dot{Y} \\ \dot{X}_3 = \dot{Z} \\ \dot{X}_4 = \frac{f}{m}(S\Theta C\Psi C\Phi + S\Psi S\Phi) \\ \dot{X}_5 = \frac{f}{m}(S\Theta S\Psi C\Phi + C\Psi S\Phi) \\ \dot{X}_6 = -g + \frac{F}{m}(C\Theta C\Phi) \\ \dot{X}_7 = p + q \cdot S\Phi \tan \Theta + r \cdot C\Phi \tan \Theta \\ \dot{X}_8 = q \cdot C\Phi - r \cdot S\Phi \\ \dot{X}_9 = q \cdot S\Phi \sec \Theta + r \cdot C\Phi \sec \Theta \\ \dot{X}_{10} = \frac{qr(I_y - I_z)}{I_x} + \frac{I_r F}{I_x} + \frac{l(F_4 - F_2)}{I_x} \\ \dot{X}_{11} = \frac{pr(I_z - I_x)}{I_y} + \frac{I_r F}{I_y} + \frac{l(F_3 - F_1)}{I_y} \\ \dot{X}_{12} = \frac{pq(I_x - I_y)}{I_z} + \frac{l(F_3 + F_1 - F_4 - F_2)}{I_z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Haciendo uso de la linealización descrita anteriormente en la ecuación (7) se obtiene (12).

$$\dot{\tilde{X}} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 = \dot{X} \\ \dot{X}_2 = \dot{Y} \\ \dot{X}_3 = \dot{Z} \\ \dot{X}_4 = \frac{F}{m} (\Theta \cdot C\Psi + \Phi \cdot S\Psi) \\ \dot{X}_5 = \frac{F}{m} (\Theta \cdot S\Psi - \Phi \cdot C\Psi) \\ \dot{X}_6 = -g + \frac{F}{m} \\ \dot{X}_7 = p \\ \dot{X}_8 = q \\ \dot{X}_9 = r \\ \dot{X}_{10} = \frac{l(F_4 - F_2)}{I_x} \\ \dot{X}_{11} = \frac{l(F_3 - F_1)}{I_y} \\ \dot{X}_{12} = \frac{l(F_3 + F_1 - F_4 - F_2)}{I_z} \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 4.3.2 DISEÑO CONTROLADOR

Expandiendo la ecuación (8) para el diseño del controlador se obtiene (13).

$$\ddot{r}_{des} = \begin{bmatrix} \ddot{r}_X + kd1 * (r_{Xdes} - \dot{r}_X) + kp1 * (r_{Xdes} - r_X) \\ \ddot{r}_Y + kd2 * (r_{Ydes} - \dot{r}_Y) + kp2 * (r_{Ydes} - r_Y) \\ \ddot{r}_Z + kd3 * (r_{Zdes} - \dot{r}_Z) + kp3 * (r_{Zdes} - r_Z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde  $r_{des}^{\ddot{}}$  =vector de aceleraciones para la trayectoria en XYZ,  $r_x^{\ddot{}}$  =aceleración en el eje X,  $kd1$  =constante derivativa para el control de la velocidad en el eje X,  $kp1$  =constante proporcional para el control de la posición en el eje X. De acuerdo con la ecuación (9), la única fuerza ejercida para el control de la altura es la fuerza que se requiere en el eje Z, teniendo en cuenta la ecuación (6) donde se expresa la función que describe la aceleración requerida en el eje Z, se plantea la ecuación (14) y (15). En la cual se representa la señal de control  $U_1$  y la fuerza ejercida en el eje Z respectivamente.

$$U_1 = (m * g) + (m * r_{Zdes}^{\ddot{}}) \quad (14)$$

$$F = U_1 \quad (15)$$

Donde  $U_1$  =señal de control,  $m$  =masa del quadrotor,  $g$  =aceleración gravitacional,  $r_{Zdes}^{\ddot{}}$  =aceleración en el eje Z. Para la segunda etapa del control es necesario controlar las dinámicas rotacionales del sistema, como se observó en la ecuación (6) estas dinámicas se relacionan con los desplazamientos en los ejes X y Y. En la ecuación (16) se plantea la fórmula que describe la rotación de cada uno de los ángulos.

$$\begin{bmatrix} \phi_{des} \\ \theta_{des} \\ \psi_{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(r_{Xdes}^{\ddot{}} * \sin(\psi_{des}) - r_{Ydes}^{\ddot{}} * \cos(\psi_{des}))}{g} \\ \frac{(r_{Xdes}^{\ddot{}} * \cos(\psi_{des}) - r_{Ydes}^{\ddot{}} * \sin(\psi_{des}))}{g} \\ \psi_{des} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde  $\phi_{des}$  =ángulo *pitch* deseado,  $\theta_{des}$  =ángulo *roll* deseado y  $\psi_{des}$  =ángulo *yaw* deseado. En la ecuación (16) para los ángulos *pitch* y *roll* deseados se determina que dependen del desplazamiento en X o Y. Con las dinámicas de rotación es posible realizar la segunda ley de control para los momentos generados

en la operación del quadrotor, en la ecuación (17) se presenta la señal de control  $U_2$  para controlar las aceleraciones angulares del sistema.

$$U_2 = \begin{bmatrix} kp\phi * (\phi_{des} - \phi) + kd\phi * (-p) \\ kp\theta * (\theta_{des} - \theta) + kd\theta * (-q) \\ kp\psi * (\psi_{des} - \psi) + kd\psi * (r_{des} - r) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Donde  $kp\phi$  =constante proporcional para el ángulo de inclinación deseado,  $\phi$  =ángulo *pitch* medido,  $kd\phi$  =constante derivativa para controlar la velocidad angular en *pitch*, para casos prácticos la velocidad angular *pitch* y *roll* deben ser 0 para mantener el sistema estable. En la ecuación (18) se expresa la función para el momento que percibe el quadrotor en vuelo.

$$M = I * U_2 \quad (18)$$

Donde  $M$  =momentos percibidos por el quadrotor,  $I$  =inercias del sistema y  $U_2$  =señal de control. En la Tabla 1 se presentan las constantes de control del sistema.

Tabla 1 Constantes de control.

Variable	$kp$	$kd$
X	80	12
Y	80	12
Z	90	9
$\Phi$	12000	60
$\Theta$	12000	60
$\Psi$	160	72

Para controlar el sistema se decidió diseñar un control por realimentación de estados. El controlador consta de una etapa de realimentación de los estados, integrador para eliminar el error en estado estacionario y observador. El quadrotor es un sistema de múltiples entradas múltiples salidas (MIMO), en el cual contamos con 4 entradas (velocidades de los motores o referencia  $Z, \Phi, \theta, \phi$ ) y 6 salidas ( $X, Y, Z, \Phi, \theta, \psi$ ). Los desplazamientos en  $(X, Y)$  dependen de  $(\Phi, \theta, \psi)$  por lo cual en este control únicamente tendremos 4 entradas y 4 salidas.

La representación en espacio de estados del sistema está dada por la ecuación (19), en la cual  $A_{12 \times 12}$  está relacionada con los estados del quadrotor,  $B_{12 \times 4}$  relacionada a las entradas del sistema,  $C_{4 \times 12}$  es la matriz de salidas del sistema y  $D_{4 \times 4}$  representa las perturbaciones que puedan existir a la entrada, para este caso se no se consideraran perturbaciones Por lo cual  $D$  es nula.

$$\begin{aligned}\dot{\overline{X}}(t) &= A * \overline{X}(t) + B * U(t) \\ Y(t) &= C * \overline{X}(t) + D * U(t)\end{aligned}\tag{19}$$

Al ser un sistema MIMO, se procedió a subdividir el sistema en 4 sistemas pequeños de segundo orden. Se diseñaron 4 controladores para cada una de las dinámicas ( $Z, \Phi, \theta, \psi$ ). Los controles por realimentación de estados con error en estado estacionario  $E_{ss} = 0$ , tiempo de establecimiento de  $ts = 0.1s$  y  $1.1s$  para  $z$ , constante de amortiguamiento  $\xi = 0.8$ , con los anteriores parámetros se pretende obtener la respuesta de cada uno de los subsistemas descrita por (20), donde el máximo sobre impulso no debe sobrepasar el 15% de la entrada, y el tiempo de establecimiento se manga según lo requerido. Con la respuesta deseada se diseñan los controladores en tiempo continuo para posteriormente discretizarlos. La respuesta deseada está dada por la ecuación

$$\begin{aligned}R_{des} &= s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n + \omega_n^2 \\ \omega_n &= \frac{4}{\xi \cdot ts}\end{aligned}\tag{20}$$

Donde  $R_{des}$  = polos continuos,  $\xi$  = constante de amortiguamiento,  $\omega_n$  = frecuencia natural del sistema y  $t_s$  = tiempo de establecimiento. Para un sistema representado en espacio de estados como como en (19), es posible hallar un vector de constantes  $K$  que cumpla con la ecuación (21).

$$U(t) = -K \cdot \overline{X(t)} \quad (21)$$

Obteniendo los polos deseados podemos hallar los valores propios del sistema ( $K$ ) para satisfacer la igualdad planteada en (21).

$$|R_{des} = (A - B \cdot K)| \quad (22)$$

Dándole solución a la ecuación (22) se pueden determinar los valores de  $K$ , tales que cumplen con (21). Estas constantes  $K$  son los valores de realimentación del sistema, sin embargo, estos no garantizan error en estado estacionario igual a 0 por lo cual es necesario hallar una constante de integración  $K_i$ , para poder garantizar que  $Y(t)_{t \rightarrow \infty} = U(t)$ .  $K_i$  depende del sistema y de los valores propios hallados anteriormente como se muestra en (23).

$$K_i = (C \cdot (I - A + B \cdot K)^{-1} \cdot B)^{-1} \quad (23)$$

En la ecuación (24) se puede observar el método para discretizar un sistema continuo, el método de la transformada inversa de Laplace permite trabajar con una aproximación discreta de un sistema continuo.

$$G(T_m) = \frac{1}{2\pi i} \int A(s) \cdot e^{st} ds \quad (24)$$

$$A(s) = (s \cdot I - A)^{-1}$$

Donde  $G(T_m)$  = matriz equivalente de  $A$  en discreto,  $I$  = matriz identidad del sistema (depende del orden de  $A$ ) y  $T_m$  = tiempo de muestreo del sistema. La matriz  $B$  también debe ser discretizada para el diseño de los controladores en discreto, este proceso se realiza por medio de la ecuación (25).

$$H(T_m) = \int_0^{T_m} G(T_m) \cdot B dT \quad (25)$$

Donde  $H(T_m)$  = matriz equivalente de  $B$  en discreto. Para el diseño de los controladores en discreto es necesario discretizar la respuesta deseada de (20) para esto usamos la relación de (26).

$$RD_{des} = e^{R_{des} \cdot T_m} \quad (26)$$

Donde  $RD_{des}$  = polos discretos. Teniendo los polos y las matrices que describen el sistema en discreto es posible encontrar las constantes  $Kd$  y  $Kid$  para la realimentación de estados, para esto usamos las ecuaciones (22) y (23) reemplazando las matrices continuas por las nuevas matrices en discreto. Con el sistema de realimentación discreto diseñado, se realiza el cálculo de los observadores encargados de estimar los estados que no se pueden medir en el sistema.

Como condición inicial de los observadores, se establece que los observadores deben responder 10 veces más rápido que el sistema de realimentación según (27).

$$RObs_{des} = 10 \cdot RD_{des} \quad (27)$$

Donde  $RObs_{des}$  = polos del observador discreto. Con estos polos es posible hallar las constantes de realimentación para el observador de estados por medio de la ecuación (22).



El control para la operación autónoma de un quadrotor se puede observar en la Figura 11, donde en el bloque (A) se representa la planeación de la trayectoria, determinando los puntos de referencia  $(X, Y, Z, \Psi)$ , claves para la operación del sistema. En el bloque (B) se encuentra la estructura de control, en este se colocan los controladores diseñados anteriormente y por último en (C) se tienen las dinámicas propias del quadrotor ( Mellinger & Kumar, 2012). Este controlador fue implementado para simular el quadrotor y validar los resultados de los algoritmos de planeación de trayectorias.

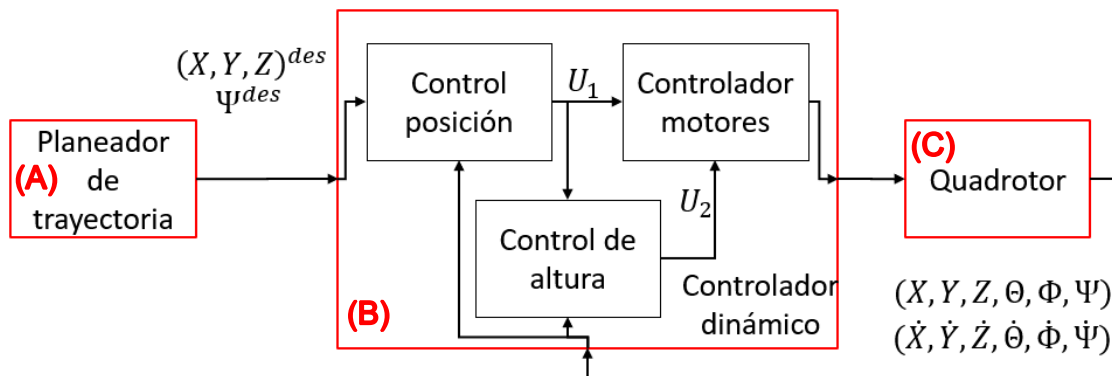


Figura 11 Sistema de control autónomo de un quadrotor.

### 4.3.3 PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS

La planeación de trayectorias para los quadrotores se ha convertido en un factor fundamental para los vuelos autónomos, en particular en la selección de puntos para el recorrido (waypoints). En (28) establece un vector de posiciones por los cuales va a sobrevolar el quadrotor.

$$X = [p_1, p_2, p_3, p_4, \dots, p_n] \quad (28)$$

Este proyecto busca determinar la trayectoria que mejor se adapte al quadrotor y a la necesidad del proyecto, además que se busca minimizar la distancia de recorrido dentro del cultivo. Basando la planeación en la inteligencia artificial son utilizados dos métodos algoritmo genético y A\*. Para el desarrollo de los algoritmos de planeación de trayectorias se representa la división del cultivo por cuadrantes y se nombra cada uno de estos, como se logra observar en la Figura 12. El cuadrante A en todos los casos será el inicio de trayectoria, mientras que el cuadrante B será el punto final de la misma.

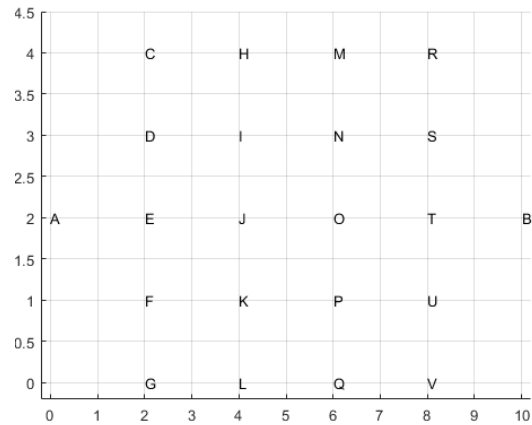


Figura 12 División por cuadrantes.

Se seleccionaron 10 cuadrantes de forma aleatoria, con el objetivo de obtener una trayectoria óptima haciendo uso de los 2 algoritmos de búsqueda con IA. El inicio y final de la trayectoria va a corresponder a el cuadrante A y B respectivamente. En la Figura 13 se muestran los primeros puntos seleccionados.

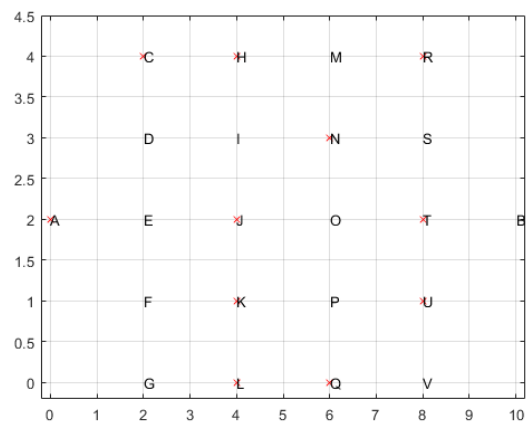


Figura 13 Selección de los puntos a recorrer.

Se utilizaron las siguientes heurísticas en los algoritmos para verificar con cual se obtienen los mejores resultados:

1. Puntos más cercanos.
2. Puntos más cercanos y punto inicial.
3. Puntos más cercanos y punto final.
4. Puntos más cercanos, punto inicial y punto final.

La distancia Euclidiana entre puntos se halla mediante la ecuación (29), con esta ecuación se puede minimizar la función para poder expresar la trayectoria al tener únicamente en cuenta el punto más cercano para el desplazamiento del quadrotor.

$$h_1 = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (29)$$

Donde  $x_i$  y  $y_i$  son las coordenadas de cada uno de los puntos. Para las demás heurísticas que se utilizaran en los algoritmos se tiene en cuenta la ecuación (29) que representa la función  $h_1$ , para la heurística dos, tres y cuatro se representara la función a minimizar en las ecuaciones (30), (31) y (32) respectivamente.

$$h_2 = h_1 + \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} \quad (30)$$

$$h_3 = h_1 + \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2} \quad (31)$$

$$h_4 = h_1 + \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2} + \sqrt{(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2} \quad (32)$$

Donde  $f$  = función de distancia entre cada uno de los puntos,  $x_i$  y  $y_i$  son las coordenadas de cada uno de los puntos,  $x_n$  y  $y_n$  son las coordenadas del punto final y  $x_1$  y  $y_1$  son las coordenadas del punto inicial.

El seudocódigo que fue usado en el algoritmo genético puede ser apreciado en la Figura 14, en esta se plantea la condición para poder detener el algoritmo, el cual consiste en el cruzamiento y mutación de individuos, una vez que se obtenga como resultado la misma población  $n$  veces el sistema se detiene.

#### **Algoritmo Genético para minimizar Distancia**

```

1: Población = 10 puntos seleccionados al azar
2: Coordenadas = Coordenadas de la población
3: Parámetro de finalización = ingresado por el usuario
4: Ciclo finalización  $\neq$  Parámetro de finalización hacer
5:   for  $i \leftarrow$  hasta longitud de Población hacer
6:     Distancia( $i$ ) = heurística seleccionada
7:   end for
8:   Distancia = organizar de menor distancia a mayor
9:   Elite = 10% de la Población con los mejores resultados
10:  for  $j \leftarrow 1$  hasta 90% restante de la Población hacer
11:    Cruzamiento = partes iguales de la Población para cruzar
12:  end for
13:  Poblaciónnueva = Elite + Cruzamiento
14:  for  $k \leftarrow 1$  hasta 10% Poblaciónnueva hacer
15:    Mutación = reorganizar las coordenadas de la trayectoria al azar
16:  end for
17:  Poblaciónnueva = Poblaciónnueva + Mutación
18:  Población = Poblaciónnueva
19:  Si Población(1) == ... == Población(Parámetro de finalización) entonces
20:    finalización = Parámetro de finalización
21:  end Si
22: end Ciclo

```

Figura 14 Seudocódigo del algoritmo genético.

