

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS DEL INTERNET EN ECUADOR Y ALGORITMOS DE  
PLANIFICACIÓN DE RUTA PARA UAVS**

**REVISIÓN SISTEMÁTICA DE ALGORITMOS ÓPTIMOS PARA LA  
PLANIFICACIÓN DE RUTAS 3D DE VEHÍCULOS AÉREOS NO  
TRIPULADOS EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**MARCO VINICIO MORALES ARAGON**

**marco.morales01@epn.edu.ec**

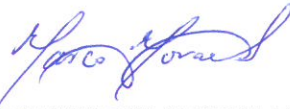
**ING. CHRISTIAN JOSE TIPANTUÑA TENELEMA, M.Sc.**

**christian.tipantuna@epn.edu.ec**

**DMQ, abril 2023**

## CERTIFICACIONES

Yo, MARCO VINICIO MORALES ARAGON declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



**MARCO VINICIO MORALES ARAGON**

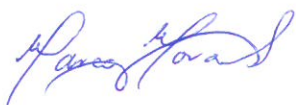
Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARCO VINICIO MORALES ARAGON, bajo mi supervisión.



**ING. CHRISTIAN JOSE TIPANTUNA TENELEMA**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



MARCO VINICIO MORALES ARAGON



ING. CHRISTIAN JOSE TIPANTUÑA TENELEMA

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres, ya que gracias a ellos he logrado cumplir mi meta y siempre han estado apoyándome desde la distancia. Son los pilares de mi vida y mi ejemplo a seguir, quienes han estado para brindarme su cariño y apoyo tanto en los momentos de felicidad como en los momentos difíciles de mi vida. Sin ellos nada de esto sería posible, los amo.

## **AGRADECIMIENTO**

***A mis padres: Cecilia Aragon y Juan Morales***

*Por su apoyo incondicional, enseñanza y los valores que me supieron inculcar desde pequeño.*

***A Ing. Christian J. Tipantuña Tenelema.***

*Por el apoyo, esfuerzo, motivación y tiempo dedicado en la dirección de este trabajo.*

***A Ing. Jorge Carvajal***

*Por el apoyo y tutoría brindada durante el desarrollo de este proyecto.*

***A la Escuela Politécnica Nacional***

*y a cada docente por los conocimientos impartidos, los cuales son la base tanto de mi formación académica como personal.*

***A la empresa JOSE JALIL & HIJOS CIA. LTDA.***

*Quienes me apoyaron y brindaron las facilidades para poder dedicar el tiempo necesario para desarrollar este proyecto, mientras cumplía con mis labores diarias.*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivo específico.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Definición de vehículos aéreos no tripulados (UAVs).....	3
1.4.2 Clasificación de los vehículos aéreos no tripulados.....	3
1.4.3 Sistemas de comunicaciones asistidos por UAVs.....	4
1.4.4 Planificación de rutas tridimensionales (3D).....	6
1.4.5 Algoritmos de planificación de ruta tridimensionales.....	10
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
2.1 Planificación.....	14
2.1.1 Alcance de los antecedentes del estudio.....	14
2.1.2 Estrategia de búsqueda de artículos.....	15
2.1.3 Procedimiento de inclusión y exclusión.....	15
2.2 Realización.....	22
2.3 Presentación.....	26
<b>3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>27</b>
3.1 Resultados.....	27
3.1.1 RQ1 - ¿existe planificación de rutas de los UAVs en 3D?.....	27
3.1.2 RQ2 - ¿existen métodos óptimos para la planificación de ruta en los UAVs en 3d?.....	30
3.1.3 RQ3 - ¿existen métodos aproximados para la planificación de ruta en los UAVs en 3d?.....	32
3.2 Conclusiones.....	41
3.3 Recomendaciones.....	41

<b>4</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>52</b>
I	ANEXO I: Objetivos a maximizar.....	52
II	ANEXO II: Variables a ser optimizadas .....	54
III	ANEXO III: Base de datos de cadima y documentos generados durante la etapa de planificación.....	56

## RESUMEN

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) conocidos también como drones, han experimentado un rápido desarrollo en los últimos años, esto los ha hecho muy populares para diversas aplicaciones como es en los sistemas de comunicaciones. Unos de los desafíos más importantes que presentan los UAVs en el ámbito de los sistemas de comunicaciones es la planificación de rutas en entornos complejos 3D. Esto con el objetivo de encontrar un camino libre de obstáculos y poder completar misiones, despliegues de red o desplazamientos sin colisiones en el menor tiempo posible. Teniendo en cuenta esta problemática en los últimos años ha surgido diversas técnicas de planificación de rutas que proponen la evasión de obstáculos en 3D afín de minimizar el tiempo de desplazamiento, mejorar la cobertura en tierra o incluso ahorrar el tiempo de vida del UAV en vuelo. La mayoría de las propuestas existentes en la literatura abordan la planificación de ruta en un entorno 2D; sin embargo, considerando condiciones reales el análisis en 3D es fundamental. Es por este motivo que el presente Trabajo de Integración Curricular plantea un estudio sistemático de las soluciones existentes de planificación de rutas en UAVs en un entorno 3D. El presente estudio se ha realizado analizando 37 artículos que fueron seleccionados de un total de 631 documentos de una búsqueda realizada en la base de datos Scopus. Para la selección se ha considerado soluciones que aborden la planificación de ruta mediante métodos de optimización. De todos los artículos analizados se pudo observar que la planificación de las rutas de los UAVs en 3D, debido a su complejidad, se realiza mediante algoritmos aproximados (heurísticos) únicamente, ya que en aplicaciones reales los algoritmos que producen soluciones exactas son computacionalmente demandantes. En el presente trabajo se incluye una descripción de los elementos que conforman parte de un sistema de comunicaciones habilitado por UAVs, la metodología utilizada y los resultados reportados como respuesta de las preguntas de investigación planteadas. Para una mejor comprensión se incluyen en el texto tablas y graficas de comparación tanto de los objetivos a maximizar, las variables a optimizar y los algoritmos implementados como estrategias de solución.

**PALABRAS CLAVE:** Vehículos aéreos no tripulados, planificación de rutas 3D, algoritmos heurísticos, mapeo sistemático.



## ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAV: Unmanned Aerial Vehicles) also known as drones, have experienced rapid development in recent years, this has made them very popular for various applications such as communication systems. One of the most important challenges that UAVs present in the field of communication systems is path planning in complex 3D environments. This with the objective of finding a path free of obstacles and being able to complete missions, network deployments or movements without collisions in the shortest possible time. Taking this problem into account in recent years, various path planning techniques have emerged that propose 3D obstacle avoidance in order to minimize travel time, improve ground coverage or even save the life time of the UAV in flight. Most of the existing proposals in the literature address path planning in a 2D environment; however, considering real conditions, 3D analysis is essential. It is for this reason that the present Curricular Integration Work proposes a systematic study of existing path planning solutions in UAVs in a 3D environment. The present study was carried out by analyzing 37 articles that were selected from a total of 631 documents from a search carried out in the Scopus database. For the selection, solutions that address path planning through optimization methods have been considered. Of all the articles analyzed, it was possible to observe that the path planning of the UAVs in 3D, due to its complexity, is carried out using approximate algorithms (heuristics) only, since in real applications the algorithms that produce exact solutions are computationally demanding. This paper includes a description of the elements that make up part of a communications system enabled by UAVs, the methodology used, and the results reported in response to the research questions posed. For a better understanding, comparison tables and graphs are included in the text of both the objectives to be maximized, the variables to be optimized and the algorithms implemented as solution strategies.

**KEYWORDS:** Unmanned aerial vehicles, 3D path planning, heuristic algorithms, systematic mapping.

# 1 INTRODUCCIÓN

Los UAVs son dispositivos aéreos autónomos que no necesitan ser tripulados por el ser humano [1], esto los ha hecho muy populares y útiles para diversas aplicaciones en diferentes áreas, como la agricultura, la fotometría, el rescate, el ejército, en sistemas de comunicaciones, etc. El despliegue de UAVs individuales o en grupo (es decir, formando redes) permite la exploración en lugares muy complejos, peligrosos y difíciles de alcanzar, permitiendo además un ahorro significativo de tiempo, costo y disminuyendo la pérdida de vidas humanas [2]. Además, los UAVs puede ser empleados como estructuras independientes o complementar sistemas de comunicaciones existentes como las redes celulares [5]. Los sistemas de comunicaciones mediante UAVs (UAV-CS) se han vuelto muy destacados debido a su bajo costo y rápido despliegue de red, que se utilizan en escenarios posteriores a desastres y ayudan a salvar vidas humanas y materiales [2]. Los UAVs que forman parte de un sistema de comunicaciones pueden ser empleados en diversas áreas, como estaciones base (AUV-BS), puntos de acceso (UAV-AP), enrutadores y puertas de enlace.

Los UAVs pueden ser controlados por un humano, pero también pueden ser autónomos, he aquí un desafío importante en la planificación de rutas complejas tridimensionales (3D). La planificación de rutas tiene como objetivo propiciar que los UAVs se desplacen (vuelen) en un camino libre de obstáculos para evitar colisiones considerando integridad en la ruta (cubrimiento de toda la ruta deseada) y optimalidad (por ejemplo, un camino más corto o un camino que produzca el menor consumo de energía). En este contexto, el presente Trabajo de Integración Curricular, busca presentar una revisión sistemática de las diferentes técnicas de planificación de rutas en tercera dimensión basado en los 4 últimos años. Para lo cual se empezará por una descripción de las características de los UAVs [4], las técnicas de planificación de rutas y los diferentes tipos de algoritmos desarrollados. La información de los algoritmos de referencia será recopilada de fuentes publicadas en la base de datos SCOPUS. De la información recopilada se extraerá aquella que se considere más relevante, de manera que se revise cada algoritmo desarrollado para la planificación de rutas en 3D. Esto permitirá desarrollar una fase de análisis metodológica. Entre los puntos a analizar se abordarán las soluciones algorítmicas exactos o heurísticas que planifiquen la mejor ruta en relación al menor tiempo y evasión de colisiones. Se esquematizará mediante un estudio de mapeo los algoritmos relevantes en la optimización de las rutas 3D para los UAVs.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar una revisión sistemática de los algoritmos de planificación de rutas o trayectoria en tercera dimensión para drones (UAVs) en el ámbito de un sistema de comunicaciones.

## **1.2 OBJETIVO ESPECIFICO**

1. Realizar una breve descripción de las características de los UAVs en sistemas de comunicaciones y de las técnicas de planificación de rutas 3D.
2. Aplicar una metodología de investigación sistemática para la revisión de la literatura existente acerca de la planificación de rutas 3D para UAVs.
3. Clasificar la información obtenida de acuerdo con la solución algorítmica utilizada.
4. Determinar el nivel de madurez de los algoritmos para la planificación de las rutas 3D.

## **1.3 ALCANCE**

El presente Trabajo de Integración Curricular tiene como objetivo presentar un estudio sistemático de los diferentes algoritmos y técnicas que permitan planificar rutas en 3D para sistemas de comunicaciones mediante UAVs, que provean conectividad a usuarios en tierra. La planificación de las rutas para los UAVs debe ser eficiente ya que los drones poseen recursos limitados y se debe maximizar sus parámetros, como el tiempo de vuelo, la duración de la batería, el tiempo de servicio, la cobertura, entre otros. Para lo cual se empezará por una descripción de las características de los drones, las técnicas de planificación de rutas y los diferentes tipos de algoritmos existentes [1].

De la información compilada, se extraerá aquella que se considere la más relevante, de manera que se analice cada algoritmo implementado por los investigadores en la planificación de rutas en 3D. Esto permitirá desarrollar una fase de análisis metodológico. Entre los puntos a analizar será los objetivos a maximizar, las variables a optimizar y los métodos que permitan encontrar la mejor ruta en relación al menor tiempo y evasión de colisiones. Se esquematizará mediante un estudio de mapeo los algoritmos relevantes en la optimización de las rutas 3D para los UAVs. Se realizará un análisis minucioso de los algoritmos de planificación de rutas empleados y los métodos de optimización de la trayectoria para los UAVs en un ambiente tridimensional, se analizará la madurez de estos

métodos empleados [3], permitiendo así conocer que algoritmos existen y su entorno de aplicabilidad.

## **1.4 MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 DEFINICIÓN DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAVS)**

Los UAVs son dispositivos voladores (aeronaves) que no necesitan de un piloto humano a bordo y están equipados con módulos de comunicación por radio. Estos dispositivos pueden ser controlados de forma manual por un humano en una estación base en tierra o de forma autónoma mediante programas de vuelo. El avance en la tecnología de miniaturización y el desarrollo de sistemas integrados han logrado una reducción considerable en el tamaño físico del UAV, y de igual manera abaratando su costo [6].

El uso de los UAVs como estaciones base aéreas (ASB: Aereal Base Station) es una tecnología alternativa que puede proporcionar conectividad inalámbrica eficiente a los usuarios en tierra. Debido a su movilidad y flexibilidad, una ASB puede ayudar con una mayor capacidad de cobertura bajo demanda. Esta solución puede ser utilizada por proveedores de servicios tanto para la densificación dinámica de la red, el despliegue rápido de la red en una situación de emergencia o la cobertura temporal de un área [5]. Otras aplicaciones de los UAVs son en el área militar, así como en el área civil, ya sea en la vigilancia, fuente de radio, localización, el mapeo aéreo en 3 dimensiones para proyectos de movimiento de tierras, escenarios de desastres, retransmisión para redes ad hoc FANET<sup>[1]</sup>, misiones de búsqueda y rescate entre otros escenarios de aplicación [4].