Para evaluar la población que se genera aleatoriamente, se pretende generar una función, que mide la distancia total recorrida por el quadrotor siguiendo los puntos establecidos y que depende exclusivamente de la heurística que se está aplicando. Para obtener la trayectoria optima, luego de evaluar los individuos de cada población, son seleccionados los mejores para el cruzamiento y la mutación.

Para el algoritmo A\* se usa un seudocódigo del algoritmo como se presenta en la Figura 15. Se trabaja tanto una lista abierta como una cerrada, los puntos a los cuales puede desplazarse el quadrotor en cualquier instante son presentados en la lista abierta, mientras que los puntos a los cuales se desplaza después de minimizar la función según la heurística aplicada son presentados en la lista cerrada.

### **Algoritmo A\* para minimizar **Distancia****

```
1: Población = 10 puntos seleccionados al azar
2: Coordenadas = Coordenadas de la población
3: for  $i \leftarrow$  hasta longitud de Población hacer
4:     Longitud = Lista abierta
5:     for  $j \leftarrow 1$  hasta Longitud hacer
6:         Distancia( $j$ ) = heurística seleccionada
7:     end for
8:     Distancia = organizar de menor distancia a mayor
9:     Lista cerrada = coordenada con la menor distancia
10:    Lista abierta = Población – Lista cerrada
11: end for
```

Figura 15 Seudocódigo del algoritmo A\*.

## **4.3.4 OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIA**

Al recorrer trayectorias entre puntos, es importante realizar la optimización de la trayectoria y así suavizarla, para esto se hace necesario encontrar una función de orden  $n$  que una todos los puntos que se deben recorrer. La posición del quadrotor en cada eje y derivada (velocidad y aceleración) son fundamental para descubrir esta función.

Para la planeación de trayectorias es necesario establecer unas condiciones específicas del comportamiento que se necesita para el seguimiento del recorrido, en casos generales es necesario establecer:

- Posición.
- Velocidad.
- Aceleración.

En la Tabla 2 se establecen las condiciones de vuelo que se requieren en el seguimiento de la trayectoria.

Tabla 2 Condiciones de vuelo para trayectoria.

Tiempo (s)	Posición	Velocidad $\left(\frac{m}{s}\right)$	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
$t = 0$	$p_1$	0	0
$t = t_1$	$p_2$	0	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t = t_f$	$p_n$	0	0

La trayectoria puede establecerse o diseñarse como una función por partes dependientes del tiempo. También es posible incluir las restricciones de la Tabla 2 en este tipo de función. La trayectoria deseada en función del tiempo es expresada como se muestra en (33).

$$Tp(t) = \left\{ \begin{array}{ll} Tp_1(t) & t_1 \leq t < t_2 \\ Tp_2(t) & t_2 \leq t < t_3 \\ \vdots & \\ Tp_n(t) & t_{n-1} \leq t < t_n \end{array} \right\} \quad (33)$$

Donde  $t_i$  = restricción de tiempo para la trayectoria deseada y  $Tp_i$  = representación por segmentos de la trayectoria validos para cada intervalo de tiempo. Para hallar una trayectoria optimizada es necesario determinar la variable, o estado que se desea mejorar. Una vez seleccionada la variable se debe encontrar una función de orden  $n$  que suavice la trayectoria entre los puntos que se van a recorrer. Para encontrar esta función es necesario tener en cuenta parámetros como la velocidad

y aceleración del quadrotor en cada uno de sus ejes, en (34) se plantea la ecuación a resolver para encontrar la función optimizada entre 2 puntos  $Tp_i$ .

$$Tp_i^*(t) = \underset{x(t)}{\operatorname{argmin}} \int_0^T \mathcal{L}(Tp_i^{dn}) dt \quad (34)$$

Donde  $Tp_i^*(t)$  = función optima,  $\underset{x(t)}{\operatorname{argmin}}$  = mínimo resultado posible,  $\mathcal{L}(X^{dn})$  = Lagrangiano de la n-sima derivada de  $Tp_i$ . La derivada de  $Tp_i$  depende de la variable o estado que se desee optimizar. En la Tabla 3 se muestran las variables a optimizar y su n-sima derivada para plantear (34).

Tabla 3 Variables para optimización.

<b>Variable para optimizar</b>	<b>N-sima derivada</b>
Distancia-Velocidad	$dn = 1$
Aceleración	$dn = 2$
Vibraciones o sacudidas	$dn = 3$
Trayecto instantáneo	$dn = 4$

Utilizando la serie de Euler-Lagrange mostrada en (35) es posible determinar la función entre cada uno de los pares de puntos en cualquiera de los ejes  $(X, Y, Z)$ .

$$\frac{d\mathcal{L}}{dx} - \frac{d}{dt} \left( \frac{d\mathcal{L}}{d\dot{x}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{d\mathcal{L}}{d\ddot{x}} \right) - \frac{d^3}{dt^3} \left( \frac{d\mathcal{L}}{d\ddot{\ddot{x}}} \right) - \frac{d^4}{dt^4} \left( \frac{d\mathcal{L}}{dx^n} \right) = 0 \quad (35)$$

Solucionando la serie de Euler-Lagrange e integrando de  $0 \rightarrow t_n$  se obtiene una función de la forma (36).

$$X(t) = C_8 t^7 + C_7 t^6 + C_6 t^5 + C_5 t^4 + C_4 t^3 + C_3 t^2 + C_2 t + C_1 \quad (36)$$

La función (36) depende de la optimización que se quiera realizar como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Funciones resultantes para optimización.

<b>Variable para optimizar</b>	<b>Función</b>
Distancia-Velocidad	$X(t) = C_2 t + C_1$
Aceleración	$X(t) = C_4 t^3 + C_3 t^2 + C_2 t + C_1$
Vibraciones o sacudidas	$X(t) = C_6 t^5 + C_5 t^4 + C_4 t^3 + C_3 t^2 + C_2 t + C_1$
Trayecto instantáneo	$X(t) = C_8 t^7 + C_7 t^6 + C_6 t^5 + C_5 t^4 + C_4 t^3 + C_3 t^2 + C_2 t + C_1$

Donde  $x(t)$ = posición optimizada para el eje  $X$  con respecto al tiempo,  $C_i$ = constantes de optimización,  $t$ = tiempo  $0 \rightarrow t_n$ . Para determinar las constantes de



optimización es necesario plantear un sistema de ecuaciones y hallar su solución, para encontrar las otras funciones del sistema se usan las derivadas y las condiciones de frontera establecidas en la Tabla 2. En la Figura 16 se muestra el pseudocódigo para encontrar las constantes de optimización de la trayectoria.

### **Optimización de trayectorias**

- 1:  $t \rightarrow$  tiempo inicial
- 2:  $t_n \rightarrow$  tiempo final
- 3: Función del modelo optimizado
- 4: Optimización por Euler-Lagrange
- 5:  $M \rightarrow$  matriz  $n \times n$  (depende de la variable a optimizar)
- 6:  $B \rightarrow$  vector  $n \times 1$  (depende de las condiciones de frontera)
- 7: Solución  $M * A = B$
- 8:  $A \rightarrow$  Constantes optimizadas

Figura 16 Pseudocódigo optimización de trayectorias.

### **4.3.5 ESTIMACIÓN CON FILTRO KALMAN**

Para enviar los comandos al quadrotor sin necesidad de establecer previamente una conexión se establece la estructura del protocolo UDP que se puede observar en la Tabla 5, el datagrama enviado contiene 4 campos divididos en 2 bloques de 32 bits.

Tabla 5 Datagrama comunicación con Tello Edu.

<b>Bits</b>	<b>(0-15)</b>	<b>(16-31)</b>
0	Puerto origen	Puerto destino
32	Longitud del mensaje	Suma de verificación

Mediante el uso de API diseñada por DJI para la comunicación con el Tello Edu, es posible establecer un sistema de comunicación que determine el estado del quadrotor en cualquier momento, por medio del método `get_current_state` (Obtener el estado actual) de esta API se obtiene un vector con los estados que han sido medidos por los sensores que posee el quadrotor. Revisando la ecuación ((37) podemos ver por medio de la API los estados del quadrotor.

$$s = [\Phi, \Theta, \Psi, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, T_{min}, T_{max}, tof, Z, battery, baro, time, Acc_x, Acc_y, Acc_z]^T \quad (37)$$

Al utilizar el filtro del Kalman (KF) fue posible realizar la estimación de posición del quadrotor. Este tipo de estimación está orientado a sistemas dinámicos, que poseen información de diferentes sensores. En este caso, el Filtro de Kalman se usó como un observador, dado que la estabilidad del sistema es de vital importancia. En la ecuación (38) se describe la fase de predicción del filtro.

$$\begin{aligned} X_k &= f(X_{k-1}, U_{k-1}) \\ P_k &= FP_{k-1}F^T + WQ_{k-1}W^T \end{aligned} \quad (38)$$

El ajuste y estimación del filtro de Kalman están descritos en la ecuación (39).

$$\begin{aligned} G_k &= P_k H^T [H P_k H^T + R]^{-1} \\ X_k &= X_k + G_k [Z_k - h(X_k)] \\ P_k^+ &= (I - G_k H) P_k (I - G_k H)^T + G_k R G_k^T \end{aligned} \quad (39)$$

Siendo  $X$  = posición del quadrotor,  $U$  = entrada del control,  $f()$  y  $h()$  funciones que representan el sistema.  $P, Q, R$  covarianza de error, de ruido y de proceso respectivamente,  $G_k$  = ganancia del filtro Kalman,  $Z$  = salida de la planta.  $F, W, H$  son las matrices jacobianas del proceso.

El esquema de control y comunicación del quadrotor se muestra en la Figura 17, como primer bloque se observa la planificación del recorrido, donde se obtiene la señal de referencia que debe seguir el quadrotor. El sistema posee sensores a bordo que permiten conocer el estado actual de la aeronave, el valor de estos es enviado al computador para ser filtrados con el KF (Filtro de Kalman) y posteriormente se hace la realimentación del sistema con la estimación del filtro.

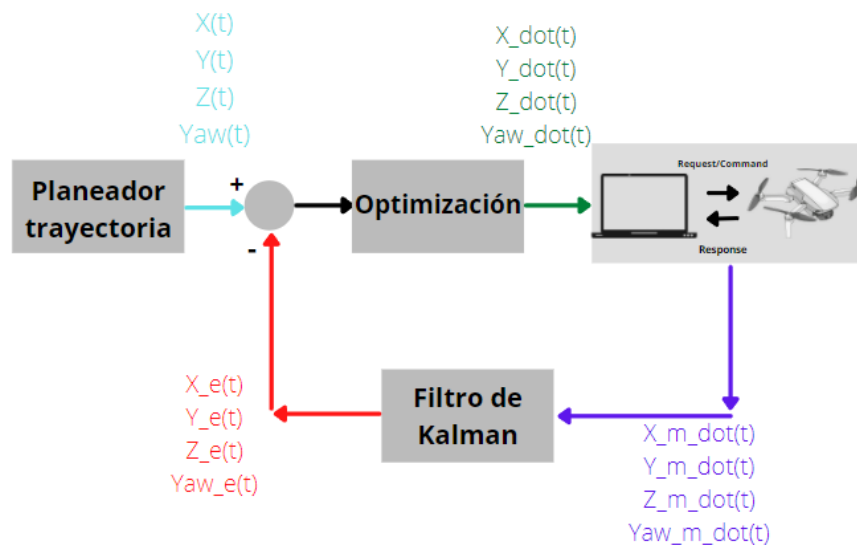


Figura 17 Esquema de control y estimación con filtro de Kalman.

### 4.3.6 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

En la Figura 18 se observa un fruto de *Annona Muricata*, comúnmente llamada guanaba, además las ramas y las hojas del árbol. Para realizar una clasificación adecuada de la imagen, se hace necesario identificar características invariantes; ya

que esta va a estar condicionada por factores cambiantes como lo son el estado de la luz natural, la maduración del fruto que dependiendo de su estado su color puede variar, el color de las hojas, las ramas del árbol, la orientación o ubicación del fruto dentro de esta pueden ser diferentes en las diferentes imágenes.



Figura 18 Imagen de guanábana natural.

Para la clasificación de imágenes se trata de reconocer las características propias de cada imagen, para así poder formar un vector  $p_k$ , que con los elementos específicos pueda formar el conjunto de los descriptores locales de las imágenes. Los elementos importantes identificados en el fruto, como lo son las regiones del color o bordes, son determinados por un vector que contiene los puntos de interés identificados en las imágenes, este vector se presenta en la ecuación (40) Figura 44, además que estas contienen las propiedades de un píxel con relación a su vecindad.

$$p_k = (p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn}) \quad (40)$$

El primer proceso que se realiza transformar las imágenes a escala de grises, siempre y cuando se mantenga la información de la intensidad del color. Cada píxel

de la imagen pasara por este proceso, por medio de la transformación descrita en (41).

$$I = (R + G + B) * \frac{255}{\max (R + G + B)} \quad (41)$$

Para resaltar los contornos y puntos importantes de la imagen, se realiza una convolución entre la imagen y un filtro, esto debido a que se hace más sencilla la detección de características al aplicar este proceso en cada píxel de la imagen. En el procesamiento de señales se usa muy comúnmente la ecuación de convolución representada en (42).

$$(f * g)(x, y) = \sum_{x', y'} g(x', y') \cdot f(x - x', y - y') \quad (42)$$

Para procesamiento de imágenes se modifica la ecuación (42) para quedar expresada de la forma (43).

$$I(x, y) * k(x, y) = \sum_{x', y'} k(x', y') \cdot i(x - x', y - y') \quad (43)$$

Donde  $I$  = imagen y  $k$  = es el filtro que se va a aplicar. La función gaussiana con un nivel  $\sigma$  de suavizado que se representa en (44), es la adecuada para representar el filtro  $k$ .

$$k(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (44)$$

Las características en diferentes ubicaciones y escalas de un mismo objeto pueden ser identificadas haciendo uso del método SIFT, que está basado en un filtro cascada; en la Figura 19, se logra observar el proceso usado en para la detección de puntos de interés en diferentes escalas de la imagen.

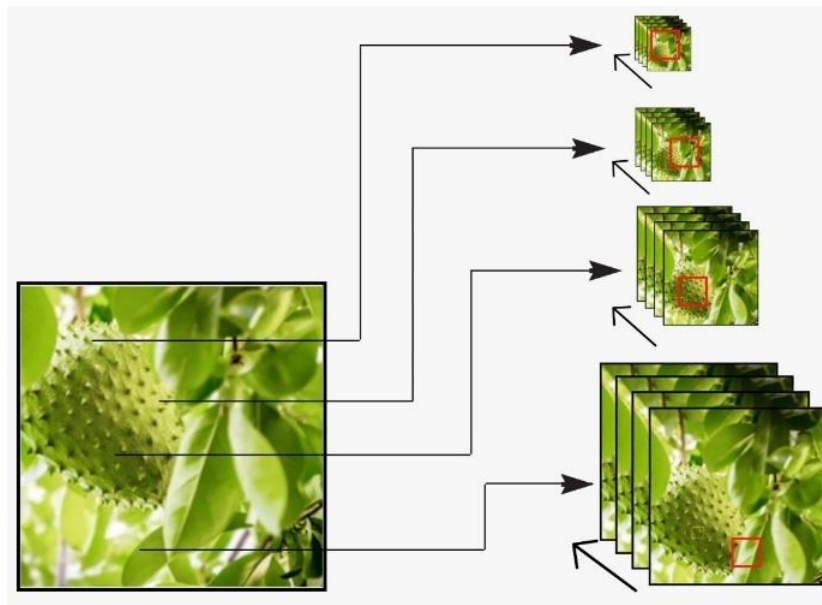


Figura 19 Método SIFT.

Para realizar el proceso de descripción de las características locales, se tiene en cuenta el gradiente en la intensidad que existe de un píxel a otro. Este gradiente

queda definido por la dirección y por la magnitud del cambio de intensidad entre pixeles tal como se muestra en (45).

$$\begin{aligned} dx &= I(x + 1, y) - I(x - 1, y) \\ dy &= I(x, y + 1) - I(x, y - 1) \end{aligned} \tag{45}$$

En (46) se halla la orientación del gradiente.

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right) \tag{46}$$

También es necesario hallar la magnitud del gradiente, esto se realiza en (47).

$$m(x, y) = \sqrt{dx^2 + dy^2} \tag{47}$$

Se puede construir un histograma de gradientes o vector con la orientación y magnitud de diferentes gradientes. Dicho vector es el encargado de contener la información y las características de diferentes puntos  $p_k$ . En (48) se describe el histograma de orientaciones.

$$h_k = \sum_{(x,y)} w_k(x,y)m(x,y) \quad (48)$$

$$H_k = (h_1, h_2, \dots, h_n)$$

Donde

$$w_k = \begin{cases} 1, & k = i\theta(x,y) \\ 0, & k \neq i\theta(x,y) \end{cases} \quad (49)$$

$$i\theta(x,y) = \frac{\theta(x,y)}{d\theta}$$

La correlación entre cada punto ubicados en una imagen, con los puntos de otra imagen es posible encontrarse usando el histograma de correlaciones de los puntos de interés y así determinar si se encuentran puntos lo suficientemente similares como para ser clasificados iguales. Entre más divisiones se hagan entre puntos, más sensible es la identificación, por lo que el  $d\theta$ , depende de la sensibilidad que se necesite en el proceso. Con este término se realiza una agrupación de los gradientes según su orientación. De cada imagen se obtiene un conjunto de datos el cual se representa en la ecuación (50).

$$i_m = \begin{cases} H_1^m = (h_1, \dots, h_{n1}), p_k \\ \vdots \\ H_{n1}^m = (h_1, \dots, h_{n1}), p_k \end{cases} \quad (50)$$

La diferencia entre los histogramas de orientaciones es representada por la ecuación (51), con el fin de reducir el efecto del ruido únicamente se consideran los puntos  $K$  puntos con menor distancia, también es posible descartar puntos poco representativos de la imagen a clasificar para centrar la atención en los puntos de mayor interés.



$$d(i_1, i_2) = \frac{1}{2}(d'(i_1, i_2) + d'(i_2, i_1)) \quad (51)$$

Por medio de aprendizaje computacional es posible realizar la clasificación correcta al encontrar una frontera que permita separar la imagen en diferentes clases y se pueda asignar una etiqueta correspondiente a la clasificación. Para llevar a cabo este proceso es necesario entrenar al algoritmo, para que sea capaz de encontrar las fronteras necesarias entre los conjuntos de imágenes, en donde es posible separar las que muestren el fruto de *Annona Muricata* o guanábana, de las imágenes que no lo muestren como se logra observar en la Figura 20.

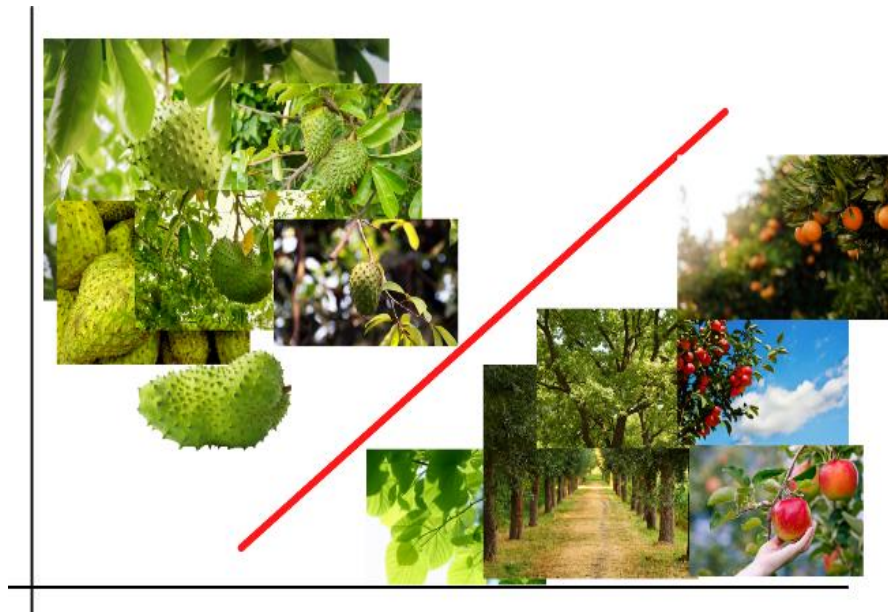


Figura 20 Clasificador de imágenes.

Se hace necesario validar los resultados del algoritmo una vez este se entrene, por medio de un conjunto de validación. Los conjuntos tanto de entrenamiento como de validación deben ser diferentes para lograr mejores resultados. El clasificador K-NN es utilizado en este proyecto, el cual a partir de la distancia define implícitamente la frontera de las muestras en el conjunto de adiestramiento. Los resultados que se esperan después de entrenar al clasificador y realizar las pruebas de validación se

pueden observar en la Figura 21, en esta imagen se muestra el proceso de clasificación teniendo en cuenta los  $k$  mejores resultados, este valor es ingresado por el usuario dependiendo la precisión que se requiera.

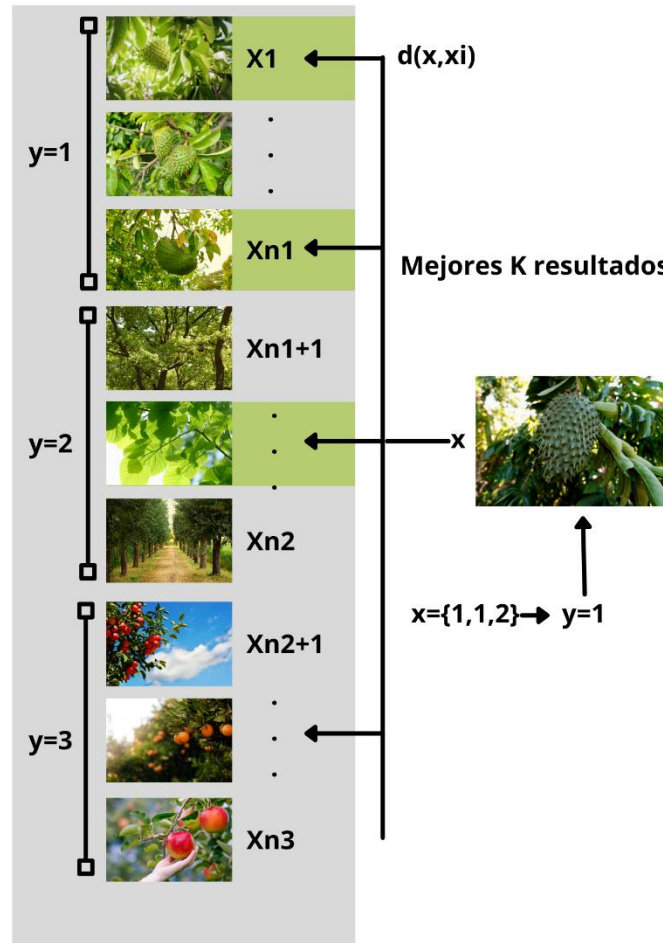


Figura 21 Resultados clasificador.

Al calcular las distancias o las diferencias entra cada imagen de entrenamiento, con relación a la imagen que se está clasificando, se podrán determinar los mejores resultados. Para estas clasificaciones solo se deben tener en cuenta los  $K$  que hayan obtenido los resultados más acertados. Al aplicar un método de validación cruzada se logra la obtención de mejores resultados en los procesos de clasificación. Así se puede determinar cuál de los conjuntos de entrenamiento va a arrojar los mejores resultados.

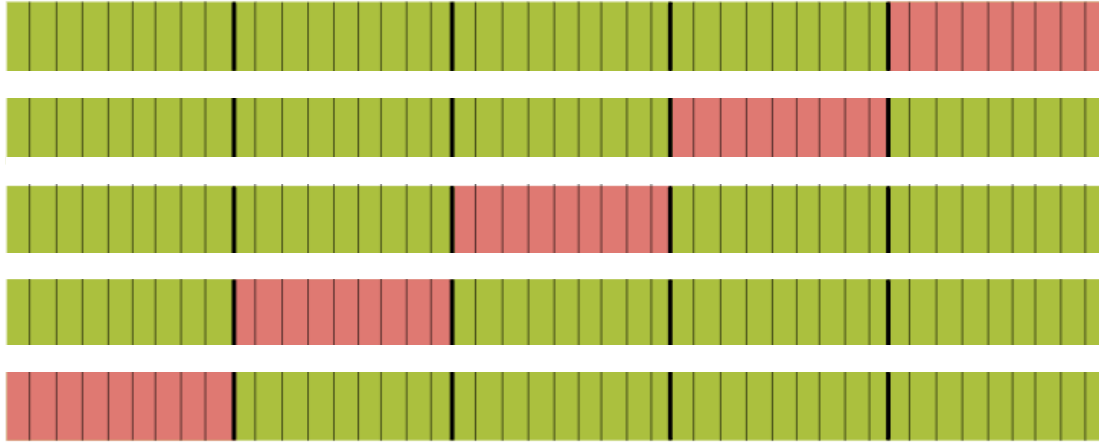


Figura 22 Validación cruzada.

En la Figura 22 es la representación de la validación cruzada, en donde se puede observar las casillas verdes como la base de las imágenes que son para el entrenamiento que corresponden al 80% y las casillas rojas como la validación correspondiente al 20%. Mediante la matriz de confusión se puede obtener la exactitud de la clasificación de las imágenes, que es necesaria para validar los resultados obtenidos por el algoritmo. La matriz de identificación de exactitud del algoritmo se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Matriz de confusión.

	Resultados de clasificación		
Matriz de confusión	Resultados	Positivos	Negativos
	Categoría 1	Positivos reales	Falsos Negativos
	Categoría n	Falsos positivos	Negativos reales

Una vez desarrollada la matriz de confusión se calcula la exactitud mediante la ecuación (52).

$$E = \frac{\sum_{\forall \text{clases}} \text{Positivos reales}}{\text{Predicciones totales}} \quad (52)$$

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación y el respectivo análisis.

### 5.1 CONTROLADOR

Para el desarrollo de este documento se utilizaron los parámetros y valores mostrados en la Tabla 7, estos valores corresponden a los parámetros físicos del drone Tello Edu (Ryze Robotics, 2020). Teniendo en cuenta los datos del quadrotor se procede a diseñar el controlador, para realizar las respectivas simulaciones del proyecto.

Tabla 7 Parámetros físicos para diseño.

Parámetro	Valor
Masa: $m$	0.08 kg
Inercia: $I_x$	0.000075 kg · m <sup>2</sup>
Inercia: $I_y$	0.000075 kg · m <sup>2</sup>
Inercia: $I_z$	0.00152501 kg · m <sup>2</sup>
Longitud del brazo: $l$	0.0055 m
Aceleración gravitacional: $g$	9.81 $\frac{m}{s^2}$
Empuje: $b$	$2.39 \times 10^{-8} \text{ kg} \frac{m}{\text{rad}^2}$
Arrastre: $d$	$1.15 \times 10^{-10} \text{ kg} \frac{m^3}{\text{rad}^2}$

Teniendo en cuenta el modelo matemático del sistema en espacio de estados, se realizó el diseño de los controladores por realimentación de estados, además se diseñaron observadores de estados. Las condiciones y especificaciones para la respuesta del quadrotor son las siguientes:

- $E_{ss} = 0$
- $t_s = 0.1s$  para las orientaciones.
- $t_{s_z} = 1.1s$  para la altura.
- $\xi = 0.8$

Con los parámetros de diseño, se desarrollaron los controladores del sistema bajo la estructura de la Figura 23. En la primera sección (A) se encuentra el modelo en espacio de estados del quadrotor, el diseño del controlador da como resultado las constantes de realimentación para que el sistema se comporte como se ha establecido con los parámetros de control, en (B) se encuentran dichas constantes. En (C) se encuentra el observador y en (D) se realiza la discretización de la planta.

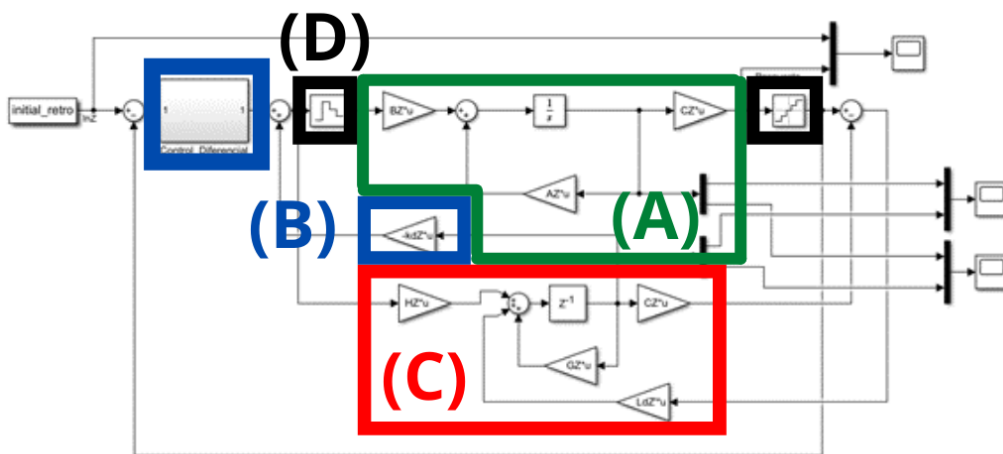


Figura 23 Esquema controladores para simulación. (A) Modelo Quadrotor en espacio de estado. (B) Constantes de realimentación. (C) Observador del sistema. (D) Discretizadores.

En la Tabla 8 se puede observar las constantes de control para cada una de las dinámicas del sistema, estas son para el control discreto del sistema.

Tabla 8 Resultados constantes de control.

<b>Dinámica</b>	<b>Constantes de realimentación. (Kd) x10<sup>3</sup></b>	<b>Constante de integración. (Ki)x10<sup>3</sup></b>
Altura (Z)	[0.00894738, 3.1579]	2.5263
Rotación (Φ, θ)	[0.00584, 3.1547]	0.00430616
Rotación (Ψ)	[0.008424, 2.8948]	0.00875

Se calcularon las constantes de realimentación para el observador del sistema. En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos para el observador discreto.

Tabla 9 Constantes de realimentación observador discreto.

<b>Dinámica</b>	<b>Constantes de realimentación observador. (Ld)</b>
Altura (Z)	[168.2784, 0.6495]
Rotación (Φ, θ)	[2.8684, 0.0111]
Rotación (Ψ)	[58.3241, 0.2251]

En la Figura 24 *Figura 24* se puede ver la respuesta del sistema que controla la altura ante una entrada escalón de amplitud 1. Como se observa el tiempo de establecimiento es aproximadamente 1.1s dando cumplimiento a los parámetros de diseño establecidos.

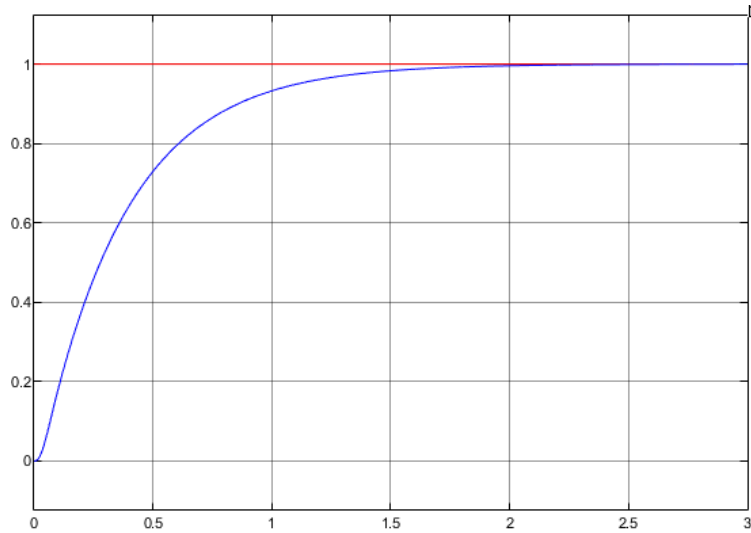


Figura 24 Respuesta sistema en el eje Z.

Para el control de la rotación Pitch ( $\Phi$ ) y Roll ( $\Theta$ ), se cumplen con las condiciones de diseño establecidas, donde el tiempo de establecimiento debe ser aproximadamente  $0.1s$ , por la rapidez a la que debe reaccionar el sistema para estas orientaciones se presenta un sobre pico menor al 10% de la señal de entrada, en este caso es aceptable para el proceso que se está realizando. En la Figura 25 se puede observar la respuesta ante una entrada escalón de amplitud 1, para las orientaciones ( $\Phi, \Theta$ ).

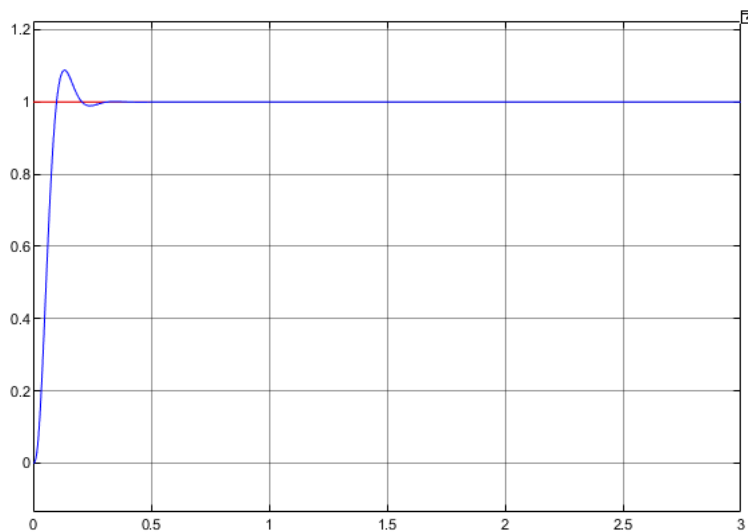


Figura 25 Respuesta sistema en Pitch y Roll.

La respuesta esperada de la rotación en el eje Z ( $\Psi$ ) se presenta en la Figura 26, en este caso la respuesta no presenta sobre pico. También se puede observar el tiempo de establecimiento es de 0.1s aproximadamente cumpliendo así con las especificaciones que se establecieron para el diseño del controlador.

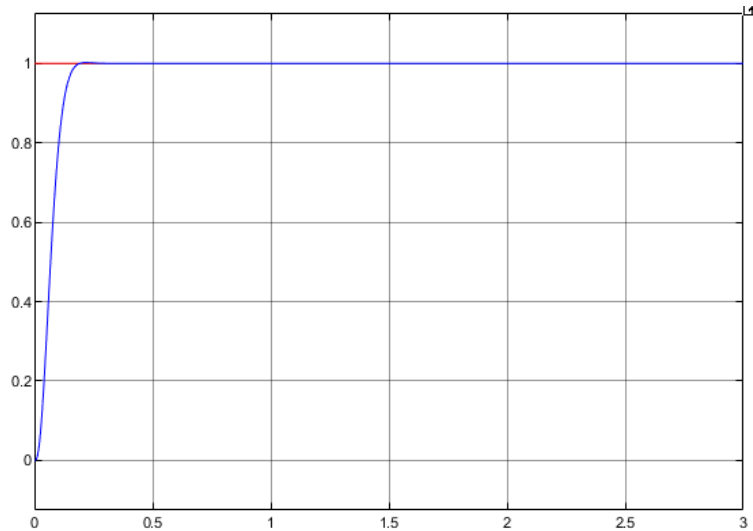


Figura 26 Respuesta rotación en Yaw.

El diseño de estos controladores permite manipular el quadrotor de forma adecuada para cumplir con los procesos y tareas que se tienen asignadas, en este proyecto fueron aplicados para realizar la simulación del proceso y validar los resultados de los algoritmos.

## 5.2 PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS

Una vez se ha controlado el sistema, es posible implementar el algoritmo de planificación de trayectorias, para este caso se implementaron 2 algoritmos de búsqueda inteligentes para encontrar la mínima distancia a recorrer. El primer algoritmo que se utilizó fue un algoritmo genético y el segundo el algoritmo A\*, para probar los algoritmos se creó una matriz de puntos como se observa en la Figura 27, los cuales representan coordenadas o puntos de un cultivo ingresados por el operador, donde la separación entre los puntos horizontalmente es de 2 unidades y



verticalmente 1 unidad. El punto de origen para las pruebas es el A y el final el B, adicionalmente se eligieron 10 puntos al azar para realizar el recorrido, se probaron ambos algoritmos con diferentes heurísticas y con variaciones de los puntos a recorrer.