### **1.4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**

Cada UAV tiene su característica propia, la que va depender mucho de la aplicación en la que vaya a ser usado y lograr los resultados deseados. Los UAVs se clasifican en función de varios factores, ya sea por su altitud, tamaño o forma [1]. Por ejemplo, los drones de rotores múltiples son los más usados como los quadrotores, los hexacópteros y los octocópteros con rotores de paso fijo, tienen un modelo dinámico similar para el control, de estos, los quadrotores son los más económicos, más veloces y de mejor maniobrabilidad;

---

<sup>[1]</sup> **Redes ad hoc FANET:** Es una especie de red inalámbrica descentralizada autoorganizada transportada por un grupo de UAV (nodos), de modo que pueden comunicarse entre sí independientemente de la infraestructura fija [4].

sin embargo, se tiene que los hexacópteros y los octocópteros presentan una mejor estabilidad de vuelo, tolerancia a fallas y más capacidad de carga útil [2]. En la Figura 1.1 se presenta una clasificación general de los UAVs, ya sea por la altitud tenemos HAPs y LAPs, cada uno con sus características propias para este fin. De igual forma tenemos UAVs por su tamaño y su forma.

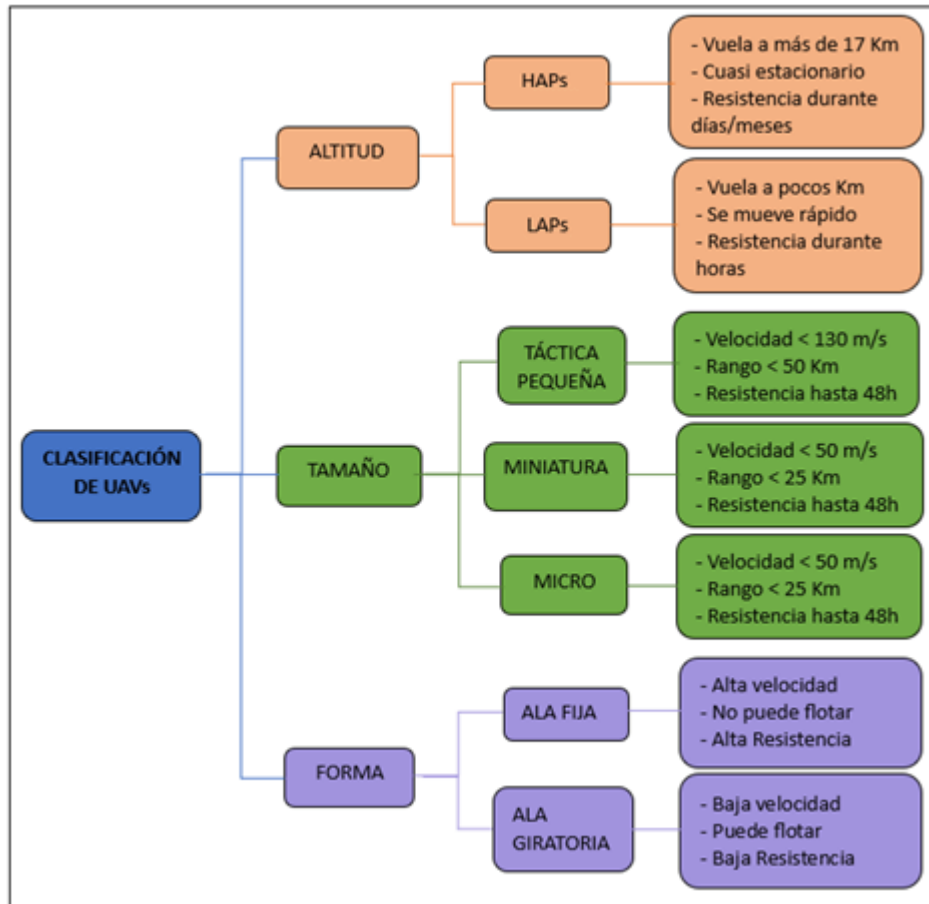
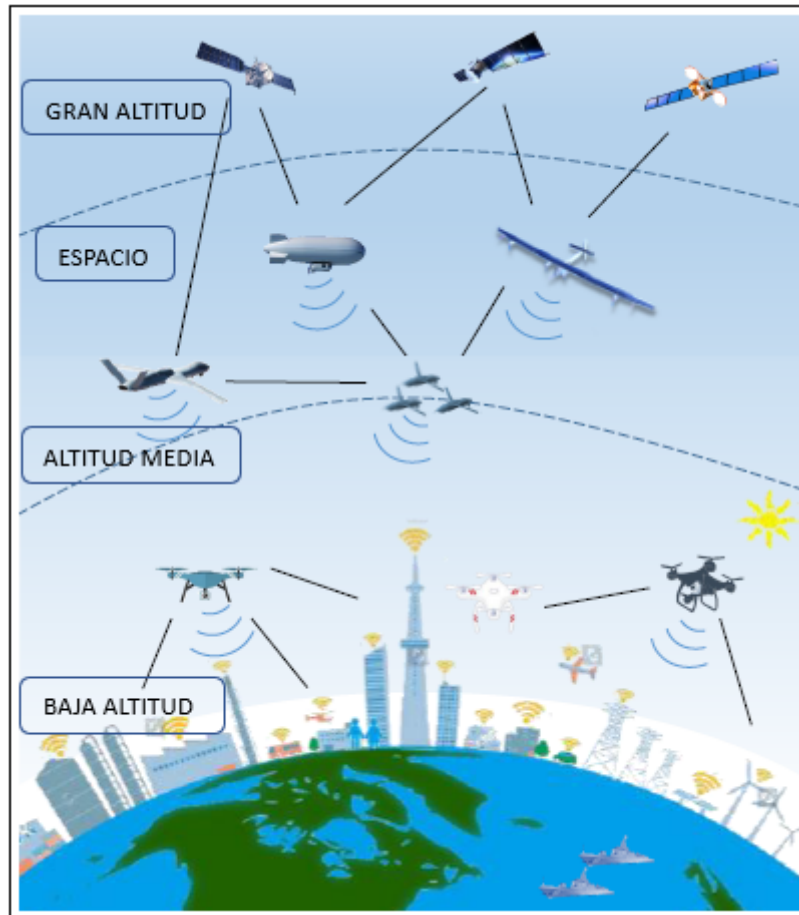


Figura 1.1. Clasificación de los UAVs [1].

### 1.4.3 SISTEMAS DE COMUNICACIONES ASISTIDOS POR UAVS

Los sistemas de comunicación inalámbricos asistidos por UAVs los podemos clasificar en dos grupos, el primer grupo que está representado por las plataformas aéreas de gran alcance a gran altitud que están simbolizadas por los satélites que se ubican en las orbitas y pueden permanecer por un largo tiempo en el espacio gracias a las ventajas de los recursos orbitales y la energía solar. El segundo grupo que representa las plataformas aéreas de baja altitud que están simbolizadas por aerostatos/UAVs atados, UAVs de comunicación de retransmisión y son muy usados en la comunicación de cuarta generación (4G) y quinta generación (5G) [6].

Para lograr una cobertura de comunicación densa en comunicaciones 5G, se requiere de muchas estaciones base, por lo que esto tendría un costo bastante elevado si se implementase estaciones base terrestres. Gracias a los UAVs se puede implementar estaciones base aéreas de baja altitud, donde se tiene grandes ventajas como es una disminución de costos, aumento de la eficiencia, una mejora efectiva de la cobertura y despliegue flexible [5]. En la Figura 1.2 se observa los diferentes sistemas de comunicación que son asistidos por los UAVs.



**Figura 1.2.** Red de comunicación 3D (comunicación de gran alcance a gran altitud y comunicación de alta densidad a baja altitud) [5].

Sin embargo, el reto para desarrollar comunicaciones asistidas por UAVs de baja altitud tiene dificultades como es el consumo de energía, evitación de interferencias, seguridad de la información, etc. Para empezar, el problema de consumo de energía viene dado porque la carga útil de un UAV y los mecanismos de vuelo son alimentados por baterías de capacidad finita. A pesar de esto, se espera que la comunicación aérea de la estación base sea sostenible y permita una amplia cobertura con gestiones de reemplazo de batería o de UAVs enteros. Como una solución a este problema, la optimización de la trayectoria proporciona una solución usando menos energía y logrando mayor rentabilidad de la

misión, generalmente cuando el uso de energía es algo que no se puede evitar. Otro inconveniente en las comunicaciones es que la estación base terrestre puede tener problemas de suspensión y cierre, lo que, de alguna manera en el aire, se beneficia por la libre movilidad de los UAVs [5].

Con la evolución de la tecnología y un aumento exponencial de usuarios en el campo de la comunicación, los UAVs están siendo muy utilizados para cubrir esta gran demanda requerida en el área de las comunicaciones inalámbricas, ya sea para la recopilación de datos de los nodos de internet de las cosas<sup>[2]</sup> (IoT: Internet of Things), para aumentar el alcance de la comunicación y proporcionar conectividad inalámbrica a los usuarios. Los UAVs son utilizados también como estación base en áreas y en ocasiones que el flujo de tráfico aumenta. En zonas de desastre donde los sistemas de comunicación sufren dañados, ahí entran a operar los UAV como estaciones base [9]. De igual forma son muy usados como enlaces de UAVs a estación base para grabar y transmitir las lecturas de un instrumento como audio y video (conocido como comunicación por radio). Otro uso muy común es el enlace de satélite a UAV para transportar información meteorológica, climática y de GPS (conocido como comunicación por satélite), y por último el enlace de UAV a UAV, donde se comparte información con otros UAVs a través de una comunicación inalámbrica [6].

#### **1.4.4 PLANIFICACIÓN DE RUTAS TRIDIMENSIONALES (3D)**

Desde un principio, las investigaciones de planificación de rutas para los UAVs eran realizadas solo considerando la posición en dos dimensiones, sin tomar en cuenta la altura que debe tener el UAV. Con el tiempo, los investigadores estimaron la posición óptima en tercera dimensión “3D”, tomando factores como un modelo de canal para el entorno rural, urbano y urbano denso. Este factor aumenta la complejidad del problema y se acerca más a la realidad que deben enfrentar los UAVs en un sistema de comunicaciones [1] [5].

La planificación de una ruta tridimensional es un tema muy complejo e investigado en los últimos años, ya que tiene la difícil tarea de encontrar la mejor ruta libre de colisiones, que se la define como la planificación de la ruta del UAV partiendo de una posición inicial hasta una posición objetivo (destino) y que es muy importante en una misión de UAVs. La ruta se planifica con el objetivo de minimizar el tiempo de finalización del UAV [6].

---

<sup>[2]</sup> **Internet de las cosas (IoT: Internet of Things):** Es la interconexión de dispositivos inteligentes y objetos, que permiten se comuniquen e intercambien datos entre sí a través del internet [95].

La planificación de la ruta de los UAVs se la puede clasificar en dos grupos. El primer grupo es el referido a la planificación de ruta de inicio a meta, en donde el UAV debe moverse entre dos puntos fijos mientras evita amenazas y obstáculos. En tanto, el segundo grupo es la planificación de la ruta de cobertura, en donde el UAV planificará un camino que cubra el área completa conforme se mantiene alejado de los obstáculos [1].

En la actualidad este enfoque ha cambiado y habido un mayor interés en el campo de la percepción 3D para la planificación de la ruta, donde se considera las limitaciones de percepción en el problema de planificación. Los métodos desarrollados en esta área tienen en cuenta la calidad de la percepción para minimizar la incertidumbre de estimación del estado y que se puede lograr manteniendo objetos y características específicas en el campo de visión limitado de detección del UAV [2].

Otras formas de planificación de rutas 3D son mediante métodos de restricción. El método de restricción estricta que garantiza la trayectoria óptima global, pero se acerca con facilidad a los obstáculos en el espacio libre, las restricciones dinámicas son demasiado conservadoras y la velocidad de vuelo es lenta. El otro método es de restricción suave que utiliza información de gradiente para alejar los obstáculos de la trayectoria, pero hay un mínimo local que no puede garantizar con éxito la tasa de éxito y la viabilidad cinemática [3].

Por otra parte, en la optimización de la ruta de los vehículos aéreos no tripulados, se debe minimizar los factores como son el costo, la energía y el tiempo. La planificación de rutas debe tener un equilibrio para poder minimizar estos 3 factores. La optimización del tiempo de la misión del UAV implica menor consumo de batería para completar la misión, logrando con esto una reducción en los costos de la planificación de la ruta. Del mismo modo, la optimización de la energía requerirá que el UAV complete la misión en el mínimo tiempo posible, lo que también resultará en un menor costo de planificación de la ruta [1]. Estos factores son muy importantes analizarlos y se los debe tener en cuenta para la optimización de la planificación de las rutas de los UAVs. En base a estos factores se consideran los siguientes puntos:

- **Costo:** La planificación de la ruta del UAV se considera rentable cuando disminuye el costo total de la planificación de la ruta, como es el costo de baterías, costos de hardware y software, costos adicionales como cámaras utilizadas para capturar las imágenes, sensores para detectar el entorno, GPS para localizar la posición, costo inicial de fabricación y mantenimiento, etc. [1].



- **Eficiencia en el tiempo:** La planificación de la ruta de los UAVs se considera eficiente en el tiempo cuando se logra finalizar la ruta en el menor tiempo posible. Esto se consigue optimizando una ruta y que esté libre de colisiones desde el origen hasta el destino. Como por ejemplo minimizar el tiempo de transmisión de información para la comunicación de UAVs de ala fija mediante la planificación de rutas óptimas de UAVs [6].
- **Eficiencia energética:** La planificación de rutas con eficiencia energética se considera cuando los UAVs usan el mínimo de su energía para completar su misión. La energía utilizada por los UAVs se optimiza con el objetivo que los UAVs completen toda la misión y regresen al destino [1]. Se tiene 3 componentes de la energía consumida:
  - **Energía voladora:** Energía utilizada por el UAV para volar del origen al destino.
  - **Energía flotante:** Energía utilizada por el UAV para permanecer en el aire para realizar la tarea, es decir, inspección.
  - **Energía de transmisión:** Energía utilizada por el UAV para enviar los datos a la fuente.