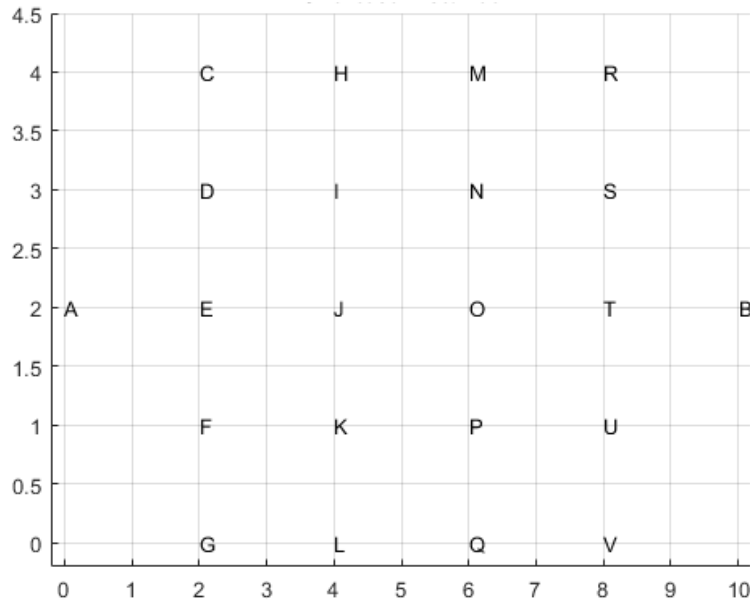


Figura 27 Matriz de puntos para trayectoria.

Se utilizaron 4 heurísticas diferentes para probar los algoritmos y determinar cuál de los 2 brinda mejores resultados. En la Figura 28 se observan las trayectorias resultantes de los algoritmos para el primer conjunto de puntos, la primera heurística que se utilizó fue la descrita por la ecuación (29), esta busca unir los puntos más cercanos. La segunda variación para hallar el mejor resultado basada en la ecuación (30) no solo tiene en cuenta el siguiente punto más cercano, también tiene en cuenta la distancia que existe entre el siguiente punto y donde inició el recorrido. Para la tercera heurística se busca cuál es el siguiente punto más próximo y se calcula la distancia hasta el punto final del recorrido, la ecuación que describe este proceso es la (31). Para la última variación se tienen en cuenta las distancias entre el punto de inicio y el punto final, se describe a detalle en (32).

En la Figura 28 para la heurística 1, comparando los resultados entre el algoritmo GA y A\*, se obtuvo una distancia mínima de 22.424 unidades para el algoritmo A\*, este resultado representa un 7.51% menos que el resultado del GA. Para la heurística 2 el mejor resultado se obtuvo para el A\*, sin embargo, la distancia mínima que se halló fue de 22.893 unidades. En la tercera variación los resultados

de la trayectoria fueron más largos en ambos casos, para el GA 27.6 unidades y para el A\* 34.7 unidades. Y en el último caso de las heurísticas se obtuvo el mejor resultado en el A\* con una distancia de 21.36 unidades.

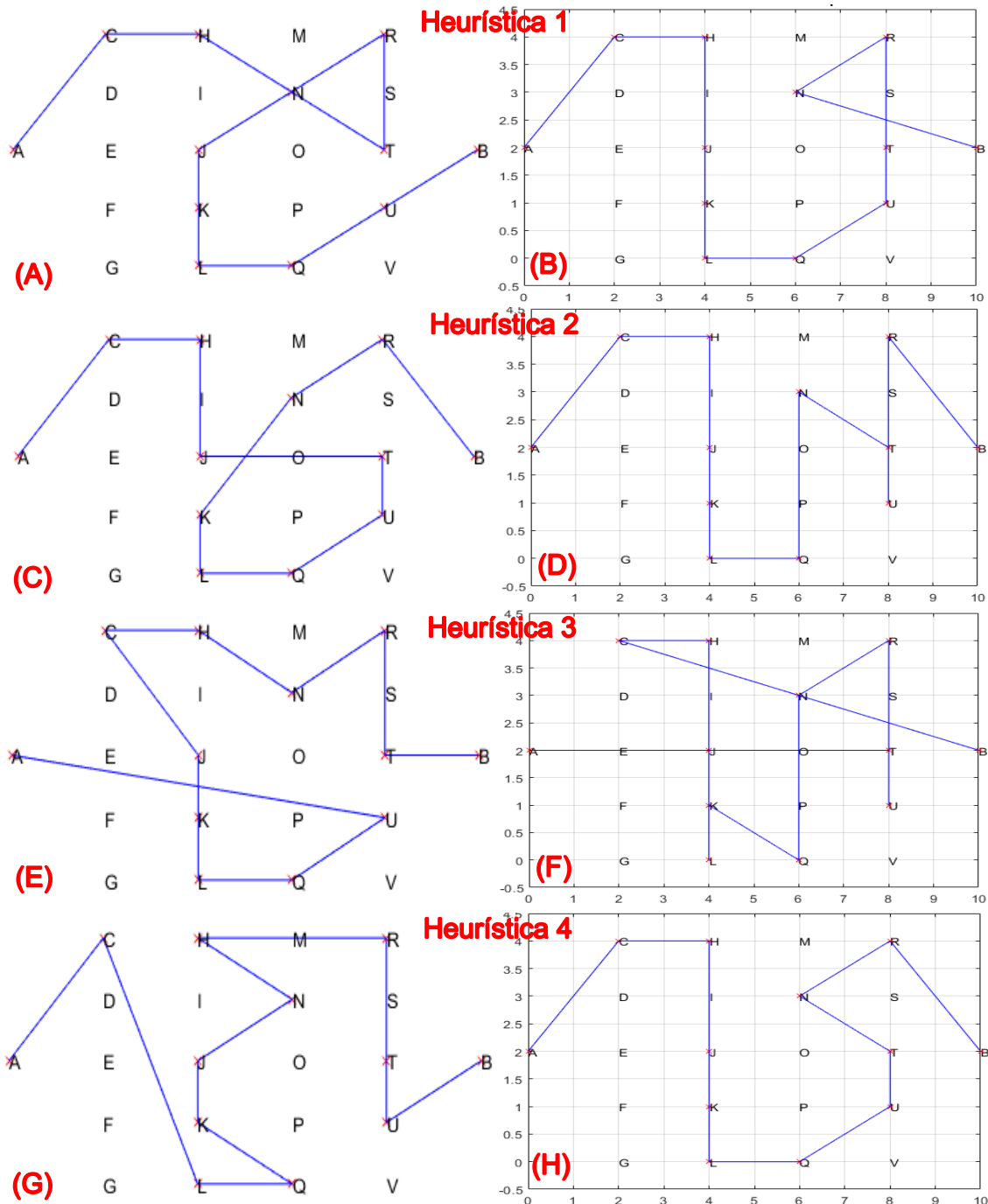


Figura 28 Resultados primera trayectoria. (A) GA heurística 1. (B) A\* heurística 1. (C) GA heurística 2. (D) A\* heurística 2. (E) GA heurística 3. (F) A\* heurística 3. (G) GA heurística 4. (H) A\* heurística 4.

Se realizaron diversas pruebas de trayectorias con puntos aleatorios para comprobar el funcionamiento de los algoritmos y poder determinar cuál de los algoritmos permite obtener el recorrido más corto, además de identificar la heurística que generaba el mejor resultado.

En la Figura 29 se presenta un gráfico de caja y bigotes, en el cual se concentran los resultados de las distancias obtenidas por cada uno de los algoritmos. Para el algoritmo A\* se obtiene un resultado medio de 22.65 unidades y una desviación estándar de 4.67, mientras que para el GA se tiene una media de 23.66 unidades y una desviación estándar de 1.82, esto se representa en el grafico en el cual se puede observar que los datos del algoritmo genético están menos dispersos que los del A\*.

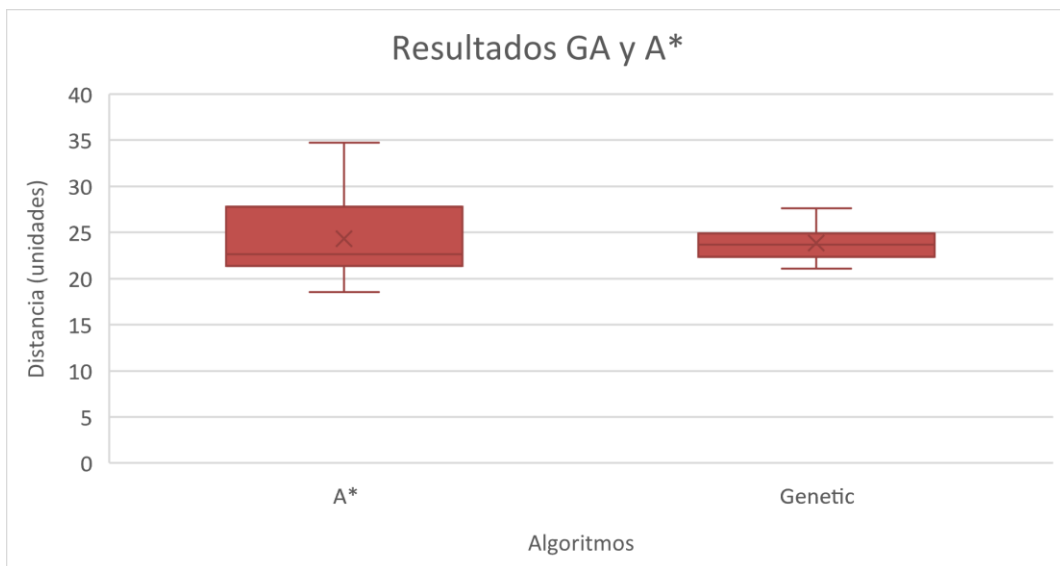


Figura 29 Gráfico cajas y bigotes de los algoritmos.

A cada uno de los resultados obtenidos de las trayectorias se les asignó un puntaje de acuerdo con el resultado obtenido. Se le asignaron 4 puntos al algoritmo y heurística con mejor resultado, mientras que a la que tuviera el peor resultado únicamente se le asignó 1 punto, después de realizar diferentes pruebas y trayectorias asignando las calificaciones se logró determinar cuál de los algoritmos y que heurística generaban mejores resultados. En la Figura 30 se pueden observar los resultados de las calificaciones a los algoritmos, el mejor algoritmo resultó ser el

A\* con la heurística 1, sin embargo, la heurística 4 también generó resultados muy buenos en la mayoría de los casos, la peor heurística para este algoritmo fue la 3 por la que se generaron desviaciones y varianzas tan elevadas para este algoritmo. El GA tuvo mejores resultados con la heurística 2, y los peores resultados con la 4, sin embargo, este algoritmo presentó resultados con desviaciones y varianzas pequeñas ya que sus resultados eran similares.

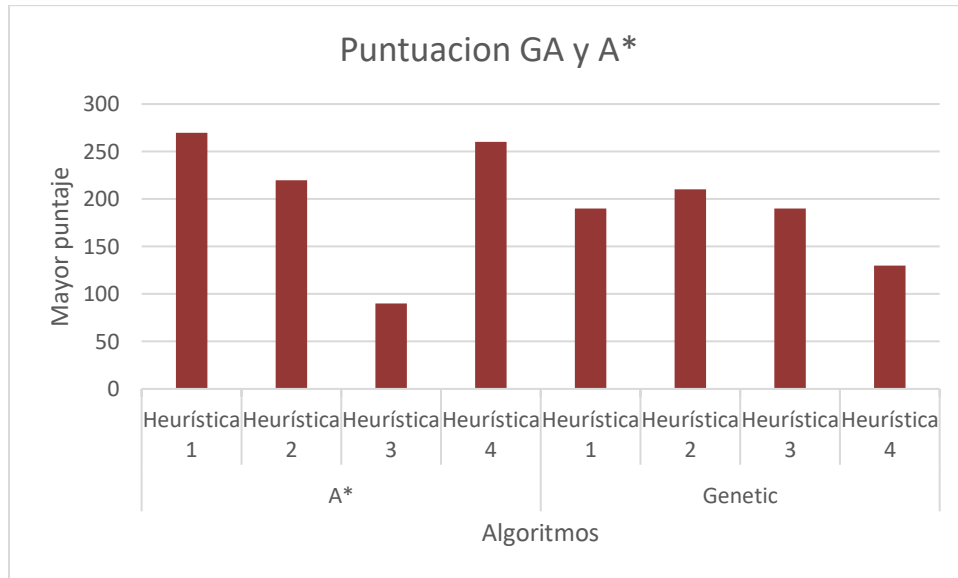


Figura 30 Tabulación de los mejores resultados por algoritmo y heurística.

Con los resultados obtenidos en la Figura 30 se establece que el algoritmo a utilizar es el A\* con la heurística 1. Una vez implementado este algoritmo para la planeación de trayectorias del quadrotor, se establece el orden y seguimiento de las coordenadas, esta información es enviada al bloque de control para posición, este control se encarga de controlar cada una de las dinámicas del quadrotor por realimentación de estados como se ha explicado anteriormente, la salida de este control está ligada a los motores que permiten la maniobrabilidad y movimiento del quadrotor. En la Figura 31 podemos observar la trayectoria obtenida para 10 puntos aleatorios, con la cual se realizó una simulación de prueba con el modelo y el controlador del quadrotor.

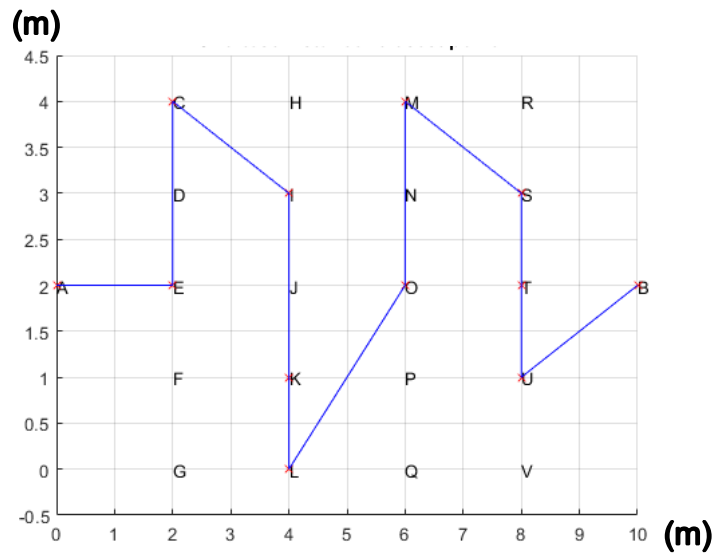


Figura 31 Puntos a recorrer simulación trayectoria de prueba con quadrotor.

Con el algoritmo A\* y heurística 1 se establecen las coordenadas en orden de seguimiento, estas coordenadas son enviadas al quadrotor para que este las recorra, en este caso el recorrido se realiza a una velocidad y una altura constantes, se mantiene un vuelo con altura constante debido a que el propósito del seguimiento de esta trayectoria es tomar fotografías aéreas de un cultivo a una altura determinada para obtener una resolución adecuada de los frutos. En la Figura 32 se presenta el resultado de la trayectoria simulada con el modelo y el control del quadrotor.

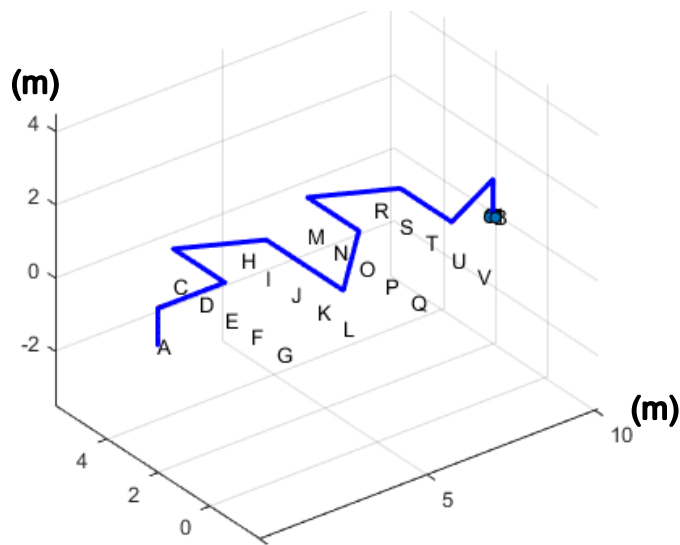


Figura 32 simulación de trayectoria quadrotor.

En la Figura 33 se muestran las referencias de posición para dar cumplimiento a la trayectoria de la Figura 31 en color azul, en color rojo el resultado del seguimiento por el quadrotor. Como se observa las dinámicas del quadrotor se encuentran controladas y siguen la señal de referencia para el seguimiento de las trayectorias optimas encontradas por el algoritmo A\*.

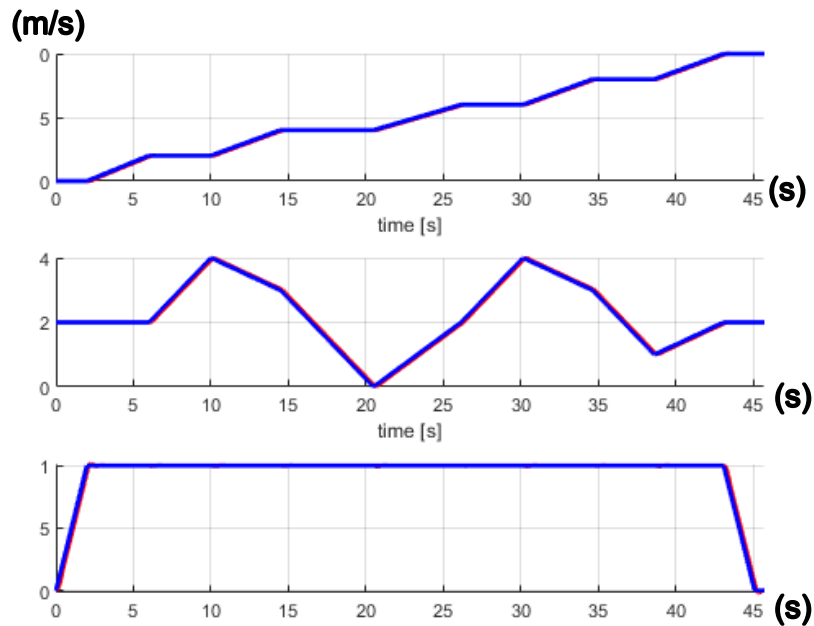


Figura 33 Referencias de posición para simulación de trayectorias.

### 5.3 OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS

Para realizar la optimización del recorrido, se utilizó el método de optimización por gradiente se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 34, donde se observan las trayectorias obtenidas para cada uno de los métodos de optimización por velocidad, aceleración, vibraciones e instantánea en el eje X y Y.