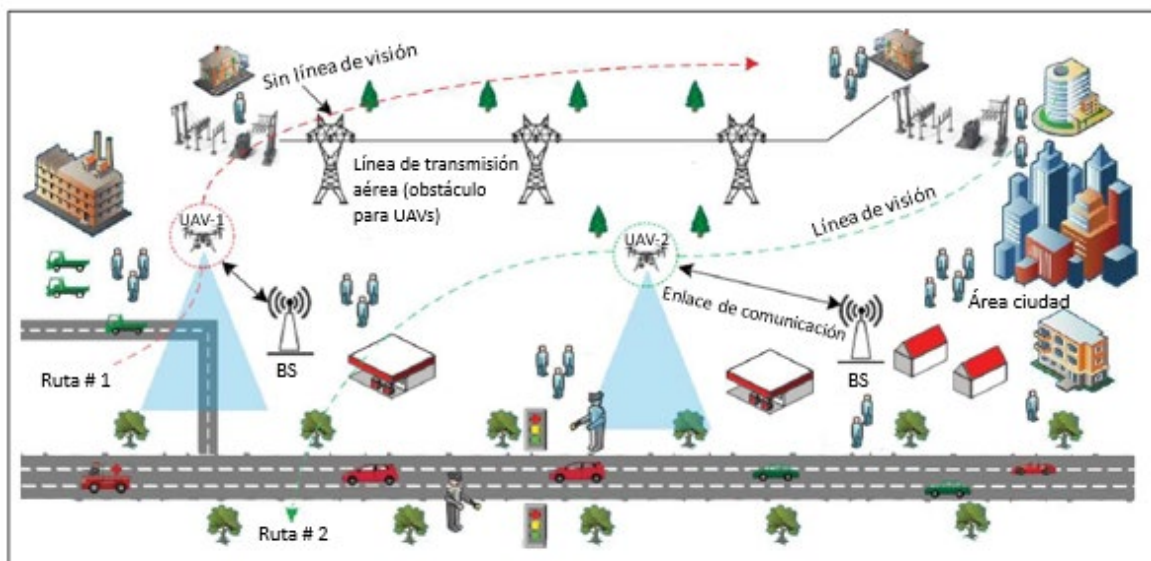
Para que la planificación de rutas de los UAVs sea implementada con éxito, se debe considerar algunos aspectos como son: el entorno del lugar donde va a volar, las dimensiones del área, los obstáculos presentes durante el vuelo, el número de UAV utilizados para completar la misión y el modo en que el UAV planifica la ruta. Todos estos aspectos son importantes en la planificación de una ruta factible y óptima para un vuelo del UAV. A continuación, una breve descripción de los aspectos antes mencionados [9].

- **Número de UAVs:** Una misión puede ser ejecutada por uno o varios UAVs, el número de UAVs utilizados va a depender mucho del tipo de aplicación que se vaya a desarrollar, como por ejemplo en un espectáculo de luces controladas por drones, se va requerir de varios UAVs y cada uno de ellos va a tener una planificación de ruta bien definida para evitar colisiones y lograr el efecto deseado [12].
- **Obstáculos:** Cualquier objeto que interrumpa el vuelo del UAV es considerado como obstáculo, es por este motivo que la planificación de la ruta debe estar enfocada en detectar obstáculos, evitar estos obstáculos y garantizar su camino hasta el destino. Los obstáculos podemos clasificarlos en técnicos que son las restricciones que se desarrollan para completar de manera exitosa y económica una tarea, por otro lado, los obstáculos no técnicos que pueden ser limitaciones estáticas tales como edificios, montañas, árboles o limitaciones dinámicas que vienen a ser amenazas inesperadas como por ejemplo un pájaro. Para evitar los obstáculos tanto dinámicos como estáticos

el UAV puede estar equipando UAV con sensores que le permita detectar los obstáculos en todo momento. Así también otra forma de evitar colisiones consiste en definir áreas de vuelo restringidas [1].

- **Medio ambiente:** El entorno puede ser incierto ya que puede cambiar frecuentemente de estático a dinámico. Es por este motivo que se debe conocer el entorno en que el UAV debe volar y planificar rutas en entornos inciertos. Varios estudios han sido realizados en diferentes hábitats implementando diferentes algoritmos que puedan resolver la complejidad de un entorno incierto [1].
- **Altitud:** La planificación de ruta en tercera dimensión es algo compleja debido a que la altitud cambia constantemente, esto ocasiona que el UAV tenga que estar cambiando su velocidad y dirección frecuentemente [1].
- **Distancia:** Este aspecto está enfocado en la distancia de la planificación de la ruta, donde se puede tener planificaciones de ruta en línea, las cuales son en tiempo real y se debe considerar las condiciones ambientales mientras el UAV se dirige a su destino. Las planificaciones de ruta fuera de línea son las que se desarrollan antes que el UVA empieza su vuelo, en este caso se tiene información sobre el terreno y sus obstáculos por donde el UAV va a desarrollar su vuelo [1].

En la Figura 1.3 se puede observar el entorno de una ciudad donde un UAV debe planificar la mejor ruta posible para completar su misión, para ello el UAV debe conocer las dimensiones del área, obstáculos que se pueden presentar durante el vuelo, condiciones ambientales de la ciudad, y a que todos estos aspectos tienen un papel muy importante al momento de la planificación de una ruta óptima.



**Figura 1.3.** Planificación de rutas de una red de UAVs para comunicaciones [1].

## 1.4.5 ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE RUTA TRIDIMENSIONALES

Los algoritmos empleados para la planificación de rutas tridimensionales definen el rendimiento de los UAVs para encontrar la ruta óptima, estos algoritmos se los ha clasificado en 4 categorías como son los algoritmos basados en muestreo, algoritmos basados en nodos, algoritmos bioinspirados y algoritmos múltiples [3].

### 1.4.5.1 Algoritmos basados en muestreo

Los algoritmos basados en muestreo deben tener información predefinida referente a la configuración del espacio de trabajo con respecto al entorno 3D. Luego divide el entorno en un conjunto de diferentes nodos y posteriormente mapea estos nodos en la configuración del espacio de trabajo con los diferentes algoritmos de planificación de rutas óptimas. Las siguientes secciones muestran los diferentes tipos de algoritmos basados en muestreo [6][8].

- **Descomposición celular:** En esta sección el espacio libre se divide en un conjunto de celdas o regiones con la finalidad de que se pueda calcular fácilmente una ruta segura entre dos puntos en la misma celda o en las celdas adyacentes. Una vez calculada la ruta en las celdas del espacio libre, se realiza la organización de las celdas de manera secuencial. Para la planificación de rutas de los UAVs por descomposición celular se emplean los algoritmos siguientes: Árboles aleatorios de exploración rápida (RRT: Rapidly exploring Random Tree) y hojas de ruta probabilísticas (PRM: Probabilistic RoadMaps) usando tiempo y costo computacional. Así como el algoritmo de descomposición celular exacta en el mapa de ruta probabilístico (ECD-PRM: Exact Cell decomposition on the Probabilistic RoadMap), este algoritmo reduce el impacto de la descomposición celular en la planificación de la ruta de los UAV [6].
- **Hojas de ruta:** Esta sección consta de dos fases. La fase de construcción que calcula la conectividad del espacio libre definiendo las curvas de la red en el entorno 3D y la fase de consulta que se realiza tras la construcción de las hojas de ruta, en esta fase de consulta se resuelve una configuración inicial y final de puntos. La técnica de hojas de ruta se utiliza para resolver las consultas de planificación de rutas de UAV que se mueven en un entorno estático. El tiempo de cómputo de las consultas finaliza durante el tiempo de procesamiento y sus consultas se resuelven en tiempo real. Los algoritmos utilizados en esta sección de Hojas de ruta es el algoritmo estrella RRT (RRT\*: Star RRT), de base dispersa para UAVs híbridos en un entorno urbano denso y para el

suavizado de la ruta final y evitar colisiones de los UAVs se realiza mediante el algoritmo estrella A (A\*: Star A) [6].

#### **1.4.5.2 Algoritmos basados en nodos**

Los algoritmos basados en nodos definen su espacio de trabajo como un gráfico o una cuadrícula, donde la ruta del UAV inicia en un nodo de la cuadrícula y cruza más nodos con la finalidad de lograr su destino. Ejemplos de estos algoritmos basados en nodos es el algoritmo A\* que permite la planificación de la ruta del UAV en línea, basándose en la partición del problema mediante una serie de cuadrículas independientes para disminuir la carga computacional. Cada cuadrícula incluye un número reducido de celdas que consideran las amenazas y otra información valiosa del entorno 3D y finalmente el algoritmo A\* realiza búsquedas locales de las rutas factibles [7]. Otro ejemplo es el algoritmo de fuerzas virtuales difusas (FVF: Fuzzy Virtual Forces), este algoritmo resuelve el problema de los mínimos locales encontrados en los algoritmos de fuerzas virtuales (VF: Virtual Forces) [8].

Estos algoritmos basados en nodos requieren de una discretización del espacio de trabajo que implica una compensación entre la complejidad competitiva y la precisión de la planificación de rutas. Cuanto mayor sea el tamaño de la cuadrícula, más recursos computacionales se necesitarán para la planificación de la ruta y menor será la precisión. Además, no se puede obtener una ruta óptima real con una discretización ya que se necesitaría un gráfico o cuadrícula infinita [7].

#### **1.4.5.3 Algoritmos bioinspirados**

Presentan la planificación de rutas de los UAVs mediante fenómenos naturales, por lo que no son suficientemente exactos. De tal forma que el problema de planificación de ruta es presentado como un problema de optimización, tomando en cuenta la información ambiental. Entre las técnicas bioinspiradas como la meta-heurística<sup>[3]</sup> ha ganado popularidad debido a sus características atractivas y valiosas. Otras técnicas son: algoritmos genéticos (GA: Genetic Algorithm), algoritmo genético vibracional (VGA: Vibrational Genetic Algorithm), optimización de enjambre de partículas (PSO: Particle

---

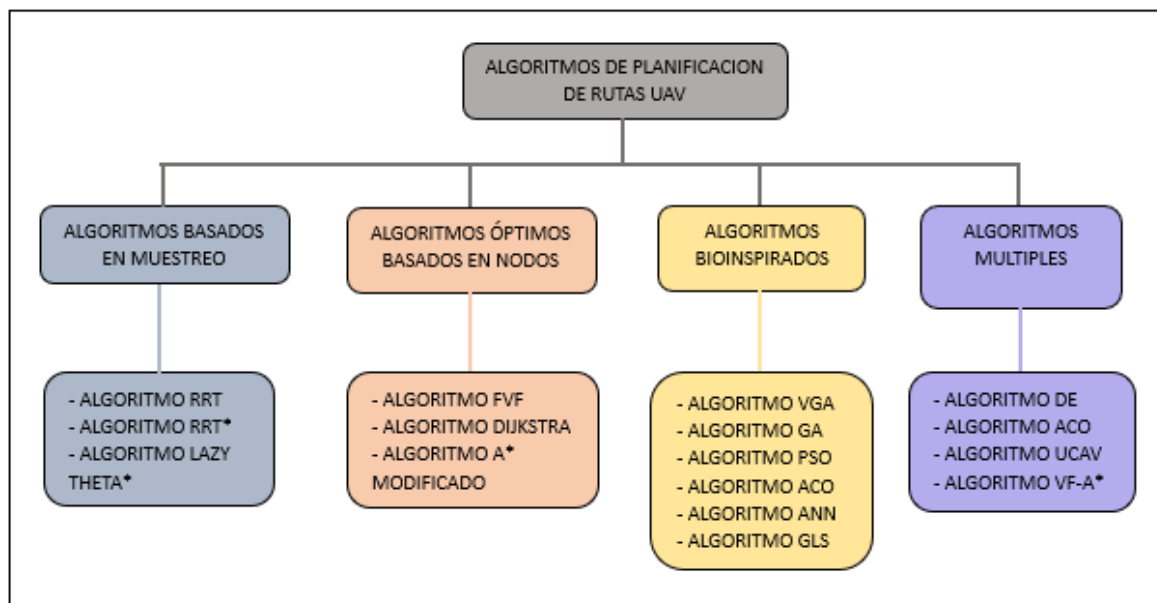
<sup>[3]</sup> Meta-heurística: Son plantillas, esquemas generales o "filosofías" para la búsqueda de buenas soluciones a problemas, que se pueden adaptar de diferentes formas a cualquier problema de optimización [95].

Swarm Optimization), red neuronal artificial (ANN: Artificial Neural Network), optimización de enjambre de partículas basada en conjuntos (S-PSO: Set-based Particle Swarm Optimization), optimización de colonia de hormigas (ACO: Ant Colony Optimization), etc. [7][8].

#### 1.4.5.4 Algoritmos múltiples

Los Algoritmos múltiples se los puede dividir en dos clases. Una clase es de la combinación de varios algoritmos de planificación de rutas que se integren para trabajar juntos y encontrar la mejor ruta. La otra clase es de la implementación de varios algoritmos de planificación de rutas, donde el primero debe terminar su proceso para que continúe el siguiente algoritmo y así sucesivamente hasta que terminen todos los algoritmos. Estas clases siguen un esquema de algoritmo híbrido meta-heurístico que pueden ser: Algoritmo ACO y el algoritmo de evolución diferencial (DE: Differential Evolution). En la literatura también se propone un algoritmo híbrido que combina un algoritmo de VF por su simplicidad y el algoritmo A\* por su robustez y eficiencia [8].