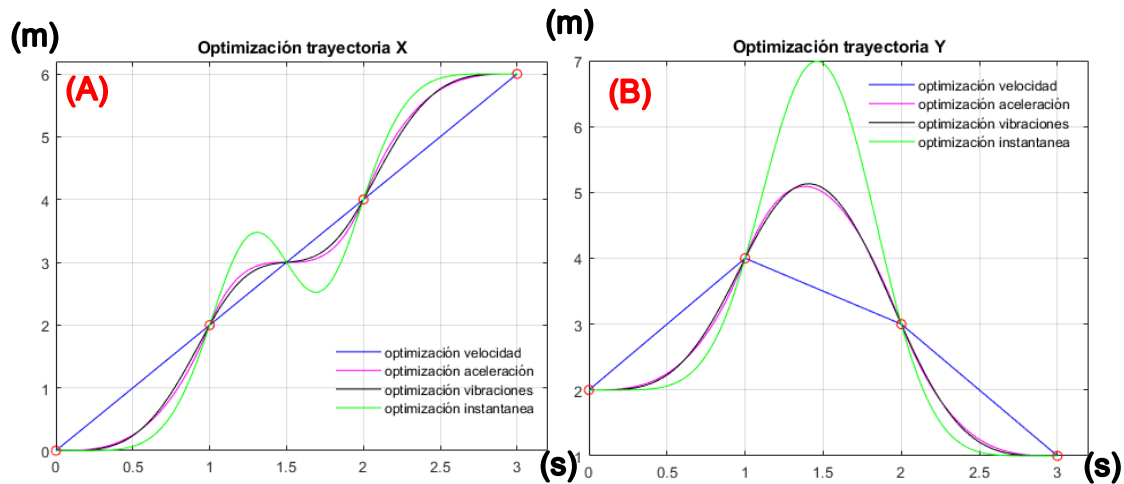


Figura 34 Optimización de trayectorias. (A) Optimización trayectoria en el eje  $X$ . (B) Optimización trayectoria en el eje  $Y$ .

Los resultados de la Figura 34, son para una trayectoria en  $(X, Y)$  con respecto al tiempo. Se realiza la optimización de la trayectoria para velocidad, aceleración, vibraciones e instantánea para comparar los resultados y trabajar con solo 1 de estas. Para la optimización de mínima distancia que es equivalente a optimizar la velocidad de operación se obtiene como resultado la unión de cada uno de los puntos en línea recta. Con esta optimización se obtiene el mejor resultado para minimizar la distancia, es complementario al algoritmo de búsqueda inteligente  $A^*$ , sin embargo, en este punto del proyecto se busca optimizar la trayectoria para integrarla al quadrotor y hacer la toma de imágenes del cultivo, para esto es necesario que el movimiento del quadrotor sea continuo y estable.

En la Figura 35 se presentan los perfiles de velocidad para la optimización de la distancia, como se observa son perfiles no continuos, esto se debe a que el trayecto entre los diferentes puntos se realiza a diferente velocidad, esto implica cambios bruscos en el estado del quadrotor, generando ruido para la toma de imágenes de los cultivos, es por esto por lo que se realizaron las pruebas con los demás métodos de optimización.

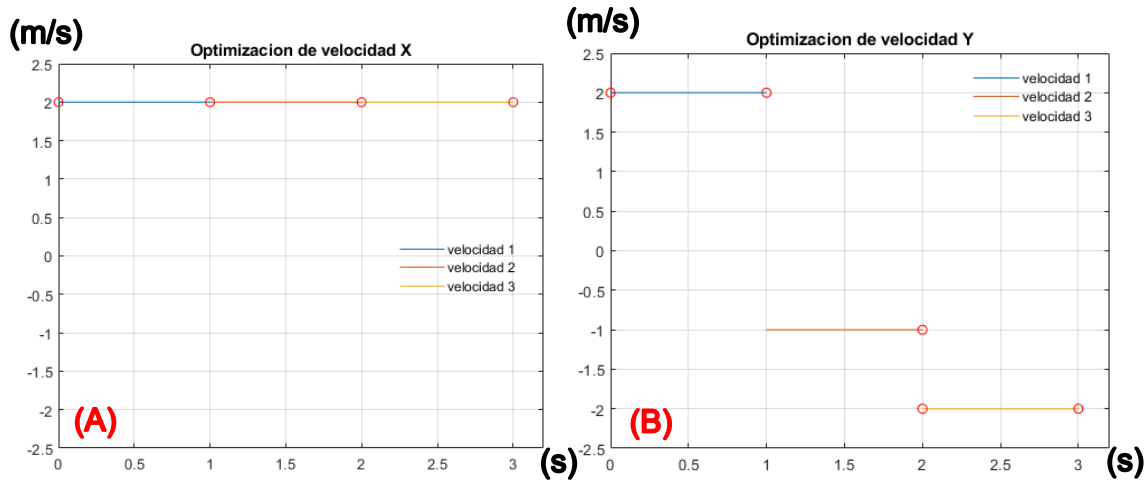


Figura 35 Velocidades para trayectoria mínima distancia. (A) velocidades en el eje X. (B) Velocidades en el eje Y.

En la Figura 36 y se presentan los perfiles de velocidad obtenidos para los métodos de optimización de aceleración, vibraciones e instantáneo. Como se puede observar las gráficas de estos perfiles son continuos a diferencia del perfil obtenido para la optimización de la distancia presentado en la Figura 35. Para la optimización de aceleración se obtienen perfiles de velocidad con cambios bastante abruptos en especial en cercanía a los puntos establecidos para la trayectoria. Los perfiles (B) y (C) de la Figura 36 son perfiles con cambios más suaves, sin embargo, se puede observar la diferencia de los resultados en la velocidad máxima que se alcanza para cada método, para el método de optimización para las vibraciones los niveles de velocidad son menores que en los otros casos.

Con los métodos de optimización de vibraciones y de trayectoria instantánea se pretende obtener perfiles de posición y velocidad constantes que sean suaves entre cada una de las coordenadas de la trayectoria. Y no se generen variaciones de velocidad tan bruscas, esto es bueno para la estabilidad del quadrotor y poder tomar imágenes del cultivo de forma adecuada. De igual forma se analizaron los resultados de las aceleraciones para cada uno de los métodos, en la optimización de la distancia como se obtuvieron velocidades constantes la aceleración es igual a 0. En la Figura 37 se muestran las aceleraciones en (X,Y) haciendo uso de la optimización en aceleraciones.



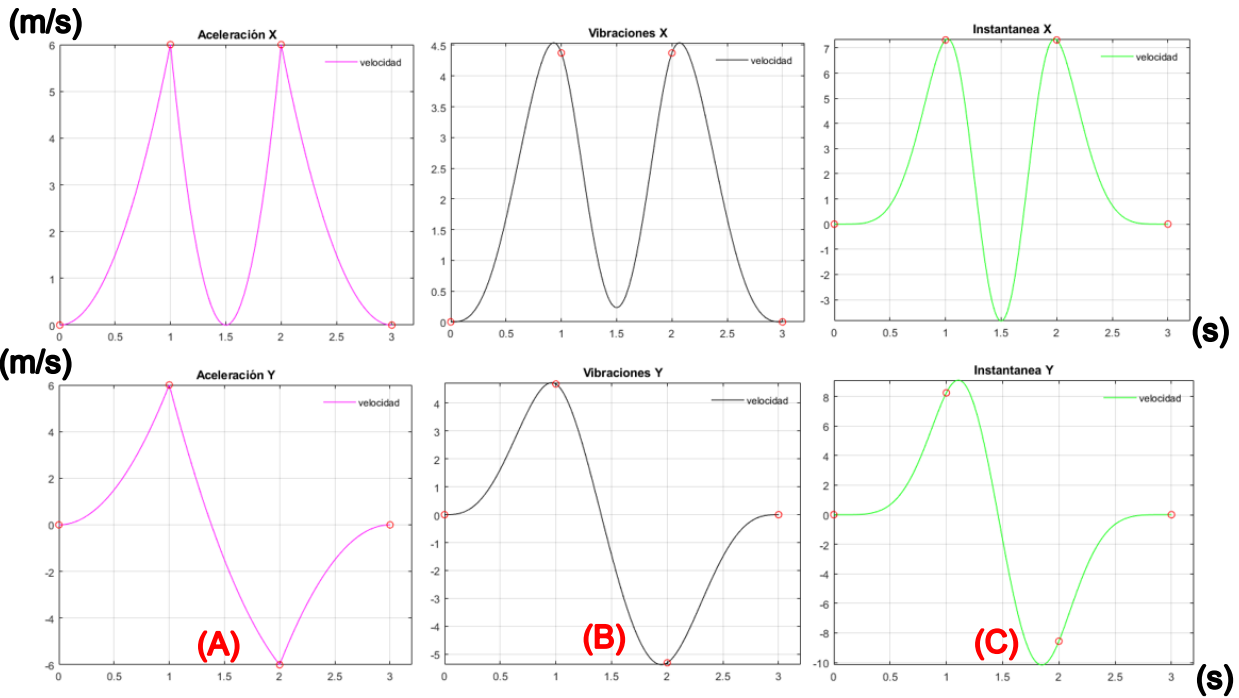


Figura 36 Resultados de velocidades. (A) Optimización de aceleración en  $(X, Y)$ . (B) Optimización de vibraciones en  $(X, Y)$ . (C) Optimización instantánea en  $(X, Y)$ .

En la Figura 37 se observa que los perfiles de aceleración son discontinuos en cada uno de los puntos lo que puede ocasionar cambios bruscos en el desplazamiento del sistema.

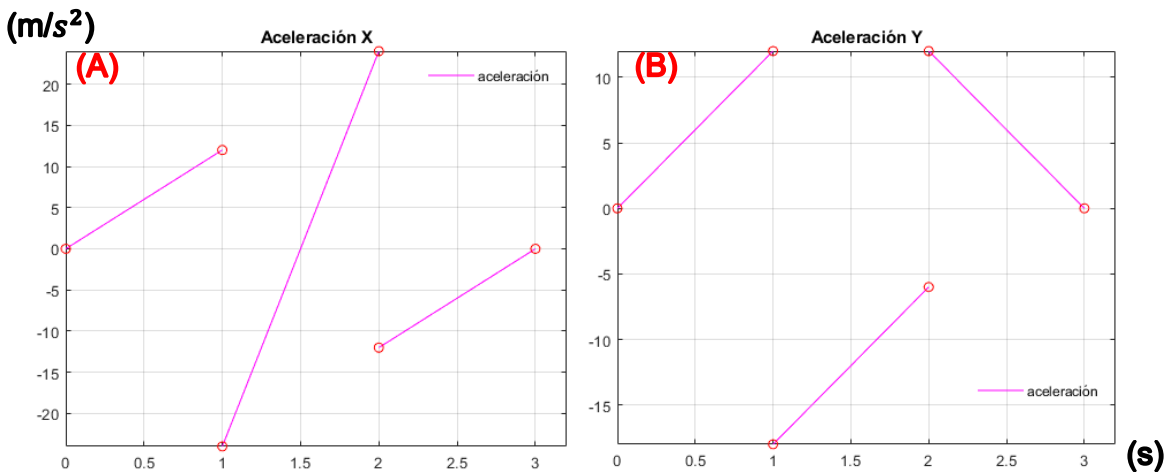


Figura 37 Resultados de aceleración en  $(X, Y)$  con la optimización de aceleración. (A) Aceleraciones en  $X$ . (B) Aceleraciones en  $Y$ .

En la Figura 38 se presentan los perfiles de aceleración para la optimización de vibraciones (color negro) y trayectoria instantánea (color verde). En este caso los dos perfiles son continuos y suaves, pero, el perfil de trayectoria instantánea presenta aceleraciones mucho más altas, por lo cual el seguimiento de la trayectoria es diferente y con velocidades mayores lo que dificulta la toma de imágenes con buena resolución.

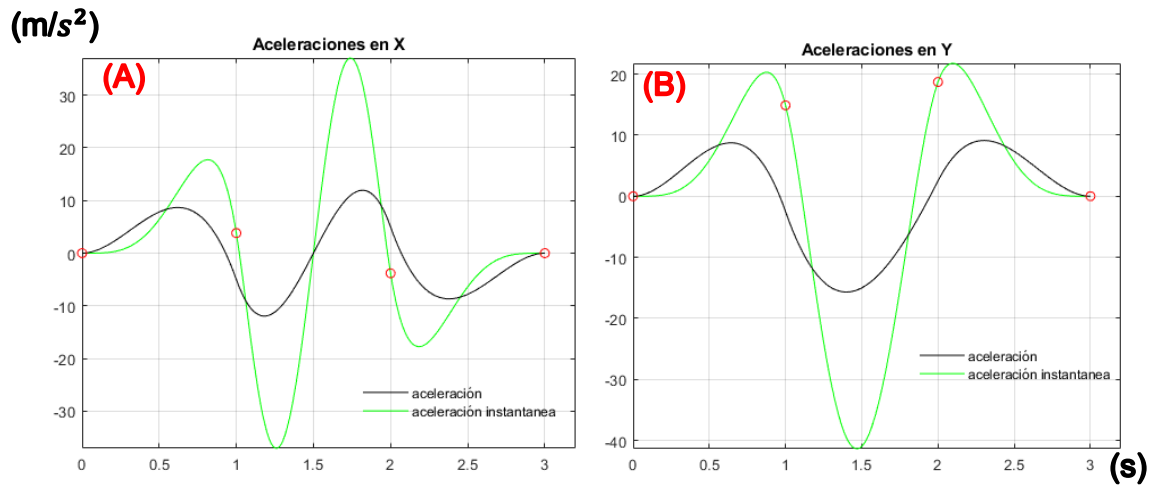


Figura 38 Perfiles de aceleración. (A) Aceleraciones en X. (B) Aceleraciones en Y.

De los resultados obtenidos con los diferentes métodos y énfasis de optimización se decidió trabajar e implementar la optimización para vibraciones, dado que esta da resultados de velocidad y aceleración continuos, con valores más bajos que la optimización instantánea, asegurando de esta forma que el trayecto que se desea realizar sea estable y acorde a los requerimientos para hacer tomas fotográficas del cultivo. En la Figura 39 se muestra la simulación de una trayectoria helicoidal, este recorrido es usado comúnmente para tomas fotográficas de algún sitio u objeto desde diferentes perspectivas, y lograr hacer reconstrucción 3D de este elemento con la base de imágenes capturadas.

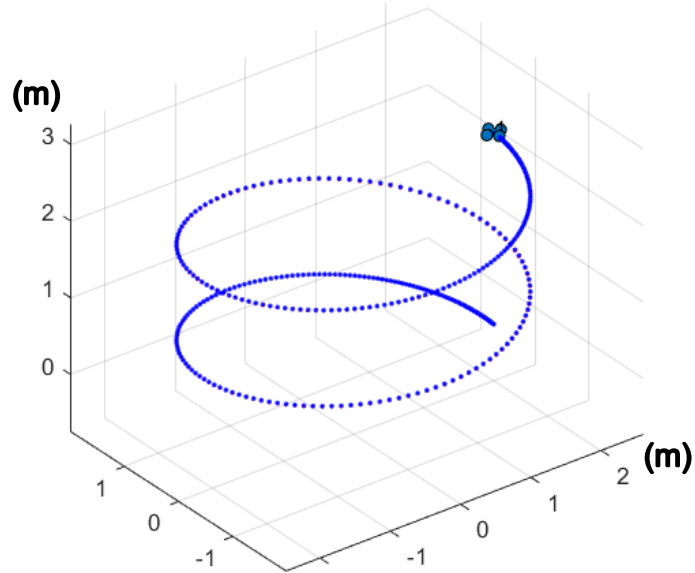


Figura 39 Trayectoria helicoidal optimizada.

Para hallar la trayectoria con la mínima cantidad de vibraciones, es necesario encontrar una función de orden  $n$  que suavice la trayectoria entre los puntos que se van a recorrer. Para encontrar esta función tendremos en cuenta la 3 derivada de la posición del quadrotor en cada uno de sus ejes.

Para dar solución al sistema se utiliza la ecuación (53).

$$\frac{d\mathcal{L}}{dx} - \frac{d}{dt} \left( \frac{d\mathcal{L}}{d\dot{x}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{d\mathcal{L}}{d\ddot{x}} \right) - \frac{d^3}{dt^3} \left( \frac{d\mathcal{L}}{d\ddot{\ddot{x}}} \right) = 0 \quad (53)$$

Para esta trayectoria se optimiza un ángulo  $\theta$  con el cual se describe el desplazamiento en el eje  $X$  y  $Y$  como se muestra en (54).

$$\begin{aligned} x(t) &= \cos \theta \cdot r \\ y(t) &= \sin \theta \cdot r \end{aligned} \tag{54}$$

Donde  $r$ = radio de la trayectoria helicoidal. En la Tabla 10 se pueden observar las condiciones de frontera para optimizar este recorrido.

Tabla 10 Condiciones de vuelo trayectoria helicoidal.

Variable	Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad ( $\frac{m}{s}$ )	Aceleración ( $\frac{m}{s^2}$ )
$Z$	$t = 0$	0	0	0
$Z$	$t = T$	2.5	0	0
$\theta$	$t = 0$	0	0	0
$\theta$	$t = T$	$4\pi$	0	0

Para esta trayectoria, se buscaba optimizar el ángulo  $\theta$  y el desplazamiento en el eje  $Z$ . Se plantean las 2 funciones para el recorrido helicoidal en (55); **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con las constantes resultantes del algoritmo de optimización por vibraciones.

$$\begin{aligned} \theta(t) &= 37.6991 \cdot t^5 - 94.2478 \cdot t^4 + 62.8319 \cdot t^3 \\ Z(t) &= 15 \cdot t^5 - 37.5 \cdot t^4 + 25 \cdot t^3 \end{aligned} \tag{55}$$

Remplazando los valores de  $\theta$  en la ecuación (55), se obtienen las gráficas de posición y velocidad en cada instante de tiempo para cumplir con la trayectoria helicoidal, en la Figura 40 se presentan las posiciones y velocidades resultantes de la optimización para esta trayectoria.

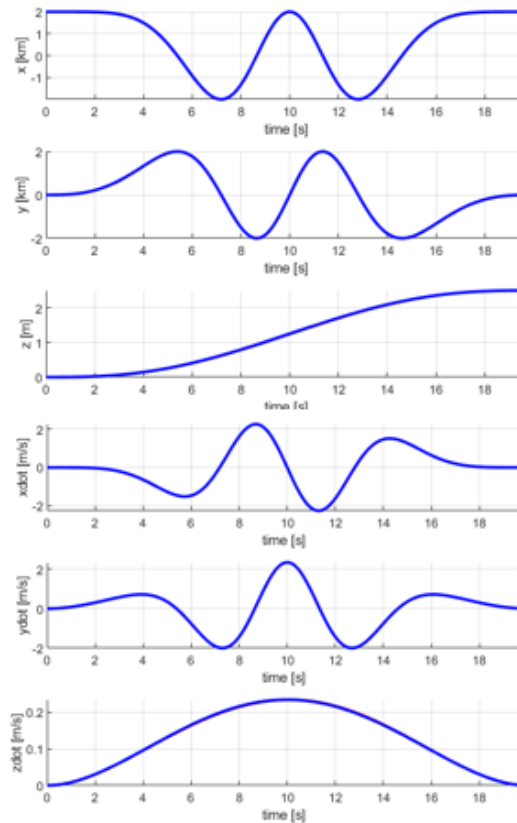


Figura 40 Graficas posición y velocidad trayectoria helicoidal.

Teniendo clara la trayectoria y los datos que se enviarán al quadrotor, es posible realizar la conexión con este, enviarle datos de la trayectoria que se desea realizar y verificar el funcionamiento. Como realimentación de los estados del quadrotor se pueden obtener diferentes medidas de los sensores a bordo de este, estas medidas fueron procesadas con un filtro de Kalman, para obtener una mejor estimación y eliminar el ruido o los errores de medición. En la Figura 41 se observa la trayectoria que se realizó para comprobar el funcionamiento del sistema.

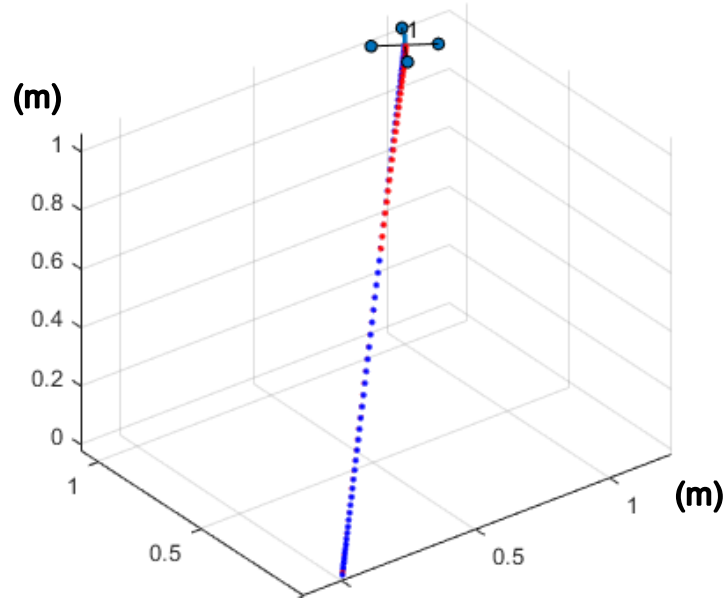


Figura 41 Trayectoria realizada por el quadrotor.

La trayectoria realizada con el quadrotor está dada por la ecuación (56), esta es la trayectoria referencia, donde el punto inicial A es  $(0,0,0, \Psi = 0 \text{ rad})$  y el punto final B en las coordenadas  $(1,1,1, \Psi = 1 \text{ rad})$ .

$$[X, Y, Z] = 10t^3 - 15t^4 + 6t^5 \quad (56)$$

En la Figura 42 se puede observar la señal de referencia de posición optimizada que debe realizar el quadrotor en cada eje  $(X, Y, Z)$  y en la orientación  $(\Psi)$  para realizar la trayectoria satisfactoriamente. Al estar usando el drone Tello Edu, un quadrotor comercial con sus propios controles y protocolos de comunicación, es necesario modificar la señal de referencia que es enviada al quadrotor, en este caso el sistema no acepta valores de posición como referencia, pero si un vector de velocidad en las 4 direcciones  $(X, Y, Z, \Psi)$ .

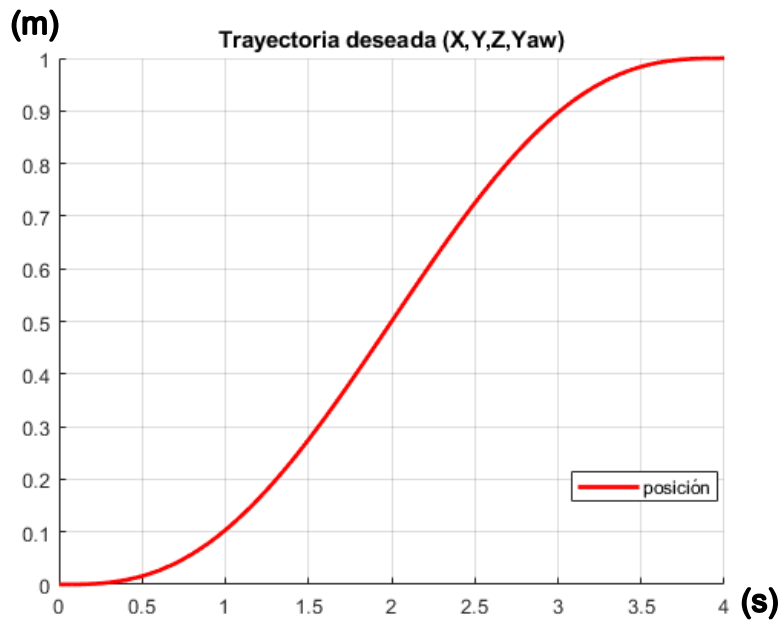


Figura 42 Trayectoria optimizada para los ejes (X,Y,Z).

Para establecer la referencia de velocidad en cada uno de los ejes se deriva la ecuación (56), obteniendo como resultado (57), donde  $t_{max}$  es el tiempo máximo en el que se realiza la trayectoria.

$$[\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, \dot{\Psi}] = \frac{30}{t_{max}} t^2 - \frac{60}{t_{max}} t^3 + \frac{30}{t_{max}} t^4 \quad (57)$$

En la Figura 43, se observa la función de velocidad que debe seguir el quadrotor para completar la trayectoria deseada de la Figura 41. Estos datos de velocidad son enviados por comunicación UDP al quadrotor como un vector de 4 velocidades, la respuesta del quadrotor que se espera son los estados, donde se tienen en cuenta las velocidades en cada uno de los ejes.

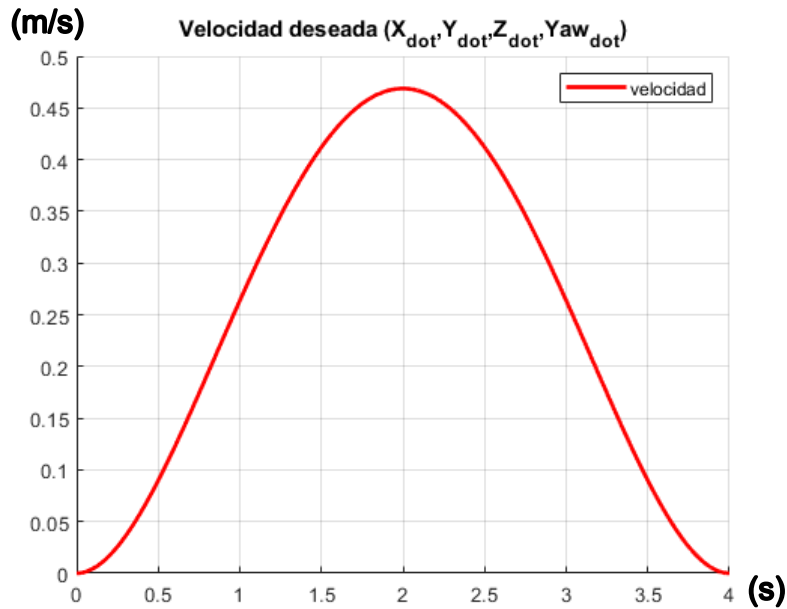


Figura 43 Referencia de velocidad para  $(X, Y, Z, \Psi)$

Para realizar la trayectoria con el quadrotor se establece la comunicación en tiempo real con este desde la base de operación. En la Figura 44 se muestra el resultado al establecer la comunicación con el quadrotor y solicitar el estado actual del mismo. Con la conexión estable se procede a enviar la señal de referencia, con un periodo de envío de 0.1s.

```

Create socket comunication
Create Tello object
[INFO] tello.py - 107 - Tello instance was initialized. Host: '192.168.10.1'. Port: '8889'.
Connect to Tello Drone
[INFO] tello.py - 422 - Send command: 'command'
[INFO] tello.py - 446 - Response command: 'ok'
Battery life Percentage: 92
Get entire Tello Current State
Current satates: {'mid': -1, 'x': -100, 'y': -100, 'z': -100, 'mpry': '0,0,0', 'pitch': 0, 'roll': 0, 'yaw': 3, 'vgx': 0, 'vgy': 0, 'vgz': 0, 'templ': 51, 'temph': 54, 'tof': 10, 'h': 0, 'bat': 92, 'baro': 2433.28, 'time': 0, 'agx': -6.0, 'agy': -3.0, 'agz': -1000.0}

```

Figura 44 Respuesta estados sensores del quadrotor.

En la Figura 45 la señal de referencia enviada al quadrotor y el resultado de las mediciones de las velocidades obtenidas por los sensores del quadrotor. Las medidas obtenidas del quadrotor presentan perturbaciones externas.



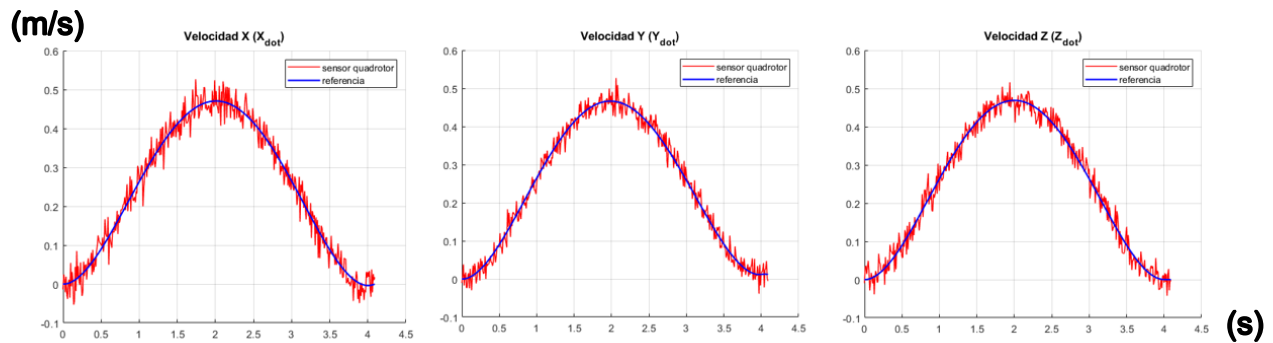


Figura 45 Respuesta referencia velocidad y medición en los ejes  $(X, Y, Z)$

Las perturbaciones presentes en los datos obtenidos del quadrotor pueden relacionarse a fuerzas externas como el viento, errores de medición por parte de los sensores o fallos en la comunicación. Sin embargo, como se ve en la Figura 45 el quadrotor tiende a seguir la referencia establecida. Para mejorar la estimación de la posición y el seguimiento de la trayectoria se implementó un filtro Kalman para eliminar el ruido que se presenta en estas señales. En la Figura 46 se puede observar la predicción obtenida del filtro de Kalman, donde se observa la capacidad del filtro para eliminar el ruido presente y hacer un mejor seguimiento a la referencia.

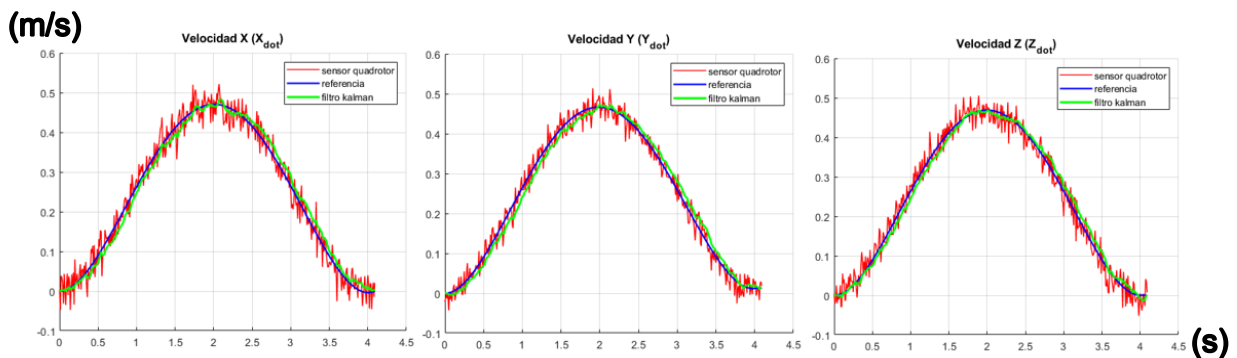


Figura 46 Respuesta filtrada con filtro Kalman.

La realimentación del sistema depende de la diferencia entre la señal de referencia y la señal medida como se expresa en la ecuación (58). Si se estima la posición con los datos obtenidos sin usar el filtro de Kalman la estimación de la posición no es la adecuada como se ve en la Figura 47.

$$Ref_{XYZ} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{X} - \dot{X}_s \\ \dot{Y} - \dot{Y}_s \\ \dot{Z} - \dot{Z}_s \end{bmatrix} \quad (58)$$

Donde  $\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s$  = Son las velocidades medidas por el quadrotor.

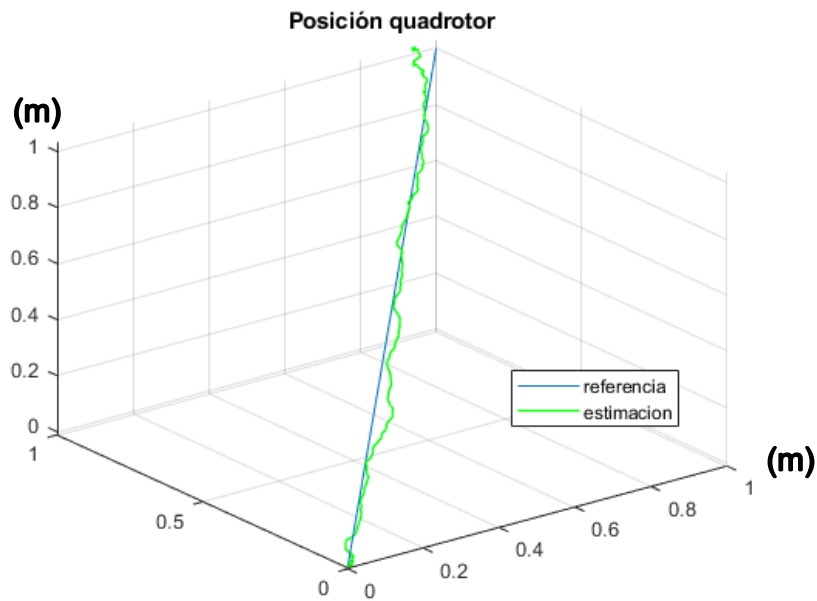


Figura 47 Estimación de la posición sin filtro.

En la Figura 47 se puede observar, que la estimación de la posición en los 3 ejes posee un error respecto a la referencia, esto se debe a que el sistema se realimenta según la medida que toman los sensores, pero esta medida puede ser afectada por factores como perturbaciones externas, vibración de los motores, entre otras (Vieira Lima et al., 2019).

En la Figura 48 se pueden observar las estimaciones para la posición de cada uno de los ejes con la realimentación del filtro de Kalman, como se observa la estimación de la posición es adecuada para la señal de referencia. Comparando la Figura 47 con la Figura 48, se puede comprobar el funcionamiento del filtro Kalman, se obtiene

un seguimiento a la referencia adecuado realimentando con la señal resultante del filtrado.

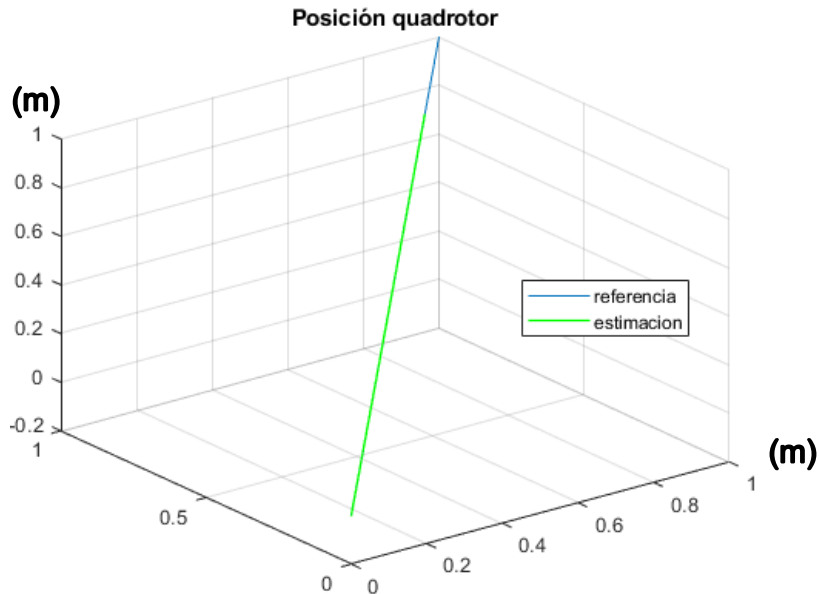


Figura 48 Estimación posición XYZ con filtro de Kalman.

## 5.4 PROCESAMIENTO DE IMAGENES

Para el procesamiento de imágenes fue necesario realizar una base de más de 500 figuras, para realizar el entrenamiento del sistema de clasificación y validar los resultados obtenidos. Sin embargo, al entrenar la red fueron necesarias más imágenes, para lo cual se realizaron modificaciones de tamaño, forma, color ubicación en las imágenes originales para lograr una base de más de 1000 imágenes con la cual se obtuvieran mejores resultados.

Con la Figura 49 se explica el proceso base para clasificar las imágenes según las condiciones establecidas para el proyecto. El primer paso es realizar el preprocesamiento de la imagen.



Figura 49 Guanábana.

A la Figura 49 se transforma para obtener los niveles de intensidad de la imagen, este proceso es fundamental para la extracción de características y para encontrar los descriptores de la imagen. En la Figura **50** se ve el resultado de transformar la imagen a escala de intensidad.

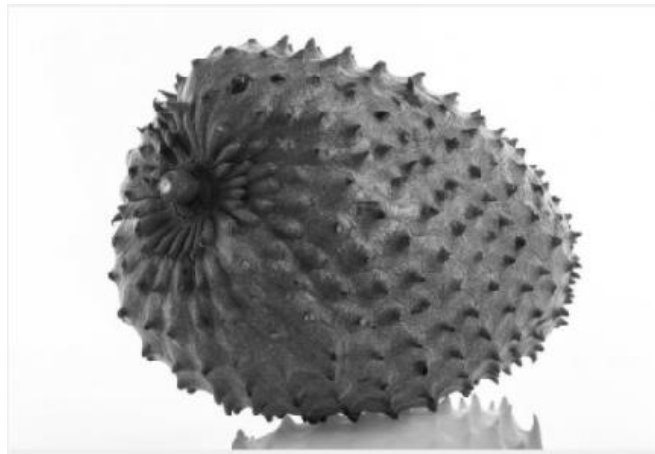


Figura 50 Preprocesamiento nivel de intensidad de la imagen.