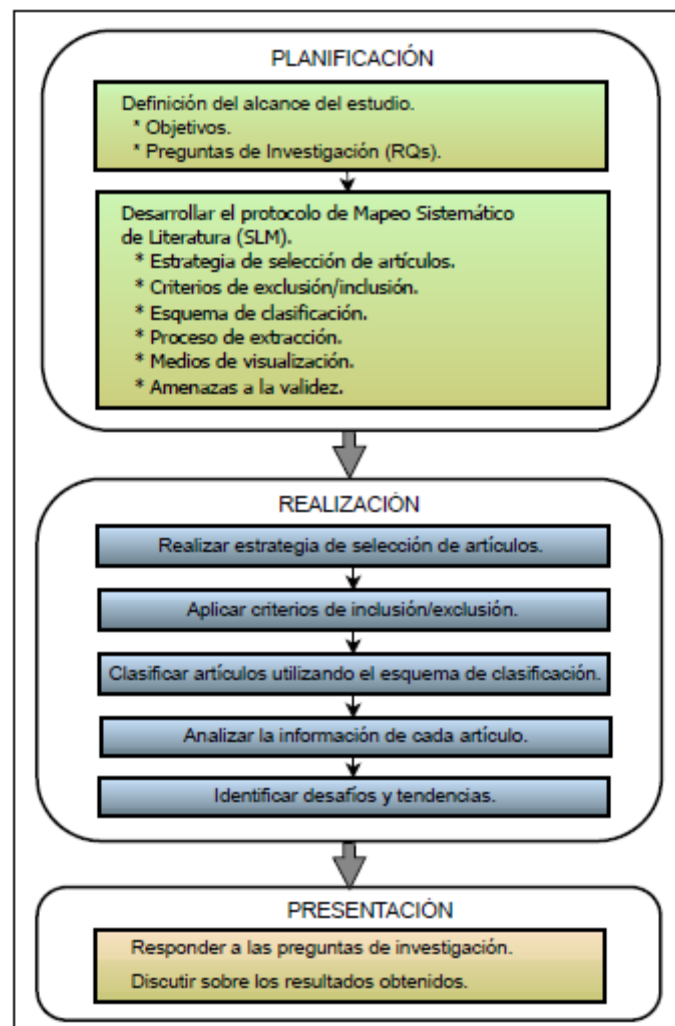
En la figura 1.4 se presenta las categorías de los algoritmos y un resumen de los algoritmos más utilizados en cada una de las categorías.



**Figura 1.4.** Clasificación de Algoritmos de planificación de rutas UAVs 3D.

## 2 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se desarrolla la metodología de trabajo para llevar a cabo un estudio sistemático de algoritmos óptimos y subóptimos para la planificación de rutas en entornos complejos 3D de UAVs. Esta investigación se la realiza mediante la búsqueda de información en una base de datos de referencias bibliográficas muy completa como es “Scopus”. Una vez obtenida la referencia bibliográfica (artículos de revista y conferencias), la documentación es organizada y clasificada con la herramienta web llamada “CADIMA”, en esta aplicación se filtra la información de interés de acuerdo a criterios de inclusión y exclusión afín de realizar la revisión sistemática de la literatura clasificada. Todo el proceso de la metodología a seguir se la describe en 3 etapas: planificación, realización y presentación, como se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Flujo de proceso y tareas del estudio de mapeo sistemático, basado en [11].

## 2.1 PLANIFICACIÓN

El presente trabajo está enfocado en la recolección de información acerca del uso de técnicas y soluciones de aprendizaje automático aplicados para resolver problemas relacionados a la planificación de rutas de UAVs en 3D, elaborando así un trabajo exploratorio, con el fin de mostrar una visión global acerca de este tema que tiene mucho auge en actualidad. En el desarrollo de esta etapa de planificación se cumplirá con el segundo y tercer objetivo específico descritos en este componente.

### 2.1.1 ALCANCE DE LOS ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

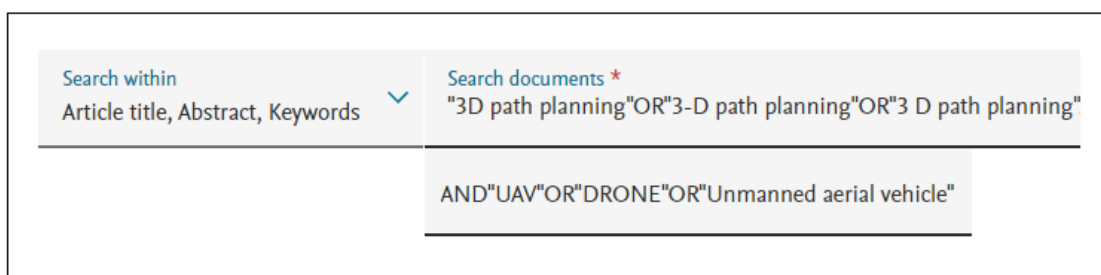
El desarrollo de esta tarea está enfocado en dos secciones, la primera que describe el background de la investigación a ser implementada, es decir, se analizan temas relacionados con las técnicas de planificación de rutas para UAVs en 3D, conceptos de aprendizaje automático y áreas de trabajo en las que se podría aplicar estas técnicas de planificación de rutas. En la segunda sección, se determinan las preguntas de investigación que permitan el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo. Estas preguntas de investigación se muestran en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Preguntas de investigación relacionadas al estudio sistemático de literatura.

No	Preguntas de investigación (RQ)	Fundamento
RQ1	¿Existe planificación de rutas de los UAVs en 3D?	Conocer acerca de la planificación de rutas para los UAVs en entornos complejos 3D que estén libres de colisiones desde la posición inicial hasta la posición objetivo.
RQ2	¿Existen métodos óptimos para la planificación de ruta en los UAVs en 3D?	Conocer si los métodos óptimos utilizados por los investigadores brindan resultados exactos para la planificación de rutas en los UAVs en 3D, con un costo computacionalmente elevado.
RQ3	¿Existen métodos aproximados para la planificación de ruta en los UAVs en 3D?	Saber si los métodos aproximados tienen menos parámetros y una convergencia más rápida, que ayudan a evitar amenazas dinámicas en un entorno en tiempo real, disminuyendo el costo y tiempo de ejecución considerablemente.

## 2.1.2 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA DE ARTÍCULOS

La búsqueda de documentos existentes relacionados a este tema se la realizó a través de la base de datos Scopus que indexa a bibliotecas digitales muy importantes como son IEEE, Xplore, Springer Link, Science Direct o ACM, esta base de datos es completa y contiene mucha información de la literatura existente en un dominio [11], en nuestro caso correspondiente a los métodos de planificación de rutas en 3D para UAVs. La búsqueda está basada en las preguntas de investigación y con las palabras claves que cubren en forma general todo el campo de estudio. Así la Figura 2.2 muestra la primera cadena de búsqueda realizada en Scopus para este estudio.



**Figura 2.2.** Cadena de búsqueda con palabras claves en Scopus.

De esta primera cadena de búsqueda, se obtuvieron un total de 1233 documentos. Al ser un número bastante grande de artículos, se realiza una segunda búsqueda con el procedimiento de inclusión y exclusión que se indica a continuación.

## 2.1.3 PROCEDIMIENTO DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

El proceso de inclusión y exclusión son filtros que se utilizan para excluir estudios que no son relevantes para responder a las preguntas de investigación (RQs). Para la selección de los 1233 documentos encontrados en la primera cadena de búsqueda realizada, se debe realizar un filtro con los criterios de inclusión y exclusión de manera automatizada y manual que permitan una recopilación de información adecuada.

### 2.1.3.1 Inclusión-exclusión automatizada

Los criterios de inclusión-exclusión pueden ser automatizados y deben con los siguientes parámetros: tipo de documento, idioma, años de publicación y área temática.

- **Tipo de documento:** Los documentos seleccionados son artículos de revista, de conferencia, revisiones de literatura.



- **Idioma:** Se seleccionó solo el idioma inglés ya que es el lenguaje universal y la mayoría de los trabajos relevantes se encuentran publicados en este idioma.
- **Años de publicación:** Para seleccionar la documentación más actualizada se escoge la documentación de los últimos 4 años (es decir, desde 2019 hasta 2022).
- **Área temática:** El área de nuestro interés es la Ingeniería y Ciencias de la computación.

Una vez realizado el filtrado con los criterios de inclusión-exclusión automática, se genera una nueva cadena de búsqueda, la cual queda de la siguiente manera:

*"3D path planning" OR "3-D path planning" OR "3 D path planning" AND "UAV" OR "DRONE" OR "Unmanned aerial vehicle" AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR,2022) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2021) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2020) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR,2019) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE,"ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"cp" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA,"ENGI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"COMP" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE,"English" ) )*

Una vez aplicada esta nueva cadena de búsqueda, finalmente el resultado de documentos seleccionados fue de 631, como se puede observar en la gráfica de la Figura 2.3.

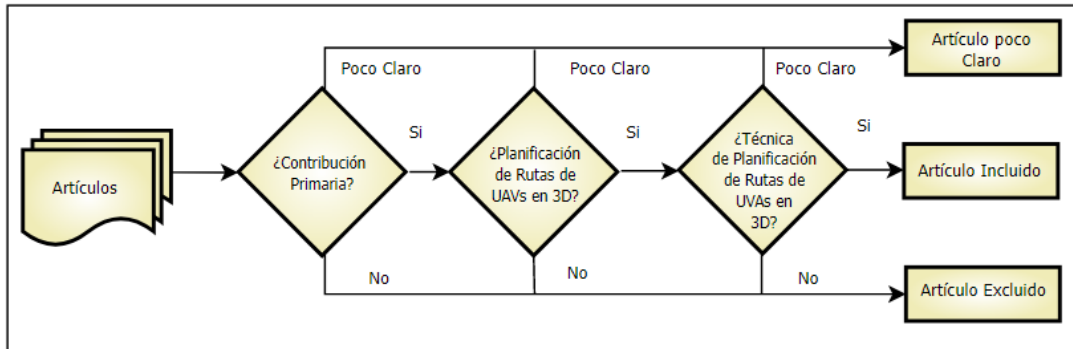
The screenshot shows the Scopus search interface. At the top left is the logo of the ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. Below it is the Scopus logo. A search bar contains the query: *"3D path planning" OR "3-D path planning" OR "3 D path planning" AND "UAV" OR "DRONE" OR "Unmanned aerial vehicle" AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR, 2022 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR, 2021 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR, 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR, 2019 ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE, "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE, "cp" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE, "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA, "ENGI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA, "COMP" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE, "English" ) )*. Below the search bar, a notification banner states: "The new, enhanced version of the search results page is available. Try the new version". The main heading reads "631 document results". At the bottom of the search bar area, there are icons for "Edit", "Save", and "Set alert".

**Figura 2.3.** Cadena de búsqueda con criterios de inclusión-exclusión automáticos.

### 2.1.3.2 Inclusión-exclusión manual

Para la etapa de criterios de inclusión-exclusión manual, los filtros ejecutados son decisiones tomadas por los mismos investigadores del estudio. Mediante un árbol de

decisión se puede tener claro los tipos de criterios aplicados en esta etapa y lo podemos ver a continuación en la Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Árbol de decisión para la selección manual de artículos basado en [11].

El árbol de decisión describe los procesos que deben tomarse en cuenta para la clasificación manual de los documentos a ser analizados en este estudio. De los 631 artículos seleccionados en la etapa de filtrado automatizado, se requiere determinar si estos documentos son contribuciones primarias, pertenecen al dominio del tema de investigación y están relacionados con técnicas de planificación de rutas de UAVs en 3D.

**Tabla 2.2.** Criterios de inclusión y exclusión manual.

Criterios	Descripción
Criterios de Inclusión	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El artículo es una contribución primaria <sup>[1]</sup>.</li> <li>2. La contribución reportada en el artículo está relacionada con la planificación de rutas de UAVs en 3D.</li> <li>3. El artículo incluye al menos una contribución que proponga una técnica de planificación de rutas de UAVs en 3D</li> </ol>
Criterios de Exclusión	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El trabajo reporta una contribución secundaria o terciaria <sup>[2]</sup>.</li> <li>2. La contribución no se centra en la planificación de rutas de UAVs en 3D.</li> <li>3. La contribución reportada no emplea una técnica de planificación de rutas de UAVs en 3D.</li> </ol>

<sup>[1]</sup> Contribución Primaria: Son fuentes en donde la información proporcionada ha sido publicada por primera vez, resultado de un trabajo intelectual sobre un tema de investigación. Proviene de una fuente directa, sea una persona, institución u otro medio [96], [97].

<sup>[2]</sup> Contribución Secundaria o Terciaria: Las fuentes secundarias son aquellas que poseen información primaria, sintetizada y reorganizada. Permiten conocer hechos a partir de datos recopilados por otros. Mientras que, las fuentes terciarias recopilan y resumen variadas fuentes primarias y secundarias para proveer una mirada general de un determinado tema de investigación [96], [97].

Si la contribución cumple con las 3 características principales especificadas en el árbol de decisión, el documento indudablemente es incluido para su posterior codificación. Al contrario de esto, si el documento solo cumple con una o dos de las tres características del árbol de decisión, el documento deberá ser excluido. En caso existan dudas en la clasificación de algún documento, este puede señalarse como "Poco Claro" y ser analizado posteriormente para definir si se lo incluye o no al grupo de documentos a ser codificados.

En la Tabla 2.2 se muestra la lista de criterios de inclusión-exclusión utilizados para evaluar los documentos. Si el documento cumple con todos los criterios este será incluido, pero si se mantiene algún criterio de exclusión, entonces el documento queda fuera.

Con la lista de los 631 documentos obtenidos en la clasificación de inclusión-exclusión automatizada de la base de datos Scopus, se procede a utilizar la herramienta web gratuita "CADIMA", que permite realizar de forma segura la inclusión-exclusión manual de la documentación y finalmente realizar revisiones sistemáticas, mapas sistemáticos. En esta etapa de filtrado manual mediante esta herramienta CADIMA, se realiza dos fases de selección de los documentos: la fase basada en títulos y resúmenes y la fase basada en texto completo.

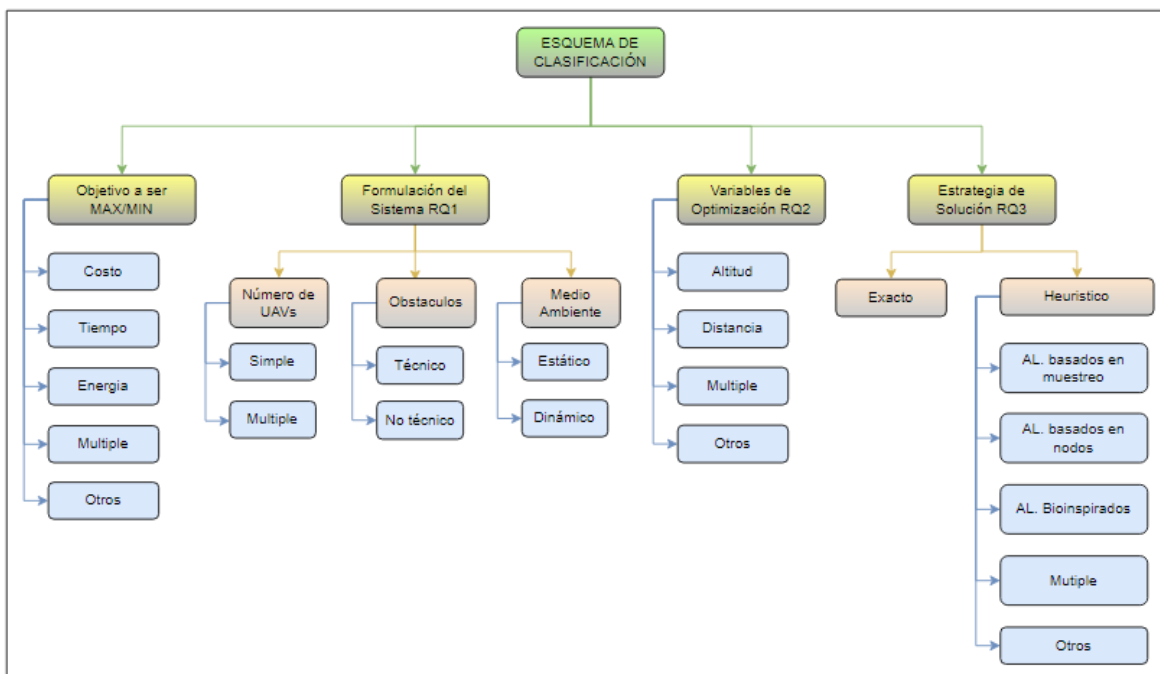
- **Fase de títulos y resúmenes:** Para la selección de los documentos se requiere de la participación del tutor (evaluador), donde el tutor colabora con el análisis y selección mediante los criterios de inclusión-exclusión manual con el 20% de la información cargada en CADIMA. Las divergencias encontradas en la clasificación de artículos son discutidas y resueltas por el tutor y estudiante en reuniones planificadas. Al finalizar esta etapa se cuentan con 104 documentos seleccionados.
- **Fase de texto completo:** En esta segunda fase los evaluadores (tutor y estudiante) leen minuciosamente el texto de los documentos seleccionados en la primera fase. Es decir, se analiza primero el título, luego el resumen, posteriormente las técnicas utilizadas (algoritmos) y finalmente las conclusiones. En esta segunda fase de selección, similar a la primera fase, 21 contribuciones (20%) de las 104 son revisadas por el tutor. Las divergencias encontradas en la clasificación de artículos son discutidas y resueltas por el tutor y estudiante en reuniones planificadas.

Una vez concluido el proceso de inclusión- exclusión manual, finalmente se llega a obtener 37 documentos para el proceso de codificación

### 2.1.3.3 Esquema de clasificación y extracción de datos

El esquema de clasificación es una herramienta que ayuda a extraer de manera organizada la información importante de cada uno de los documentos seleccionados, permitiendo así, contestar a las preguntas de investigación (RQs) planteadas con anterioridad. En este trabajo, una parte del esquema se lo elabora a partir de clasificaciones existentes y descritas en la Sección 1 de este proyecto. Por ejemplo, se tiene diferentes tipos de UAVs para cada aplicación y existen varias técnicas de planificación de rutas en 3D. Estas guías, brinda una reducción del tiempo empleado en la elaboración del esquema, puesto que no es necesario empezarlo desde cero. Posteriormente, este esquema se completa y pule, incluyendo nuevas categorías (por ejemplo, nuevas técnicas de planificación de rutas) o dividiendo categorías en subcategorías (por ejemplo, clasificación y subclasificación de técnicas de planificación de rutas). Todo esto se realiza con el objetivo principal de sacar de los documentos la mayor cantidad de datos posibles que permitan contestar las preguntas de investigación, no excluir información importante para el estudio, y a su vez, tratar de no extraer datos innecesarios que no aporten información relevante.

Para la clasificación se tomar como referencia [1], afin de establecer categorías y permitir la comparabilidad. La Figura 2.5 muestra las dimensiones y los atributos codificados en esta etapa.



**Figura 2.5.** Esquema de Clasificación.

En La Figura 2.5. se presenta la información a ser extraída durante la etapa de codificación de los documentos seleccionados. Se han creado 4 dimensiones principales (recuadros

amarillos), que son las preguntas de investigación planteadas en la etapa de Planificación. A su vez, cada dimensión cuenta con un cierto número de atributos (recuadros celestes), que son aquellos datos que necesitan ser extraídos de cada una de las contribuciones. De un mismo artículo, se pueden extraer uno o varios atributos para una determinada dimensión. A continuación, se describe cada una de estas dimensiones y sus atributos.

**Objetivo a ser maximizado:** Esta dimensión describe el objetivo a maximizar con el fin de obtener la colocación óptima del UAV 3D. Se han considerado las siguientes categorías:

- a. **Costo:** Se refiere al costo asociado a la planificación de la ruta, pudiendo ser el costo de baterías, costos de hardware y software, costos adicionales como cámaras utilizadas para capturar las imágenes, sensores para detectar el entorno, GPS para localizar la posición, costo inicial de fabricación y mantenimiento.
- b. **Tiempo:** Generalmente está asociado a la minimización del tiempo de la ruta del UAV o la minimización del tiempo de transmisión de información para la comunicación del UAV.
- c. **Energía:** Se refiere a la minimización del consumo de energía para completar su misión.
- d. **Múltiple:** Esta categoría considera más de un objetivo (función objetivo) a optimizar.
- e. **Otros:** Este campo incluye atributos adicionales a los mencionados anteriormente.

**Formulación del sistema:** Esta dimensión define el problema específico que se aborda en la planificación de rutas de UAVs en 3D. Está compuesto por el número de UAVs, los obstáculos y medio ambiente.

- a. **Número de UAVs:** Significa el número de UAVs utilizados en la formulación del problema. Puede ser:
  - **Simple:** Significa que solo fue se emplea un UAV.
  - **Múltiple:** Significa que fue emplea más de un UAV
- b. **Obstáculo:** Se considera obstáculo a cualquier cosa que interrumpa el vuelo del UAV, los tipos de obstáculos que se consideran son técnicos y no técnicos.
  - **Técnicos:** Son las restricciones que se desarrollan para completar de manera exitosa y económica una tarea.
  - **No Técnicos:** Pueden ser limitaciones estáticas o dinámicas. Los obstáculos estáticos están formados por edificios, montañas, árboles, etc., lo que el UAV los

reconoce y evitará estos obstáculos llegando a su destino seguro y los obstáculos dinámicos son amenazas inesperadas como por ejemplo un pájaro.

- c. **Medio Ambiente:** En la planificación del camino de los UAV, es importante saber el entorno en el que el UAV tiene que volar. El entorno puede ser estático o dinámico.
- **Estático:** Significa que su entorno no va a cambiar en toda su ruta.
  - **Dinámico:** Significa que su entorno es incierto, va a estar cambiando constantemente

**Variables de optimización:** Son las variables del modelo que se pueden optimizar. Las variables consideradas para la optimización son la altitud y distancia.

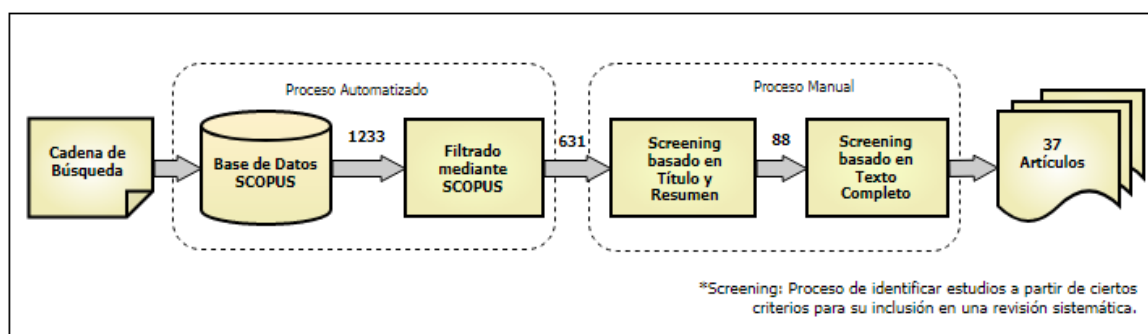
- a. **Altitud:** Es la altura de los UAVs con respecto a la tierra.
- b. **Distancia:** Es la distancia del UAVs que deben recorrer para completar la misión.
- c. **Múltiple:** Significa que puede existir más de una variable a optimizar.
- d. **Otros:** Significa que pueden existir otras variables a optimizar.

**Estrategia de solución:** Cubre todos los aspectos utilizados para la solución del problema. Como estrategias se han considerado algoritmos exactos y heurísticos.

- a. **Algoritmos Exactos:** Los algoritmos exactos son los que garantizan que la solución encontrada es la mejor posible, es decir, la solución óptima, aunque tienen el inconveniente de que invierten mucho tiempo en la ejecución [95].
- b. **Algoritmos Heurísticos:** Los algoritmos heurísticos son técnicas aproximadas capaces de obtener soluciones de buena calidad en un tiempo limitado, pero sin poder certificar que dichas soluciones sean soluciones óptimas. [95].
- **Basados en Muestreo:** Necesitan una representación matemática del espacio de trabajo. Después, estos métodos muestrean nodos o células, generalmente de manera estocástica.
  - **Basados en Nodos:** Definen su espacio de trabajo como un gráfico o una cuadrícula, donde la ruta es definida entre nodos de la cuadrícula.
  - **Bioinspirados:** Presentan la planificación de rutas de los UAVs mediante fenómenos naturales, por lo que no son suficientemente exactos.
  - **Múltiples:** Significa que puede existir más de un algoritmo heurístico.
  - **Otros:** Significa que pueden existir otros algoritmos heurísticos.

## 2.2 REALIZACIÓN

El siguiente paso a desarrollar es la realización del estudio, dando cumplimiento con el segundo y tercer objetivos específicos descritos en este trabajo. La fase de la realización, es el proceso que permite responder a las preguntas de investigación planteadas en la fase del alcance de los antecedentes de estudio. Enfocados en esta tarea se procede a la exploración de los documentos en la base de datos Scopus empleando la cadena de búsqueda definida en la fase anterior de inclusión-exclusión automatizada. Al filtrar la información con los procesos planteados previamente y codificar los documentos resultantes con el esquema de clasificación implementado. Con fecha 29 de julio de 2022, se obtuvo 631 artículos en la fase de inclusión-exclusión automatizada. Aplicando el siguiente filtro que es la fase de inclusión-exclusión manual, se llegó finalmente a seleccionar 37 artículos con los que se desarrolló el estudio en el presente trabajo. En la Figura 2.6 se presenta un esquema del proceso de la selección de los documentos y el filtrado realizado con los criterios de inclusión y exclusión.



**Figura 2.6.** Alcance del estudio, basado en [11].

La lista de los 37 artículos seleccionados se los puede ver en la Tabla 2.3. Para una mejor identificación y comprensión en las tablas se generó un código “A-XX” para cada artículo, donde la letra A corresponde a la inicial de artículo, seguido de un número secuencial; estos artículos no tienen ningún orden en particular. En adelante los artículos estarán identificados con este código, el cual se lo encontrará en cada una de las tablas generadas en el Capítulo 3 referente a resultados del estudio.

**Tabla 2.3.** Listado de artículos analizados.

ID del artículo	Referencia bibliográfica
A-01	[27] Du, N., Y. Zhou, W. Deng, y Q. Luo. «Improved Chimp Optimization Algorithm for Three-Dimensional Path Planning Problem». <i>Multimedia Tools and Applications</i> 81, n.º 19 (2022): 27397-422. <a href="https://doi.org/10.1007/s11042-022-12882-4">https://doi.org/10.1007/s11042-022-12882-4</a> .
A-02	[8] Aiello, G., K.P. Valavanis, y A. Rizzo. «Fixed-Wing UAV Energy Efficient 3D Path Planning in Cluttered Environments». <i>Journal of Intelligent and</i>