La imagen con los niveles de intensidad permite realizar diferentes procesos, uno de ellos es el cambio de dominio por medio de la transformada de Fourier, este

proceso se realiza en el espacio de la frecuencia para aplicar diferentes filtros. En este dominio de la frecuencia aplicar filtros como los pasa bajas o pasa altas permiten extraer características de fronteras o bordes en la imagen. En la Figura 51 se muestra la imagen en el espacio de la frecuencia por la transformada de Fourier.

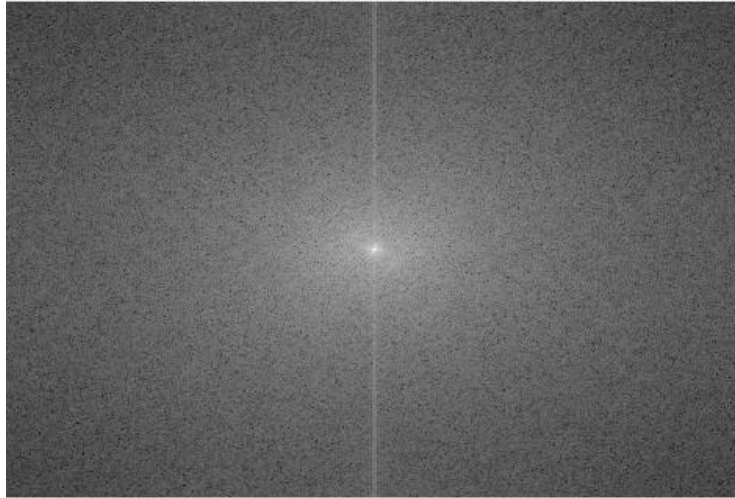


Figura 51 Transformada de Fourier.

En el dominio de la frecuencia se muestra el espectro de frecuencia de la imagen, con esta se puede por medio de un tratamiento percibir patrones, la magnitud y localización de esas frecuencias. Para detallar mejor las siluetas y bordes la imagen se utiliza un filtro pasa altas, el resultado de filtrar las frecuencias altas en la imagen se muestra en la Figura 52.



Figura 52 Imagen filtrada pasa altas.

Una vez se tienen los niveles de intensidad de las imágenes se procede a identificar los diferentes puntos de interés, el resultado de este proceso se puede observar en la Figura 53. A cada uno de los puntos de interés se le extrajeron las características haciendo uso del método SIFT, como descriptor de estas.



Figura 53 Puntos de interés árbol guanábana.

Como se observa en la Figura 53, se tienen los puntos en diferentes zonas de la imagen, en especial los puntos que son relevantes para el proceso son los puntos que se presentan en la guanábana. Para comprobar el algoritmo de clasificación y descripción de las características de la imagen, se modificó la Figura 53, separando el fruto únicamente. En la Figura 54 se muestran las modificaciones realizadas, a esta figura también se le extrajeron las características de los puntos de interés.

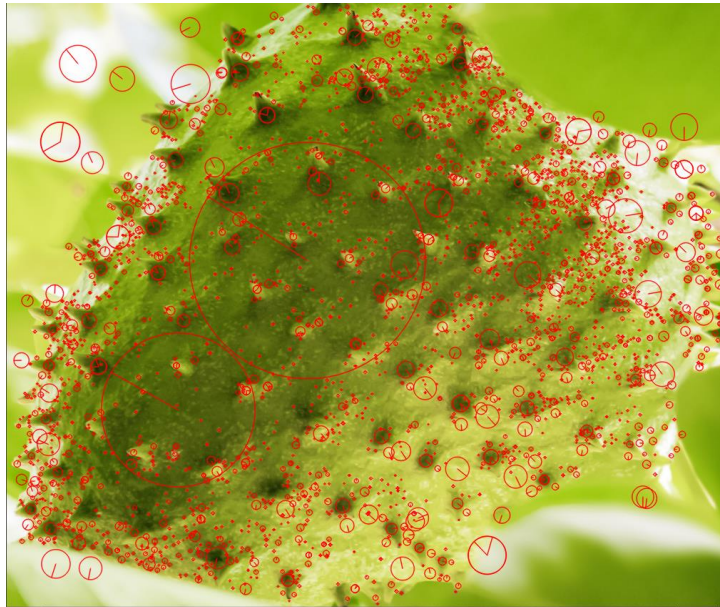


Figura 54 Características figura modificada.

Al comparar la Figura 53 y la Figura 54, es posible determinar zonas con puntos y resultados de características similares sin importar las modificaciones que se le realizaron a la imagen original. En la Figura 55 se presentan las correspondencias principales que se hallan en estas 2 imágenes, como se puede ver hay puntos de interés similares en ambos casos, estos puntos serán los determinantes para clasificar las imágenes según su contenido.

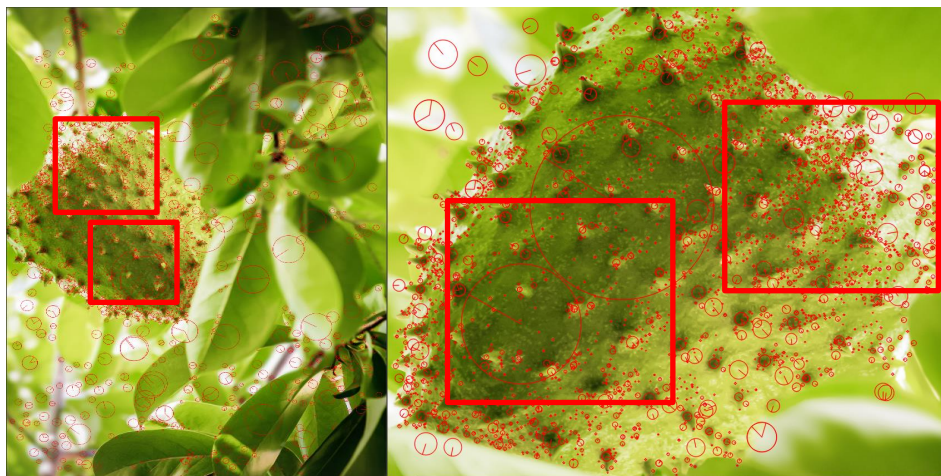


Figura 55 Correspondencia de la figura 38 y figura 39.

En Figura **55** se puede verificar la correspondencia de los descriptores invariantes, al mostrar resultados iguales sin importar las variaciones realizadas en la Figura 54. Posteriormente se procede a hallar la relación en los descriptores entre ambas imágenes. Para ello se calcula la distancia o diferencia entre los descriptores de la Figura 53 y los de la Figura 54, y únicamente se unen aquellos que tengan un porcentaje de igualdad mayor al 80%, como resultado se obtuvo la Figura **56**.



Figura 56 Resultado correlación entre imágenes.

En la Figura 56 se puede comprobar que al extraer las características de una imagen no importa si esta se rota, se comprime, o cualquier otra modificación espacial que se pueda realizar, debido a que el proceso extrae las características fundamentales de la imagen y estas se mantienen a pesar de cualquier tipo de transformación.

En la Figura **57** se realiza el proceso de extracción de características para seguir usando la imagen de la guanábana como ejemplo. En este caso se observa que la mayoría de los puntos de interés se sitúan hacia el borde de la fruta, como formando la frontera entre el fondo blanco y el fruto. Esto se debe a que al extraer las características se tienen en cuenta los cambios de intensidad horizontales y verticales, y en el caso de esta imagen los cambios más grandes de intensidad se presentan en el borde de la fruta.



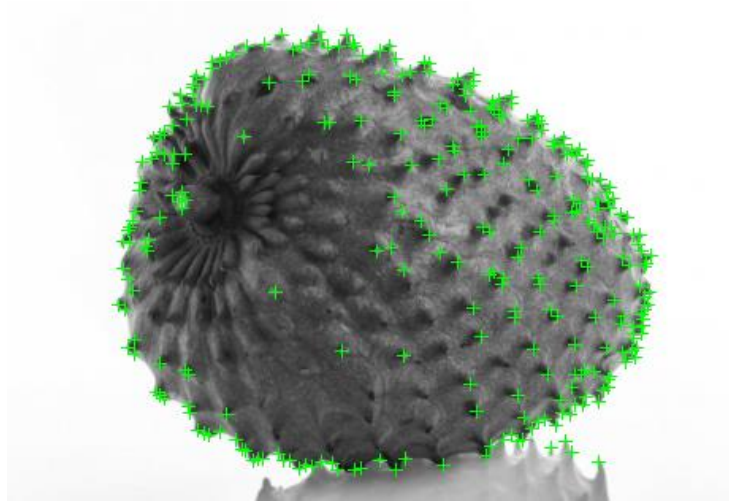


Figura 57 Extracción características guanábana.

El proceso de extracción de características permite comparar 2 imágenes “iguales” que estén modificadas, y encontrar la similitud entre estas haciendo la identificación de las características que se comparten. En la Figura **58;Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver como se sobreponen 2 imágenes la guanábana con algunas variaciones a la original, sin embargo, al haber extraído las características es posible identificar los puntos que son similares para determinar los objetos que están en la imagen, sin importar si han rotado o se encuentran en diferente ubicación.

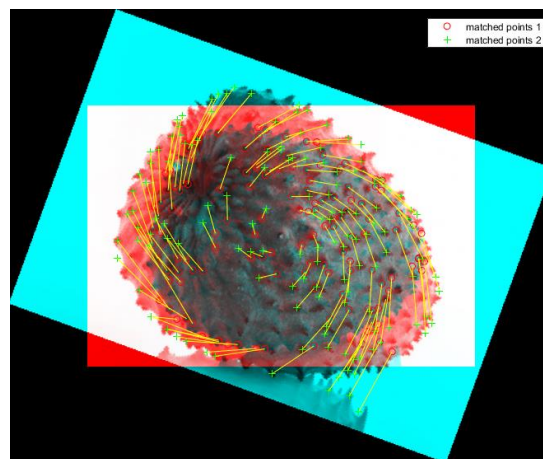


Figura 58 Comparación imágenes modificadas.

En la Figura 58 se puede comprobar que al extraer las características de una imagen no importa si esta se rota, se comprime, o cualquier otra modificación espacial que se pueda realizar, debido a que el proceso extrae las características fundamentales de la imagen y estas se mantienen a pesar de cualquier tipo de transformación. Con el proceso anterior se puede realizar la identificación de diferentes elementos en una imagen. En la Figura 59 se puede ver una guanábana diferente, con la cual se realizaron pruebas de segmentación y clasificación para el procesamiento e identificación de los objetos.



Figura 59 Guanábana base segmentación.

En la Figura 60, se puede observar la primera etapa de procesamiento de la imagen, donde se busca suavizar y eliminar el ruido de la imagen. En este caso se aplicó un filtro que nos permite eliminar las características que no se desean del fondo de la imagen, también se realiza la detección de bordes para únicamente aplicar el filtro al fondo de la imagen y no a la pieza ya que podrían eliminarse características importantes de esta. Para realizar la segmentación se separan las piezas del fondo para extraer las características de cada una de ellas.

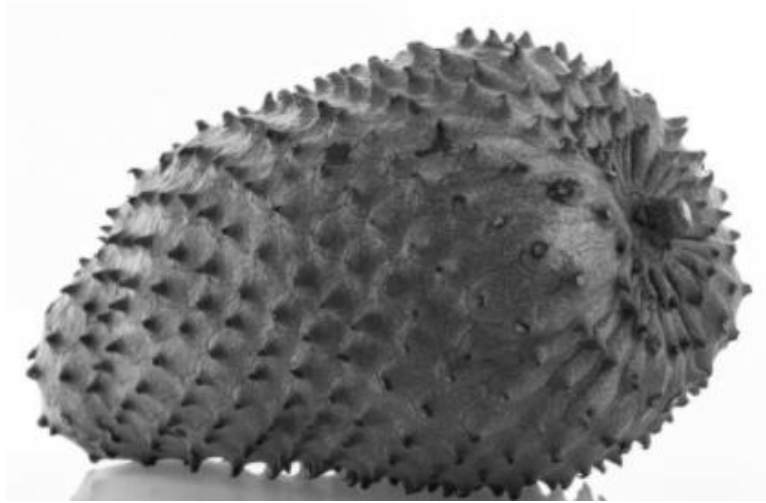


Figura 60 Preprocesamiento de la guanábana para segmentación.

Una vez se tiene la imagen preprocesada el siguiente paso es realizar la segmentación de los objetos presentes en la imagen, con las imágenes que se hicieron las primeras pruebas la segmentación separaba el fruto del fondo de la imagen, como se observa en la Figura 61.

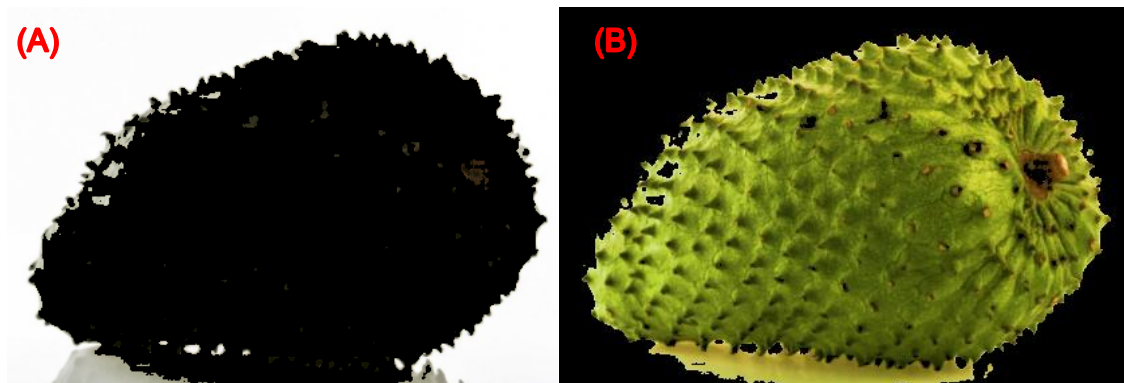


Figura 61 Segmentación de una guanábana. (A) Segmentación del fondo de la imagen. (B) Segmentación del fruto.

Como se observa en la Figura 61, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la segmentación del fondo y el fruto, se obtienen con algunos espacios que no corresponden, esto se debe a la precisión que tiene el algoritmo para segmentar los objetos, en la sección (B) de esta imagen el algoritmo toma la sombra

de la guanábana como parte de esta debido a que la sombra posee características similares a las del fruto.

Una vez segmentadas las imágenes se seleccionan los puntos de interés y se extraen las características de estas. Con los descriptores de los objetos presentes en las imágenes se procede a clasificarlos, y ordenarlos según sus características, es decir, cuando una imagen posea puntos iguales o similares a otra son agrupadas en diferentes clases como se ve en la Figura 62.

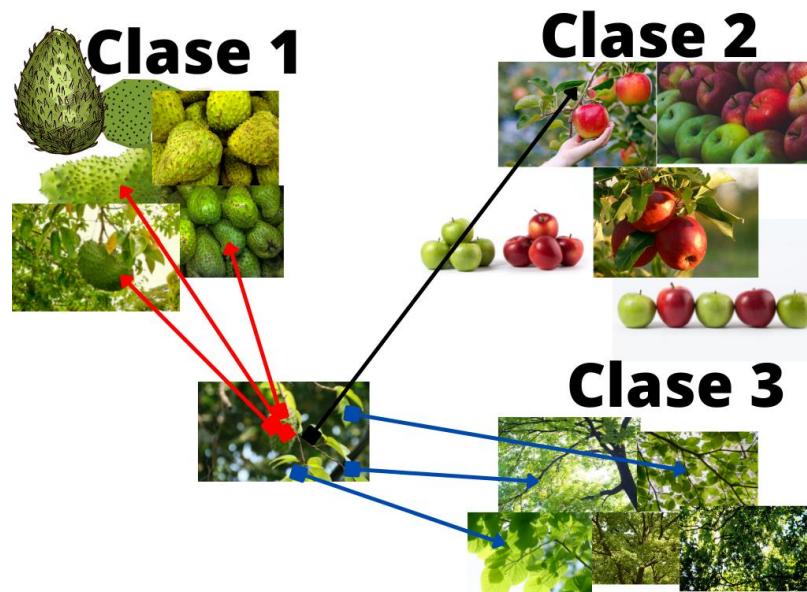


Figura 62 Clases para clasificación de imágenes.

Para determinar a qué clase pertenece una imagen se calcula la distancia o diferencia entre las imágenes de las clases y la imagen a clasificar, la cual es asignada a la clase con menor distancia. Al realizar la clasificación se obtiene un índice de igualdad, si el índice de igualdad es 1 o cercano a este valor la imagen coincide a la perfección con alguna de las clases. En la Figura 63 es posible observar el resultado de la segmentación y la clasificación de la Figura 60; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, comparada con ella misma lo cual nos arroja un índice muy cercano a 1.

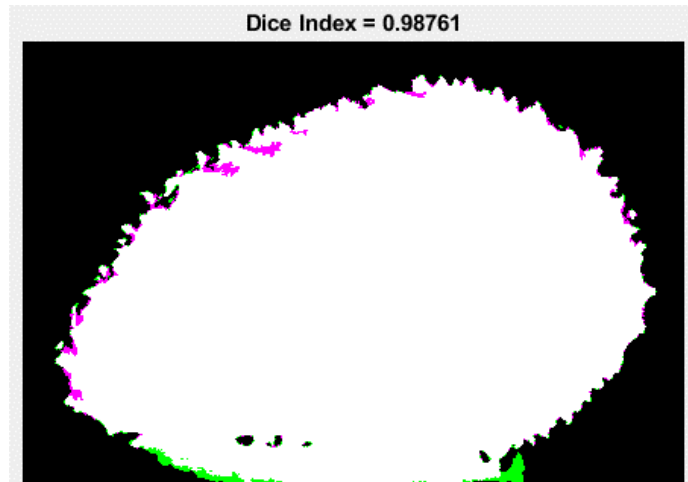


Figura 63 Clasificación de las imágenes.

Se realizó también una prueba con la Figura 50 comparándola con la Figura 60. Como resultado obtenemos la Figura 64, donde se observa un índice de igualdad de 0.82 aproximadamente, por lo cual esa imagen sería clasificada como una guanábana.