	<i>Robotic Systems: Theory and Applications</i> 105, n.º 3 (2022). <a href="https://doi.org/10.1007/s10846-022-01608-1">https://doi.org/10.1007/s10846-022-01608-1</a> .
A-03	[49] Lv, J.-X., L.-J. Yan, S.-C. Chu, Z.-M. Cai, J.-S. Pan, X.-K. He, y J.-K. Xue. «A New Hybrid Algorithm Based on Golden Eagle Optimizer and Grey Wolf Optimizer for 3D Path Planning of Multiple UAVs in Power Inspection». <i>Neural Computing and Applications</i> 34, n.º 14 (2022): 11911-36. <a href="https://doi.org/10.1007/s00521-022-07080-0">https://doi.org/10.1007/s00521-022-07080-0</a> .
A-04	[30] Farid, G., S. Cocuzza, T. Younas, A.A. Razzaqi, W.A. Wattoo, F. Cannella, y H. Mo. «Modified A-Star (A*) Approach to Plan the Motion of a Quadrotor UAV in Three-Dimensional Obstacle-Cluttered Environment». <i>Applied Sciences (Switzerland)</i> 12, n.º 12 (2022). <a href="https://doi.org/10.3390/app12125791">https://doi.org/10.3390/app12125791</a> .
A-05	[91] Zhou, Q., S. Gao, B. Qu, X. Gao, y Y. Zhong. «CROSSOVER RECOMBINATION-BASED GLOBAL-BEST BRAIN STORM OPTIMIZATION ALGORITHM FOR UAV PATH PLANNING». <i>Proceedings of the Romanian Academy Series A - Mathematics Physics Technical Sciences Information Science</i> 23, n.º 2 (2022): 207-16.
A-06	[5] Yuan, Z., Y. Yang, D. Wang, y X. Ma. «Energy-Efficient Trajectory Optimization for UAV-Enabled Cellular Communications Based on Physical-Layer Security». <i>Aerospace</i> 9, n.º 2 (2022). <a href="https://doi.org/10.3390/aerospace9020050">https://doi.org/10.3390/aerospace9020050</a> .
A-07	[43] Jiang, W., Y. Lyu, Y. Li, Y. Guo, y W. Zhang. «UAV Path Planning and Collision Avoidance in 3D Environments Based on POMPD and Improved Grey Wolf Optimizer». <i>Aerospace Science and Technology</i> 121 (2022). <a href="https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107314">https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107314</a> .
A-08	[14] Ahn, H., J. Park, H. Bang, y Y. Kim. «Model Predictive Control-Based Multirotor Three-Dimensional Motion Planning with Point Cloud Obstacle». <i>Journal of Aerospace Information Systems</i> 19, n.º 3 (2022): 179-93. <a href="https://doi.org/10.2514/1.1010956">https://doi.org/10.2514/1.1010956</a> .
A-09	[72] WANG, X., Y. YANG, D. WANG, y Z. ZHANG. «Mission-Oriented Cooperative 3D Path Planning for Modular Solar-Powered Aircraft with Energy Optimization». <i>Chinese Journal of Aeronautics</i> 35, n.º 1 (2022): 98-109. <a href="https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.04.015">https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.04.015</a> .
A-10	[75] Xia, S., y X. Zhang. «Constrained Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle in 3d Terrain Using Modified Multi-Objective Particle Swarm Optimization». <i>Actuators</i> 10, n.º 10 (2021). <a href="https://doi.org/10.3390/act10100255">https://doi.org/10.3390/act10100255</a> .
A-11	[41] Jamshidi, V., V. Nekoukar, y M.H. Refan. «Real Time UAV Path Planning by Parallel Grey Wolf Optimization with Align Coefficient on CAN Bus». <i>Cluster Computing</i> 24, n.º 3 (2021): 2495-2509. <a href="https://doi.org/10.1007/s10586-021-03276-6">https://doi.org/10.1007/s10586-021-03276-6</a> .
A-12	[36] Huang, J., G. Tian, J. Zhang, y Y. Chen. «On Unmanned Aerial Vehicles Light Show Systems: Algorithms, Software and Hardware». <i>Applied Sciences (Switzerland)</i> 11, n.º 16 (2021). <a href="https://doi.org/10.3390/app11167687">https://doi.org/10.3390/app11167687</a> .
A-13	[20] Chen, J., U. Mitra, y D. Gesbert. «3D Urban UAV Relay Placement: Linear Complexity Algorithm and Analysis». <i>IEEE Transactions on Wireless Communications</i> 20, n.º 8 (2021): 5243-57. <a href="https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3066429">https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3066429</a> .
A-14	[22] Chen, Y., W. Li, y R. Qi. «Research and Simulation of UAV Three-Dimensional Path Replanning in Complex Environment». En <i>Proc. IEEE Asia-Pacific Conf. Image Process., Electron. Comput., IPEC</i> , 746-51. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <a href="https://doi.org/10.1109/IPEC51340.2021.9421155">https://doi.org/10.1109/IPEC51340.2021.9421155</a> .



A-15	[13] Ahmed, N., C.J. Pawase, y K. Chang. «Distributed 3-D Path Planning for Multi-UAVs with Full Area Surveillance Based on Particle Swarm Optimization». <i>Applied Sciences (Switzerland)</i> 11, n.o 8 (2021). <a href="https://doi.org/10.3390/app11083417">https://doi.org/10.3390/app11083417</a> .
A-16	[87] Zhang, S., y R. Zhang. «Radio Map-Based 3D Path Planning for Cellular-Connected UAV». <i>IEEE Transactions on Wireless Communications</i> 20, n.º 3 (2021): 1975-89. <a href="https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3037916">https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3037916</a> .
A-17	[55] Ortiz, A., S. Garcia-Nieto, y R. Simarro. «Comparative Study of Optimal Multivariable Lqr and Mpc Controllers for Unmanned Combat Air Systems in Trajectory Tracking». <i>Electronics (Switzerland)</i> 10, n.º 3 (2021): 1-31. <a href="https://doi.org/10.3390/electronics10030331">https://doi.org/10.3390/electronics10030331</a> .
A-18	[76] Xiao, J., H. Sun, X. Chai, B. Qu, P. Wen, Y. Zhou, H. Wang, y D. Wang. «Multi-UAV 3D Path Planning Based on Improved Particle Swarm Optimizer». En <i>Proc. - Int. Conf. Comput., Internet Things Control Eng., CITCE</i> , 144-49. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <a href="https://doi.org/10.1109/CITCE54390.2021.00035">https://doi.org/10.1109/CITCE54390.2021.00035</a> .
A-19	[48] Lindqvist, B., A.-A. Agha-Mohammadi, y G. Nikolakopoulos. «Exploration-RRT: A Multi-Objective Path Planning and Exploration Framework for Unknown and Unstructured Environments». En <i>IEEE Int Conf Intell Rob Syst</i> , 3429-35. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <a href="https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636243">https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636243</a> .
A-20	[20] Kiani, F., A. Seyyedabbasi, R. Aliyev, M.A. Shah, y M.U. Gulle. «3D Path Planning Method for Multi-UAVs Inspired by Grey Wolf Algorithms». <i>Journal of Internet Technology</i> 22, n.º 4 (2021): 743-55. <a href="https://doi.org/10.53106/160792642021072204003">https://doi.org/10.53106/160792642021072204003</a> .
A-21	[33] Guo, J., C. Liang, K. Wang, B. Sang, y Y. Wu. «Three-Dimensional Autonomous Obstacle Avoidance Algorithm for UAV Based on Circular Arc Trajectory». <i>International Journal of Aerospace Engineering</i> 2021 (2021). <a href="https://doi.org/10.1155/2021/8819618">https://doi.org/10.1155/2021/8819618</a> .
A-22	[78] Xue, Z., y X. Liu. «Trajectory Planning of Unmanned Aerial Vehicle Based on the Improved Biogeography-Based Optimization Algorithm». <i>Advances in Mechanical Engineering</i> 13, n.º 3 (2021). <a href="https://doi.org/10.1177/16878140211004295">https://doi.org/10.1177/16878140211004295</a> .
A-23	[10] Abhishek, B., S. Ranjit, T. Shankar, G. Eappen, P. Sivasankar, y A. Rajesh. «Hybrid PSO-HSA and PSO-GA Algorithm for 3D Path Planning in Autonomous UAVs». <i>SN Applied Sciences</i> 2, n.º 11 (2020). <a href="https://doi.org/10.1007/s42452-020-03498-0">https://doi.org/10.1007/s42452-020-03498-0</a> .
A-24	[74] Wu, C., X. Huang, Y. Luo, S. Leng, y F. Wu. «An Improved Sparse Hierarchical Lazy Theta* Algorithm for UAV Real-Time Path Planning in Unknown Three-Dimensional Environment». En <i>Int. Conf. Commun. Technol. Proc. ICCT</i> , 2020-October:673-77. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <a href="https://doi.org/10.1109/ICCT50939.2020.9295690">https://doi.org/10.1109/ICCT50939.2020.9295690</a> .
A-25	[77] Xiong, C., B. Xin, M. Guo, Y. Ding, y H. Zhang. «Multi-UAV 3D Path Planning in Simultaneous Attack». En <i>IEEE Int. Conf. Control Autom., ICCA</i> , 2020-October:500-505. IEEE Computer Society, 2020. <a href="https://doi.org/10.1109/ICCA51439.2020.9264450">https://doi.org/10.1109/ICCA51439.2020.9264450</a> .
A-26	[82] Yang, Q., J. Liu, y L. Li. «Path Planning of UAVs under Dynamic Environment Based on a Hierarchical Recursive Multiagent Genetic Algorithm». En <i>IEEE Congr. Evol. Comput., CEC - Conf. Proc.</i> Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <a href="https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185513">https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185513</a> .
A-27	[57] Park, J.-K., y T.-M. Chung. «Boundary-RRT* * Algorithm for Drone Collision Avoidance and Interleaved Path Re-Planning». <i>Journal of</i>

	<i>Information Processing Systems</i> 16, n.º 6 (2020): 1324-42. <a href="https://doi.org/10.3745/JIPS.04.0196">https://doi.org/10.3745/JIPS.04.0196</a> .
A-28	[73] Wang, X., Y. Yang, D. Wu, Z. Zhang, y X. Ma. «Mission-Oriented 3D Path Planning for High-Altitude Long-Endurance Solar-Powered UAVs with Optimal Energy Management». <i>IEEE Access</i> , 2020. <a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045934">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045934</a> .
A-29	[70] Teng, H., I. Ahmad, A. Msm, y K. Chang. «3D Optimal Surveillance Trajectory Planning for Multiple UAVs by Using Particle Swarm Optimization with Surveillance Area Priority». <i>IEEE Access</i> 8 (2020): 86316-27. <a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992217">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992217</a> .
A-30	[64] Samaniego, F., J. Sanchis, S. Garcia-Nieto, y R. Simarro. «Smooth 3d Path Planning by Means of Multiobjective Optimization for Fixed-Wing UAVs». <i>Electronics (Switzerland)</i> 9, n.º 1 (2020). <a href="https://doi.org/10.3390/electronics9010051">https://doi.org/10.3390/electronics9010051</a> .
A-31	[54] Natalizio, E., L. Di Puglia Pugliese, N.R. Zema, y F. Guerriero. «Download and Fly: An Online Solution for the UAV 3D Trajectory Planning Problem in Smart Cities». En <i>DIVANet - Proc. ACM Symp. Des. Anal. Intell. Veh. Networks Appl.</i> , 49-56. Association for Computing Machinery, 2019. <a href="https://doi.org/10.1145/3345838.3356012">https://doi.org/10.1145/3345838.3356012</a> .
A-32	[60] Qin, Z., C. Dong, H. Wang, A. Li, H. Dai, W. Sun, y Z. Xu. «Trajectory Planning for Data Collection of Energy-Constrained Heterogeneous UAVs». <i>Sensors (Switzerland)</i> 19, n.º 22 (2019). <a href="https://doi.org/10.3390/s19224884">https://doi.org/10.3390/s19224884</a> .
A-33	[26] Dewangan, R.K., A. Shukla, y W.W. Godfrey. «Three Dimensional Path Planning Using Grey Wolf Optimizer for UAVs». <i>Applied Intelligence</i> 49, n.º 6 (2019): 2201-17. <a href="https://doi.org/10.1007/s10489-018-1384-y">https://doi.org/10.1007/s10489-018-1384-y</a> .
A-34	[95] Wang, H., Z. Sun, D. Li, y Q. Jin. «An Improved RRT Based 3-D Path Planning Algorithm for UAV». En <i>Proc. Chin. Control Decis. Conf., CCDC</i> , 5514-19. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. <a href="https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8832661">https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8832661</a> .
A-35	[24] D'Amato, E., I. Notaro, L. Blasi, y M. Mattei. «Smooth Path Planning for Fixed-Wing Aircraft in 3D Environment Using a Layered Essential Visibility Graph». En <i>Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS</i> , 9-18. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. <a href="https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8797929">https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8797929</a> .
A-36	[69] Taoudi, A., y C. Luo. «Obstacle Avoidance for a Quadrotor Using A* Path Planning and Lqr-Based Trajectory Tracking». En <i>AIAA Scitech Forum</i> . American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2019. <a href="https://doi.org/10.2514/6.2019-1566">https://doi.org/10.2514/6.2019-1566</a> .
A-37	[17] Bahabry, A., X. Wan, H. Ghazzai, H. Menouar, G. Vesonder, y Y. Massoud. «Low-Altitude Navigation for Multi-Rotor Drones in Urban Areas». <i>IEEE Access</i> 7 (2019): 87716-31. <a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925531">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925531</a> .

De los 37 documentos seleccionados, se extrae toda la información relevante que permita la clasificación de las técnicas empleadas para resolver el problema de la planificación de rutas 3D libre de colisiones y en el menor tiempo posible, así como la asignación del nivel de madurez de la investigación realizada.

Una vez concluida la extracción de datos de los documentos seleccionados. Esta información se almacena en la plataforma de CADIMA y para poder visualizar la

información recolectada, es necesario descargar el archivo en formato de una hoja de cálculo Excel, desde el sitio web de la aplicación en la sección extracción de datos. Este archivo se lo podrá visualizar en el repositorio del ANEXO III. En la Figura 2.7 se presenta un ejemplo del proceso de extracción de datos realizado a un artículo en la aplicación CADIMA, luego de haber leído su contenido.

The screenshot shows the CADIMA application interface. The top navigation bar includes 'Services', 'Related Projects', the user email 'marco.vinicio110@gmail.com', and links for 'Help', 'About', and 'Access CADIMA'. The main content area is divided into a sidebar and a main form.

**Sidebar (Left):**

- Article ID: 15, Study ID: 1
- Fulltext: Show PDF
- Title: A new hybrid algorithm based on golden eagle optimizer and grey wolf optimizer for 3D path planning of multiple UAVs in power inspection 2022
- Show author list
- Data Location: Scopus
- Study Name: 3D Path Planning UAV
- Comments: realizado
- Data completed:
- Buttons: Save, Back to list

**Main Form (Right):**

Objetivo_a_ser_maximizado: Multiple	Objetivo_a_ser_maximizado_Multiple: optimizar costos de tiempo, altura y energia	Objetivo_a_ser_maximizado_comentario: [Empty]
FS_Numero_de_UAVs: Multiple	FS_Numero_de_UAVs_comentario: [Empty]	FS_Obstaculos: No_tecnico
FS_Obstaculos_comentario: obstaculos estaticos como edificios	FS_Medio_Ambiente: Estatico	FS_Medio_Ambiente_comentario: el entorno no cambia
Variables_de_Optimizacion: Multiple	Variables_de_Optimizacion_Multiple: distancia y altitud	Variables_de_Optimizacion_comentario: [Empty]
ES_Exacto: NO	ES_Exacto_comentario: [Empty]	ES_Heuristico: Multiple
ES_Heuristico_Multiple: algoritmo HGEOGWO (optimizador de águila real y el optimizador de lobo gris)	ES_Heuristico_comentario: [Empty]	

**Figura 2.7.** Sección de extracción de datos de un artículo en CADIMA.

## 2.3 PRESENTACIÓN

Esta etapa de presentación permite cumplir con cuarto objetivo específico. Es decir, clasificar la información obtenida de acuerdo con los estudios relacionados con la planificación de rutas de UAVs en 3D y desempeño de las técnicas de planificación de ruta empleadas para su solución.

En esta sección, se dan a conocer las respuestas a las tres preguntas de investigación planteadas anteriormente: (1) planificación de rutas de los UAVs en 3D (2) métodos óptimos para la planificación de ruta en los UAVs en 3D y (3) métodos aproximados para la planificación de ruta en los UAVs en 3D. Toda esta información, es presentada en tablas y en forma gráfica para que pueda ser entendida de manera clara y sencilla, con su respectiva descripción de resultados. Adicionalmente, se realiza una discusión acerca de los datos más relevantes que se han obtenido luego del proceso de codificación de los documentos objeto del estudio. Que tan prometedora es esta área de investigación, que temáticas son aquellas con mayor y menor interés de estudio y las brechas que aún se encuentran dentro de este campo de investigación, son algunos de los datos de mayor importancia que se han detectado durante este proyecto. Esta etapa forma parte de la Sección 3 del presente Trabajo de Integración Curricular

## 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 3.1 RESULTADOS

Una vez finalizado el proceso de codificación y análisis de los 37 artículos científicos seleccionados, a continuación, se procede a responder las 3 preguntas de investigación planteadas en la Sección 2 del presente trabajo de integración curricular.

#### 3.1.1 RQ1 - ¿EXISTE PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE LOS UAVS EN 3D?

RQ1 busca proporcionar información de los objetivos a maximizar, como son el tiempo de finalización de la misión mínimo para que el UAV consuma menos energía y su costo total de la planificación de la ruta 3D también sea minimizado. Una ruta de UAV en 3D óptima o factible debe ser rentable, eficiente en tiempo y energía, para ello también se debe considerar la formulación del sistema en la planificación de rutas, donde se debe conocer ciertos factores para la finalización exitosa de la misión. El UAV debe conocer el medio ambiente donde va a volar, las dimensiones del área, el número de UAVs utilizados para completar la misión y estar preparado para los obstáculos que se le presentes durante el vuelo. Estos aspectos son importantes en la planificación de una ruta 3D del UAV.

En la Tabla 3.1.1 se puede observar que en los documentos revisados los investigadores se enfocan en minimizar el costo (33.3 %), energía (20.37 %) y el tiempo (20.37 %). 18 de los 37 artículos se tiene como prioridad minimizar el costo, entre estos comprendían el costo computacional, costo de amenazas, costo de software y hardware, etc.

**Tabla 3.1.1.** Muestra la cantidad de objetivos maximizados en los artículos.

OBJETIVOS MIN/MAX	TOTAL
Aptitud	1
Colisiones	5
Costo	18
Datos	2
Energía	11
Modelo ambiental	1
Radios de giro	1
Restricciones	2
Riesgos de vuelo	1
Tiempo	11
Vigilancia	1

En el ANEXO I se presenta una tabla con mayor detalle de los objetivos maximizados que los investigadores consideraron en sus investigaciones, ahí se puede ver que de los 37 documentos analizados, 37.84 % (14) artículos tienen más de un objetivo a maximizar, como por ejemplo en la contribución A-18 la investigación se basa en múltiples objetivos a maximizar, que son costo de coordinación (donde se considera la distancia mínima de seguridad y distancia máxima de comunicación entre UAVs), modelo ambiental (la topografía del terreno es modela) y restricciones de altitud del vuelo donde pueda mantenerse seguro. De igual forma en los artículos A-29 y A-37 se tienen 3 objetivos a maximizar. En los artículos A-03, A-04, A-05, A-10. A-15, A-20, A-23, A25, A-31, A-32 y A-33 se tiene dos objetivos a maximizar. El resto de los artículos solo tienen un objetivo a maximizar.

En la Figura 3.1.1 se tiene una gráfica de los objetivos a maximizar vs el número de artículos analizados, si sumamos el número de artículos por cada objetivo, veremos que sobrepasa el valor de contribuciones, cabe destacar que, aunque se ha trabajado con 37 artículos científicos, más de uno de ellos, han considerado varios objetivos dentro de una misma investigación.



**Figura 3.1.1.** Muestra los objetivos vs los artículos investigados.

### 3.1.1.1 Aspectos de la implementación de la planificación de rutas

Para que el UVA realice un vuelo exitoso, se deben tener en cuenta diferentes aspectos en la planificación de la ruta del UAV. A continuación, se presentan estos aspectos.

Uno de los aspectos que los investigadores tienen en cuenta para la planificación de ruta es el número de UAVs, en la Tabla 3.1.2 se puede observar dos grupos de UAVs, los simples como su nombre lo indica es que solo se ha usado un UAV para la planificación de ruta de estas contribuciones, y los UAVs múltiples es donde se ha requerido más de uno para desarrollar la misión de la investigación. Casi la mitad (17 artículos) de las contribuciones han considerado un solo UAV para demostrar las técnicas de planificación de rutas.

**Tabla 3.1.2.** Número de UAVs usados para la formulación del problema.

UAVs	TOTAL
Múltiple	17
Simple	20

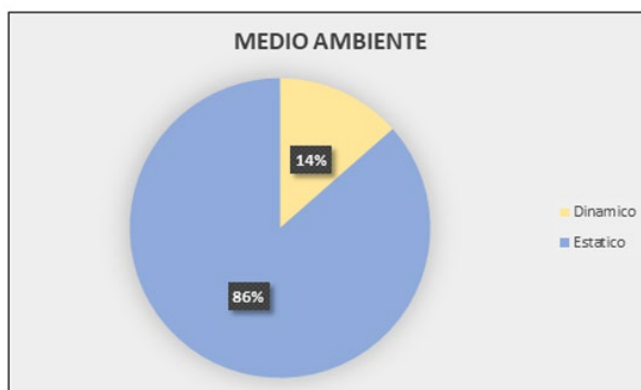
Otro de los aspectos importantes son los obstáculos que los UAVs deben evitar. En la Tabla 3.1.3 se observa que la mayoría de las contribuciones no consideran obstáculos o solo se enfocan en los obstáculos conocidos como son edificios o árboles, es así que el 78,38 % (29 artículos) de las contribuciones realizaron sus investigaciones con obstáculos no técnicos estáticos y apenas el 5,41 % de las contribuciones los investigadores consideran los obstáculos técnicos, por ejemplo el artículo A-12 desarrollo técnicas de planificación de rutas para espectáculos de luces con UAVs, para lo cual requerían de potentes unidades de computación y sensores a bordo, que son extremadamente costosos para un grupo de UAV a gran escala, convirtiéndose en un obstáculo técnico para esta investigación.

**Tabla 3.1.3.** Tipos de obstáculos que los investigadores consideran para la planificación de la ruta 3D.

OBSTACULOS	TIPOS	TOTAL
No Técnicos	Dinámicos	6
	Estáticos	29
Técnicos	Económicos	2

Uno de los aspectos más importantes y que pocos investigadores han considerado es el medio ambiente como es el viento, nieve o lluvia que pueden afectar el vuelo de los UAVs haciendo que cambie su ruta planificada e incluso que fracasen la misión. En la contribución A-14 los investigadores realizan la planificación de rutas 3D basada en mapas de radio para UAVs conectados a celulares, aquí los UAVs se conectan a las BS para actualizar su información de vuelo y replanificar su ruta mediante algoritmos basados en control predictivo.

En la Figura 3.1.2 se puede apreciar que solo un 14 % (A-02, A-14, A-15, A-26 y A-29) de las contribuciones, los investigadores consideraron un entorno hostil e incierto.



**Figura 3.1.2.** Entornos estáticos o dinámicos que han sido considerados en la planificación de las rutas.

### 3.1.2 RQ2 - ¿EXISTEN MÉTODOS ÓPTIMOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE RUTA EN LOS UAVS EN 3D?

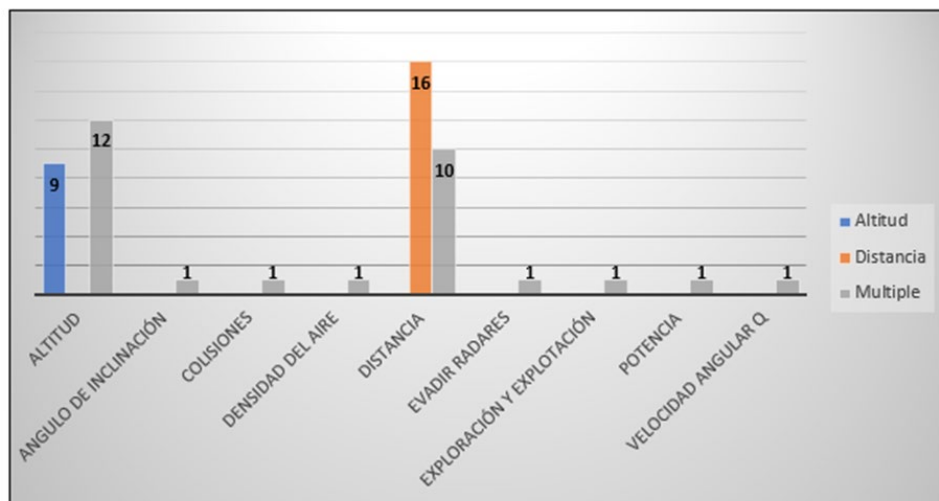
RQ2 busca proporcionar datos sobre las diferentes variables optimizadas por los investigadores para la planificación de rutas en los UAVs en 3D. En la tabla 3.2.1 podemos ver las variables que los investigadores han considerado optimizar aplicando las diferentes técnicas de planificación de rutas. Entre estas tenemos la altitud de vuelo de los UAVs, el ángulo de inclinación del UAV para elevarse, evasión de colisiones de los UAVs, densidad del aire donde van a volar los UAVs, distancia entre el punto de partida del UAV y su objetivo, evasión de radares en lugares restringidos, exploración y explotación de las mejores rutas, potencia de los UAVs para cumplir con la misión, velocidad angular Q constante para alargar la duración de su energía.

**Tabla 3.2.1.** Variables que los investigadores optimizaron en sus investigaciones.

VARIABLES OPTIMIZADAS	TOTAL
Altitud	21
Angulo de inclinación	1
Colisiones	1
Densidad del aire	1
Distancia	26
Evadir radares	1
Exploración y explotación	1
Potencia	1
Velocidad angular Q	1

La distancia y la altitud son las variables que más fueron consideradas por los investigadores, debido a la complejidad en la planificación de ruta en 3D, hace que la altitud este cambiando constantemente, lo que ocasiona que el UAV tenga que estar cambiando su velocidad y dirección frecuentemente.

En la tabla del ANEXO II, se puede observar con mayor detalle que de las 37 contribuciones analizadas en este trabajo, el 32.43 % (12) de los artículos tiene múltiples variables a optimizar, como por ejemplo tenemos que en el artículo A-11 los investigadores optimizan la altitud, colisiones, distancia, evasión de radares y potencia. En el artículo A-17 los investigadores optimizan la altitud y el ángulo de inclinación para la elevación del UAV. En los artículos A-02, A-03, A-05, A-07, A-08, A-16, A-18, A-25 y A-26 se tiene dos variables a optimizar de las cuales la altitud de vuelo del UAV es la dominante. El resto de artículos solo tienen una variable a optimizar.



**Figura 3.2.1.** Las variables múltiples optimizadas se las observa en color plomo y las variables predominantes en azul y naranja.

La Figura 3.2.1 muestra el número de artículos vs las variables a optimizar, donde las barras de color plomo indican el número de artículos que han trabajado con múltiples variables, por ejemplo: la altitud tiene 12 artículos que conjuntamente tienen otras variables a optimizar y en con una barra azul la altitud tiene 9 artículos donde es la única variable a optimizar. Para el caso de la variable distancia se tiene 10 artículos que tienen conjuntamente otras variables a optimizar y en la barra naranja la distancia tiene 16 artículos donde es la única variable a ser optimizada. Para las otras variables de la gráfica han sido optimizadas en un solo artículo y todas están conjuntamente con otra variable a optimizar.



### 3.1.3 RQ3 - ¿EXISTEN MÉTODOS APROXIMADOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE RUTA EN LOS UAVS EN 3D?

RQ3 busca proporcionar información sobre los métodos aproximados que han sido abordados mayoritariamente para la planificación de ruta en los UAVs en 3D. Para dar una respuesta a esta pregunta se presenta a continuación los resultados obtenidos en esta investigación.

En la Tabla 3.3.1 se presenta la clasificación de los algoritmos, aquí se puede apreciar que 29 de las 37 contribuciones analizadas, los investigadores emplean el método de los algoritmos bioinspirados, como por ejemplo el algoritmo de enjambre de partículas (PSO), que se inspira en el comportamiento de la bandada de aves. Sin embargo, los investigadores señalan que el uso de este algoritmo para una solución óptima global puede tardar mucho tiempo (A-14).

**Tabla 3.3.1.** Tipos de algoritmos heurísticos utilizados en la planificación de rutas.

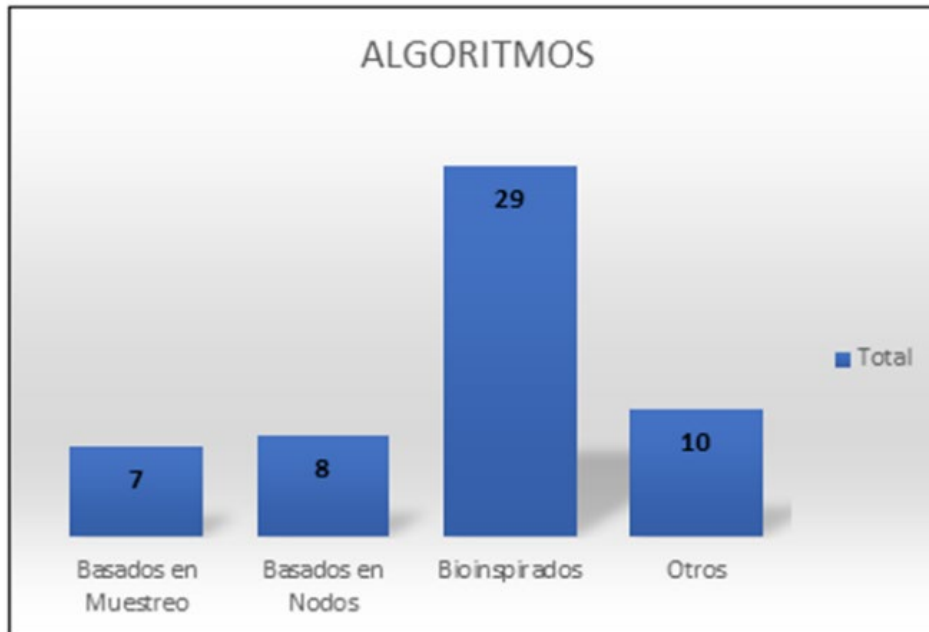
CLASES DE ALGORITMOS	TOTAL
Basados en Muestreo	7
Basados en Nodos	8
Bioinspirados	29
Otros	10

El 18.9 % (A-17, A-19, A-24, A-27, A-30, A-31 y A-34) de los artículos analizados emplean métodos basados en muestreo. La exploración y planificación de rutas de objetivos múltiples para entornos desconocidos y no estructurados se desarrolla con el algoritmo de árbol aleatorio de exploración rápida (RRT), el cual ha sido diseñado específicamente para su utilización en misiones de exploración 3D (A-19).