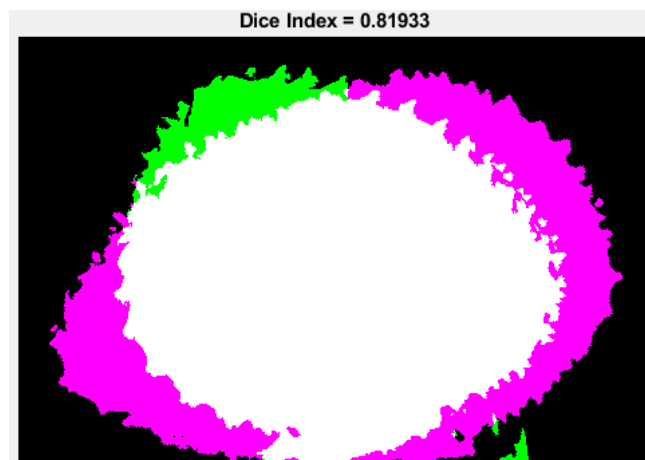


Figura 64 Similitud entre imágenes.

Al comprobar el funcionamiento del algoritmo se procedió a entrenar con la base de imágenes que se recopiló, este proceso se realizó por medio de la validación cruzada, donde se obtuvo una exactitud de 79.4% como mejor resultado, usando los mejores 50 resultados.

Para determinar el estado nutricional del cultivo se clasificaron las imágenes de los frutos en 2 grupos, “*frutos en buenas condiciones*” y “*frutos en malas condiciones*”, para ser clasificados en alguna de estas categorías se tuvo en cuenta si estos mostraban signos de la plaga “*avispita*” o de la enfermedad de la Antracnosis. Para esto se entrenó una red neuronal convolucional pre-entrenada a la cual se le cambiaron las capas finales realizando el entrenamiento con 100 épocas hasta encontrar la mejor configuración, una vez establecidas las capas que generaban los mejores resultados se estableció la cantidad de épocas de entrenamiento necesarias para obtener un resultado optimo.

En la Figura 65 se muestra en Azul el resultado de la precisión en el entrenamiento, y en Verde el resultado de la validación, el mejor resultado se obtiene en la época 34, donde el resultado del entrenamiento y la validación se encuentran en los valores mas altos con menor diferencia entre ellos.

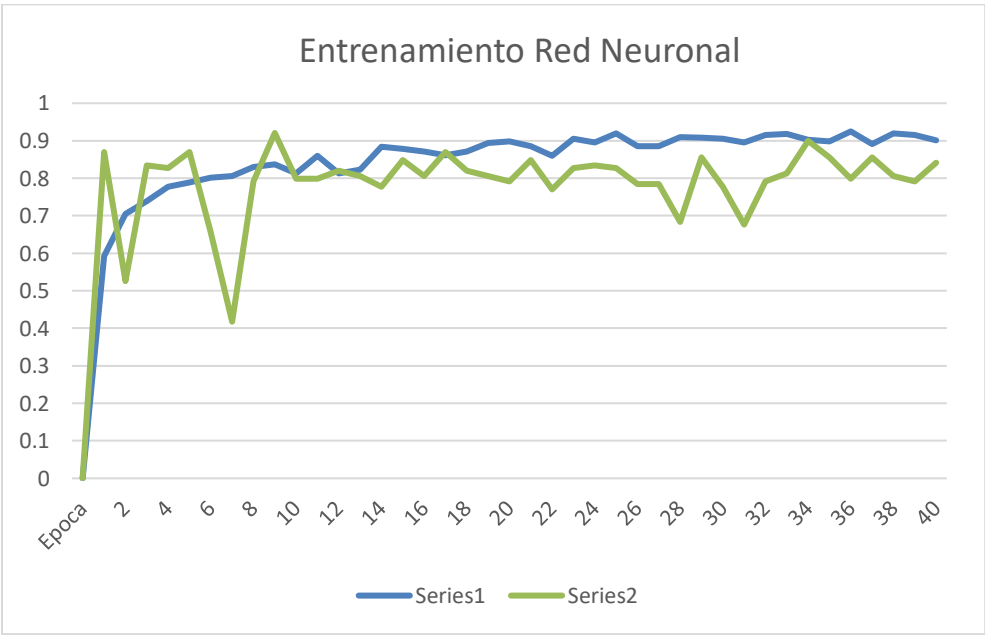


Figura 65 Entrenamiento por épocas red neuronal.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

- Se probaron 2 algoritmos de búsqueda inteligente para minimizar la distancia que debía recorrer el quadrotor al monitorear el cultivo. De estos algoritmos los mejores resultados se obtuvieron con el A\* y la primera heurística que se propuso para el desarrollo de este documento, obteniendo un mejor resultado de aproximadamente 30% a comparación del algoritmo genético.
- La optimización para la trayectoria que se utilizó fue la de 3 grado, que permite eliminar las vibraciones, esto se logra al hacer un recorrido continuo en posición, velocidad y aceleración como se mostró en los resultados, además, con este proceso se obtuvieron los valores de velocidad y aceleración más bajos, aproximadamente un 50% menores a los obtenidos para la optimización de trayectoria instantánea.
- Con la implementación del filtro de Kalman se logró realizar una aproximación de la posición y estado del quadrotor más exacta, logrando una realimentación de estados en tiempo real, lo que disminuyó la incertidumbre de la posición final del quadrotor en un 20%.
- El proceso de optimización una vez se tiene el orden de los puntos que se deben recorrer, fue de gran ayuda para realizar el envío de los datos de trayectoria a el quadrotor dado que el drone con el que se trabajó solamente recibe datos de velocidad, además, permite que el trayecto que se realiza sea continuo y con la menor cantidad de vibraciones en la cámara, garantizando que las fotografías que se toman tienen características adecuadas para posteriormente procesarlas y extraer información relevante de estas.

- La extracción de características en las imágenes con las que se trabajó de *Annona Muricata* fue un proceso en el cual las imágenes variaban en diversos aspectos como la luz, la ubicación del fruto, la cantidad de frutas en una imagen, la maduración, el tamaño, etc. En esta medida los algoritmos que se deben implementar en estas aplicaciones deben ser invariantes ante estas características anteriormente mencionadas.
- De esta manera, se realiza un algoritmo basado en el método SIFT, que permite obtener las características principales de la imagen, además, poder clasificar estas imágenes según la información extraída. Para esto, fue necesario usar alrededor de 500 imágenes de frutos de guanábana para determinar el estado de las frutas. El algoritmo requirió aproximadamente 5 horas para su capacitación, donde el error de clasificación es de aproximadamente 19%.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Por la crisis mundial por el COVID 19 no fue posible realizar pruebas de campo con el equipo y quadrotor de la universidad militar, por esto para futuras investigaciones se recomienda:

- Realizar las pruebas de campo correspondientes de los algoritmos presentados en este documento. Así como la construcción de una base de imágenes mayor para obtener mejores resultados, dado que solo fue posible recopilar una base de 500 imágenes, y la mayoría de los algoritmos sugieren trabajar con 1000 muestras en adelante.
- Apoyar el proceso de tecnificación de la agricultura en Colombia capacitando y dando a conocer estas herramientas tecnológicas a empresas, agricultores y campesinos.



- Establecer parámetros claros y precisos que permitan hacer análisis de resultados y toma de decisiones acertadas en los cultivos, además, de crear un sistema de visualización donde se muestren las zonas afectadas del cultivo.
- Generar y promover la fabricación, ojalá nacional, de equipos para expandir este tipo de tecnología y la agricultura de precisión en Colombia.

## 7. REFERENCIAS

- Aumeeruddy, M. Z., & Mahomoodally, M. F. (2021). Global documentation of traditionally used medicinal plants in cancer management: A systematic review. *South African Journal of Botany*, 138, 424–494. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.006>
- Badmus, J. A., Oyemomi, S. A., Adedosu, O. T., Yekeen, T. A., Azeez, M. A., Adebayo, E. A., Lateef, A., Badeggi, U. M., Botha, S., Hussein, A. A., & Marnewick, J. L. (2020). Photo-assisted bio-fabrication of silver nanoparticles using *Annona muricata* leaf extract: exploring the antioxidant, anti-diabetic, antimicrobial, and cytotoxic activities. *Heliyon*, 6(11), e05413. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05413>
- Bazán, G. G., & Chávez, L. C. (2017). (*Annonaceae*), una fruta utilizada como alimento en el Perú prehispánico (*Annonaceae*), a fruit used for feeding in Ancient Perú. 24(2), 619–634.
- Beleño, I. (2018). *En el sector agrícola se pierden 6 millones de toneladas de alimentos al año*. <https://www.agronegocios.co/agricultura/en-el-sector-agricola-se-pierden-6-millones-de-toneladas-de-alimentos-al-ano-2706145>
- Berumen-Varela, G., Hernández-Oñate, M. A., & Tiznado-Hernández, M. E. (2019). Utilization of biotechnological tools in soursop (*Annona muricata* L.). *Scientia Horticulturae*, 245(October 2018), 269–273. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.028>
- Cabecinhas, D., Cunha, R., & Silvestre, C. (2019). A trajectory tracking control law for a quadrotor with slung load. *Automatica*, 106, 384–389. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.04.030>
- Castillo, R. (2016). *Algoritmos genéticos (GAS)* (pp. 15–17).

- Chaparro, Sandra P; Tavera, Mónica L; Martínez, José J; Gil, J. H. (2014). Aislados proteicos de la semilla de guanábana ( *Annona muricata* ). *Rev. U.D.CA Act. & Div. Cient.*, 17(1), 151–160.
- Chen, L., Liu, Z., Gao, H., & Wang, G. (2021). Robust adaptive recursive sliding mode attitude control for a quadrotor with unknown disturbances. *ISA Transactions*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.04.046>
- Fan, Y., Cao, Y., & Li, T. (2017). Adaptive integral backstepping control for trajectory tracking of a quadrotor. *ICCSS 2017 - 2017 International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems*, 619–624. <https://doi.org/10.1109/ICCSS.2017.8091489>
- FRANCESCO SABATINO. (2015). Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation. In *KTH Electrical Engineering* (Vol. 41, Issue 3). KTH Electrical Engineering.
- Gabriel, A. J. (2018). *EVALUACIÓN POSCOSECHA DE RESVERATROL Y 6-BENCIL AMINOPURINA EN GUANÁBANA (Annona muricata L.) TESIS PROFESIONAL*. 1–26.
- Galarza, D., Garcés, S., Velásques, J., Sánchez, V., & Zambrano, J. (2016). *INIAP -Estación Experimental Santa Catalina* (I. N. de I. A. (INIAP) (ed.)). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. <http://181.112.143.123/bitstream/41000/2827/1/iniapsc322est.pdf>
- Gonzalez, F. A., Afanador Cristancho, M. E., & Niño López, E. F. (2018). Modelamiento y simulación de un quadrotor mediante la integración de Simulink y SolidWorks. *Maskay*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.24133/maskay.v9i1.1043>
- Hernández, L. V., Moctezuma, H. L., Martínez, N. A. V., Bello, R. R., Rocha, D. G. C., & Contreras, R. G. C. (2014). La situación de las annonaceae en México: Principales plagas, enfermedades y su control. *Revista Brasileira de*

*Fruticultura*, 36(SPEC. EDITION 1), 44–53. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452014000500005>

Kamata, F. (2019). *Cómo Japón está revolucionando la agricultura sin tierra ni trabajadores* - *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49784511>

Karahan, M., & Kasnakoglu, C. (2019). Modeling and Simulation of Quadrotor UAV Using PID Controller. *Proceedings of the 11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2019*, 6, 2019–2022. <https://doi.org/10.1109/ECAI46879.2019.9042043>

Kharuf-Gutierrez, S., Hernández-Santana, L., Orozco-Morales, R., Aday Díaz, O. de la C., & Delgado Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 39, 79–91. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59282018000200007&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282018000200007&nrm=iso)

Kiyashko, M. A., Sholmov, A. K., & Efremov, A. A. (2017). Quadrotor mathematical and information model analysis. *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIconRus* 2017, 1(8), 901–904. <https://doi.org/10.1109/EIconRus.2017.7910700>

K. R. Krishna, “Precision Farming: Soil Fertility and Productivity Aspects.” Apple Academic Press, pp. 20–21, 2016, [Online]. Available: <https://books.google.com.co/books?id=PNWYCgAAQBAJ>.

Libardo Duarte , Juan Madrid, Brayan Montero Arévalo, Paolo. A. Ospina-Henao., G. Q. E. (2016). *Mecánica Lagrangiana para el Modelado Dinámico y Simulación mediante Simulink-Matlab de un Péndulo de Furuta*. 8. [http://fcbi.unillanos.edu.co/cici/Articulos/CICI\\_2016\\_paper\\_9.pdf](http://fcbi.unillanos.edu.co/cici/Articulos/CICI_2016_paper_9.pdf)

- Liu, Z., & Wang, Y. (2018). Trajectory planning and tracking for maneuverable quadrotors. *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*, 2900–2905. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407620>
- Lucas Aguirre, J. C., Hoyos, A., & Quintero Castaño, V. D. (2016). Evaluación fisicoquímica de pulpa de guanabana (*Annona muricata* L.) tratada enzimáticamente. *Vitae*, 23, S155–S158.
- Martín, L., Fuentes, H., Manuel, J., Carrasco, V., Alfonso, M., López, U., & Jaimes, G. (2015). Identification, damage and population fluctuation of *Gonodonta pyrgo* (Lepidoptera: Noctuidae) in *Annona muricata*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1001–1012.
- Matencio, A., Tutor, M., & Rodr, A. (2018). *Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica Análisis de diferentes condiciones de vuelo de un quadrotor*. Universidad de Sevilla.
- Mellinger, D., & Kumar, V. (2012). Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors. *Publicly Accessible Penn Dissertations*, 2520–2525. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980409>
- Mengistie, B. T., Mol, A. P. J., & Oosterveer, P. (2017). Pesticide use practices among smallholder vegetable farmers in Ethiopian Central Rift Valley. *Environment, Development and Sustainability*, 19(1), 301–324. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9728-9>
- Ministerio de agricultura y ganadería. (1991). Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. In *Medicinal Plants of the World, Volume 1*. <https://doi.org/10.1385/1-59259-365-8:133>
- Moyano Díaz, S. (2014). Diseño y Construcción de un Quadcopter. *Memoria*, 1, 78.
- Negash, L., Kim, H. Y., & Choi, H. L. (2019). Emerging UAV Applications in

Agriculture. 2019 7th International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications, RiTA 2019, 254–257. <https://doi.org/10.1109/RITAPP.2019.8932853>

Oktaý, T., & Köse, O. (2019). Dynamic Modeling and Simulation of Quadrotor for Different Flight Conditions. *European Journal of Science and Technology*, 15, 132–142. <https://doi.org/10.31590/ejosat.507222>

Omar, N. A., Razak, F. S. A., Tang, C. H., Uddin, A. B. M. H., Sarker, M. Z. I., Janakiraman, A. K., & Liew, K. Bin. (2021). Development and evaluation of a cosmetic cream formulation containing annona muricata leaves extract. *Latin American Journal of Pharmacy*, 40(2), 258–266.

Orjuela, Y. (2020a). *Fruvii, la aplicación para que los agricultores vendan sus productos directamente - Apps - Tecnología - ELTIEMPO.COM*. <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/apps/fruvii-la-aplicacion-para-que-los-agricultores-vendan-sus-productos-directamente-493950>

Orjuela, Y. (2020b). *Nanotecnología en cultivos de Boyacá - Novedades Tecnología - Tecnología - ELTIEMPO.COM*. 1. <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/nanotecnologia-en-cultivos-de-boyaca-480406>

Ortiz Gonzales, J. P. (2014). *Modelado y control robusto de un vehículo aéreo no tripulado quadrotor, en ambientes cerrados*. 85.

Podvalny, S. L., Chizhov, M. I., Gusev, P. Y., & Gusev, K. Y. (2019). The crossover operator of a genetic algorithm as applied to the task of a production planning. *Procedia Computer Science*, 150, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.100>

Prasad, S. K., Pradeep, S., Shimavallu, C., Kollur, S. P., Syed, A., Marraiki, N., Egbuna, C., Gaman, M.-A., Kosakowska, O., Cho, W. C., Patrick-Iwuanyanwu,

- K. C., Ortega Castro, J., Frau, J., Flores-Holguín, N., & Glossman-Mitnik, D. (2021). Evaluation of *Annona muricata* Acetogenins as Potential Anti-SARS-CoV-2 Agents Through Computational Approaches. *Frontiers in Chemistry*, 8, 624716. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.624716>
- Reinoso, M., Minchala, L. I., Ortiz, J. P., Astudillo, D., & Verdugo, D. (2016). Trajectory tracking of a quadrotor using sliding mode control. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), 2157–2166. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7530409>
- Robotics, R. (2018). *Tello User Manual 2018.04* (pp. 1–22).
- Ruíz, A. A. B. (2015). *Diseño y construcción de un cuadricoptero a control remoto* (Vol. 3, Issue 2, pp. 54–67). <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Ryze Robotics. (2020). *TELLO SPECS*. <https://www.ryzerobotics.com/tello/specs>
- Sánchez Yoldi, M. Á., & Ruiz Tadeo, F. J. (2011). *Modelización y simulación de un vehículo aéreo no tripulado*. 190.
- Suthanthira Vanitha, N., Manivannan, L., Meenakshi, T., & Radhika, K. (2020). Stability analysis of quadrotor using state space mathematical modeling. *Materials Today: Proceedings*, 33, 4040–4043. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.428>
- Tiempo, E. y N. el T. (2019). *DTN trae al país servicios de agricultura de precisión - Empresas - Economía - ELTIEMPO.COM*. <https://www.eltiempo.com/economia/empresas/dtn-trae-al-pais-servicios-de-agricultura-de-precision-334828>
- Trinidad, E., & Calderón, M. (2017). Identificación y caracterización de *Colletotrichum* spp. causante de antracnosis en aguacate Nayarit, México\* Identification and characterization of *Colletotrichum* spp. causing anthracnose in avocado Nayarit, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3953–

3964.

- Venkata Subba Rao, P., & Gorantla, S. R. (2019). Design and Modelling of an Affordable UAV Based Pesticide Sprayer in Agriculture Applications. *5th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2019*, 360(February), 2019–2022. <https://doi.org/10.1109/ICEES.2019.8719237>
- Vieira Lima, G., Monteiro Jorge Alves De Souza, R., Silva De Moraes, A., Oliveira Lopes, L. C., & Mara Vieira Ladeira, G. (2019). Stabilization and Path Tracking of a Mini Quadrotor Helicopter: Experimental Results. *IEEE Latin America Transactions*, 17(3), 485–492. <https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8863319>
- Wai, R. J., & Prasetia, A. S. (2019). Adaptive Neural Network Control and Optimal Path Planning of UAV Surveillance System with Energy Consumption Prediction. *IEEE Access*, 7, 126137–126153. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938273>
- Yingkun, Z. (2018). Flight path planning of agriculture UAV based on improved artificial potential field method. *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*, 17395602 d, 1526–1530. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407369>
- Zhao, Y., Zheng, Z., & Liu, Y. (2018). Survey on computational-intelligence-based UAV path planning. *Knowledge-Based Systems*, 158(March), 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.05.033>