El método basado en nodos es utilizado por el 21.62 % de las contribuciones (A-01, A-04, A-16, A-17, A-22, A-34, A-35 y A-36) y uno de los algoritmos implementados es el método gráfico de visibilidad esencial en capas (LEVG) para la planificación de ruta suave para UAVs de ala fija en entornos 3D, a través de un algoritmo de ramificación eficiente para reducir el tiempo computacional (A-35).

Al existir una infinidad de algoritmos para la planificación de rutas de UAVs, en este trabajo se encontraron 10 contribuciones de los 37 artículos, que utilizan métodos diferentes, como es el algoritmo de control predictivo de modelo convexo (MPC) en la planificación de rutas 3D multirrotor, basado en control predictivo de modelo con obstáculo de nube de puntos (A-08).

En la Figura 3.3.1 se observa el número de artículos que cada método a implementado en su investigación. Ojo que la suma de todos estos números supera los 37 artículos, debido a que en algunas de las investigaciones se combinan los algoritmos para mejorar la planificación de las rutas.



**Figura 3.3.1.** Número de artículos vs tipos de métodos heurísticos empleados para la planificación de rutas de los UAVs.

Los nombres de los diferentes algoritmos utilizados por los investigadores los podemos encontrar en la tabla 3.3.2, en esta tabla podemos encontrar a que método pertenece cada algoritmo, así como los cambios de nombres de los algoritmos según se hayan realizados mejoras en las técnicas implementadas en cada uno de estos algoritmos.

**Tabla 3.3.2.** Nombres de los algoritmos heurísticos usados por los investigadores en la planificación de rutas 3D.

NOMBRE DEL ALGORITMO	CLASIFICACIÓN DE ALGRITMOS			
	Basados en Muestreo	Basados en Nodos	Bioinspirados	Otros
Optimizador incremental del lobo gris (I-GWO)			✓	
Algoritmo A*		✓		
Algoritmo adaptativo lazy theta*	✓			
Algoritmo árbol aleatorio de exploración rápida estrella boundary (boundary-RRT*)	✓			
Algoritmo Árboles Aleatorios de Exploración Rápida (ERRT)	✓			
Algoritmo Control predictivo de modelo (MPC)	✓			
Algoritmo de Bresenham				✓

Algoritmo de búsqueda A* modificado		✓		
Algoritmo de Campo de Potencial Artificial (APF)		✓		
Algoritmo de colonia de hormigas			✓	
Algoritmo de colonia de hormigas mejorado			✓	
Algoritmo de configuración de nodos de colisión.		✓		
Algoritmo de control de velocidad	✓			
Algoritmo de control predictivo de modelo convexo (MPC)				✓
Algoritmo de Dijkstra		✓		
Algoritmo de evitación geométrica de trayectoria de arco circular (CTGA).			✓	
Algoritmo de planificación de ruta con un operador de perturbación adaptativo			✓	
Algoritmo de planificación de trayectoria de UAV heterogéneo con energía limitada múltiple			✓	
Algoritmo de planificación de trayectorias basado en el algoritmo de biogeografía (BBO)			✓	
Algoritmo de RRT mejorado	✓			
Algoritmo de selección de cabezas de clúster y planificación de trayectorias				✓
Algoritmo de transformación de formación dinámica			✓	
Algoritmo genético multiagente recursivo jerárquico HR-MAGA			✓	
Algoritmo gráfico de visibilidad esencial en capas (LEVG)		✓		
Algoritmo Iterativo de Flota Ordenada (OFIA)			✓	
Algoritmo iterativo paso adelante (SFIA)			✓	
Algoritmo Regulador cuadrático lineal (LQR)		✓		
Algoritmo theta perezoso jerárquico disperso mejorado (SHLT*)			✓	
Algoritmos basados en mapas de radio				✓
Algoritmos de bloqueo de grano fino			✓	
Coeficiente de alineación en el bus CAN				✓
Creación de corredores de vuelo por partes (PFC)				✓
Distribución gaussiana y Técnica Q-Learning				✓
Eficiencia Energética A* (EEA*)			✓	
El método pseudoespectral (GPM)				✓
Método de cuadrícula		✓		
Optimizador de águila real			✓	
Optimizador de Eficiencia Energética			✓	
Optimizador de enjambre de partículas (PSO)			✓	
Optimizador de enjambre de partículas (PSO) con algoritmo de búsqueda de armonía (HSA) PSO-HSA			✓	

Optimizador de enjambre de partículas (PSO) con algoritmo genético (GA) PSO-GA			✓	
Optimizador de enjambre de partículas mejorado llamado HACLDMS			✓	
Optimizador de enjambre de partículas multiobjetivo			✓	
Optimizador de lobo gris (GWO)			✓	
Optimizador de lobo gris mejorado (GWO)			✓	
Optimizador de tormenta de ideas global basado en la recombinación cruzada (GBSO-CR)			✓	
Optimizador del lobo gris expandido (Ex-GWO)			✓	
Problema de optimización multiobjetivo (MOP)	✓			
Proceso de decisión de Markov parcialmente observable (POMDP)				✓

Al final de este estudio sistemático realizado se califica la madurez de las técnicas de planificación de ruta, donde se ha utilizado los tipos de investigación presentados en el Capítulo 2, que establecen a cada artículo un nivel de madurez que va desde un nivel mínimo, cuando un artículo se basa únicamente en opiniones (artículos de experiencia, artículos de opinión y propuestas de solución), hasta un nivel máximo, cuando un artículo ha sido evaluado empíricamente en escenarios reales (investigaciones de validación e investigaciones de evaluación). Los resultados que permiten dar respuesta a este objetivo son discutidos a continuación mediante la Tabla 3.3.3, donde se tiene la madurez de los objetivos maximizados en costo, tiempo y energía, fue desarrollado el problema con uno o varios UAVs dependiendo de la complejidad de la investigación, obstáculos no técnicos estáticos considerados en la investigación, si fue o no considerado el medio ambiente en el desarrollo de la investigación, que variables fueron optimizadas, la madurez de los métodos, que en este caso fueron todos heurísticos.

**Tabla 3.3.3.** Tabla final del estudio sistemático realizado con los 37 artículos.

ID	OBJETIVO MAX/MIN	UAVs	OBSTACULOS	MEDIO AMBIENTE	VARIABLES DE OPTIMIZACION	CLASE DE ALGORITMO	ALGORITMO
A-01	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Método de cuadrícula
A-02	Energía	Múltiple	No Técnicos	Dinámico	Altitud	Heurístico	Eficiencia Energética A* (EEA*)
					Densidad del aire	Heurístico	
A-03	Costo	Múltiple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Optimizador de águila real
	Energía				Altitud		Optimizador de lobo gris (GWO)
A-04	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo de búsqueda A* modificado
	Tiempo						
A-05	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Optimizador de tormenta de ideas global basado en la recombinación cruzada (GBSO-CR)
	Tiempo				Distancia		
A-06	Energía	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Optimizador de Eficiencia Energética
A-07	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Optimizador de lobo gris mejorado (GWO)
					Distancia		Proceso de decisión de Markov parcialmente observable (POMDP)
A-08	Tiempo	Múltiple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmo de control predictivo de modelo convexo (MPC)
					Distancia		Creación de corredores de vuelo por partes (PFC)

<b>A-09</b>	Energía	Múltiple	Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmo de colonia de hormigas mejorado
<b>A-10</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Optimizador de enjambre de partículas multiobjetivo
	Restricciones				Distancia		Distribución gaussiana y Técnica Q-Learning
<b>A-11</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Optimizador de lobo gris (GWO)
					Distancia		Coeficiente de alineación en el bus CAN
					Evitar radares		
					Potencia		
					Colisiones		
<b>A-12</b>	Colisiones	Múltiple	Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo de transformación de formación dinámica
<b>A-13</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmo de bloqueo de grano fino
<b>A-14</b>	Tiempo	Simple	No Técnicos	Dinámico	Altitud	Heurístico	Algoritmo de control predictivo de modelo convexo (MPC)
							Optimizador de enjambre de partículas (PSO)
<b>A-15</b>	Costo	Múltiple	No Técnicos	Dinámico	Altitud	Heurístico	Optimizador de enjambre de partículas (PSO)
							Aptitud
<b>A-16</b>	Tiempo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmos basados en mapas de radio
					Distancia		Algoritmo de Dijkstra

<b>A-17</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmo Regulador cuadrático lineal (LQR)
					Angulo de inclinación Velocidad angular Q		Algoritmo Control predictivo de modelo (MPC)
<b>A-18</b>	Costo	Múltiple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Optimizador de enjambre de partículas mejorado llamado HACLDMS
	Modelo ambiental Restricción				Distancia		
<b>A-19</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo Árboles Aleatorios de Exploración Rápida (ERRT)
<b>A-20</b>	Costo	Múltiple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Optimizador incremental de lobo gris (I-GWO)
	Tiempo						Optimizador de lobo gris expandido (Ex-GWO)
<b>A-21</b>	Colisiones	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo de evitación geométrica de trayectoria de arco circular (CTGA)
<b>A-22</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo de configuración de nodos de colisión
							Algoritmo de planificación de trayectorias basado en el algoritmo de biogeografía (BBO)
<b>A-23</b>	Tiempo	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Optimizador de enjambre de partículas (PSO) con algoritmo de búsqueda de armonía (HSA) PSO-HSA

	Energía						Optimizador de enjambre de partículas (PSO) con algoritmo genético (GA) PSO-GA
<b>A-24</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo theta perezoso jerárquico disperso mejorado (SHLT*)
							Algoritmo adaptativo lazy theta*
<b>A-25</b>	Tiempo Energía	Múltiple	No Técnicos	Estático	Altitud Distancia	Heurístico	Algoritmo de planificación de ruta con un operador de perturbación adaptativo
<b>A-26</b>	Tiempo	Múltiple	No Técnicos	Dinámico	Altitud Distancia	Heurístico	Algoritmo genético multiagente recursivo jerárquico HR-MAGA
<b>A-27</b>	Colisiones	Múltiple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo árbol aleatorio de exploración rápida estrella boundary (boundary-RRT*)
<b>A-28</b>	Energía	Simple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Método pseudoespectral (GPM)
							Algoritmo de colonia de hormigas
<b>A-29</b>	Energía Vigilancia Riesgos de vuelo	Múltiple	No Técnicos	Dinámico	Distancia	Heurístico	Optimizador de enjambre de partículas (PSO)
<b>A-30</b>	Radios de giro	Múltiple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Problema de optimización multiobjetivo (MOP)
<b>A-31</b>	Energía Datos	Múltiple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmo de control de velocidad
<b>A-32</b>	Energía	Múltiple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmo de selección de cabezas de clúster y planificación de trayectorias



	Datos						Algoritmo de planificación de trayectoria de UAV heterogéneo con energía limitada múltiple
<b>A-33</b>	Costo Tiempo	Múltiple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Optimizador de lobo gris (GWO)
<b>A-34</b>	Colisiones	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo de RRT mejorado Algoritmo de Campo de Potencial Artificial (APF)
<b>A-35</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo gráfico de visibilidad esencial en capas (LEVG)
<b>A-36</b>	Costo	Simple	No Técnicos	Estático	Distancia	Heurístico	Algoritmo A*
<b>A-37</b>	Tiempo Energía Colisiones	Múltiple	No Técnicos	Estático	Altitud	Heurístico	Algoritmo Iterativo de Flota Ordenada (OFIA) Algoritmo iterativo paso adelante (SFIA)

## **3.2 CONCLUSIONES**

El presente trabajo de integración curricular realizó el estudio sistemático de 37 artículos de 631 publicaciones obtenidas mediante la base de datos Scopus, con el propósito de encontrar información y cumplir con los objetivos planteados en este trabajo, así como responder las preguntas de investigación elaboradas previo al desarrollo del trabajo. Una vez finalizado el trabajo se concluye que el resultado del mapeo sistemático es la planificación de las rutas de los UAVs en 3D mediante técnicas de optimización.

Se pudo identificar que los artículos estudiados emplean únicamente métodos aproximados (algoritmos heurísticos) para la planificación de rutas en 3D, esto debido a la complejidad de las soluciones que se generan con los métodos exactos, además de que, estos métodos exactos requieren mayores cálculos, demandando mayor tiempo y costo computacional. De estos métodos heurísticos que los investigadores implementaron, la mitad corresponde a algoritmos bioinspirados y su técnica está basada en fenómenos naturales.

Se concluye que se ha destinado mayores esfuerzos de investigación a los métodos aproximados para la planificación de rutas de UAVs en 3D, debido a que son superiores en la resolución de problemas complejos de optimización, así como para mejorar la eficiencia de la ruta desde el inicio hasta su destino. Por esa razón, en los últimos años, los algoritmos heurísticos, especialmente los bioinspirados, se han aplicado con éxito para optimizar la planificación de ruta de los UAVs.

## **3.3 RECOMENDACIONES**

Para realizar un trabajo ordenado y completo se debe cumplir con todos los pasos planteados en el desarrollo del estudio sistemático, Iniciando por la búsqueda de la información a investigar, que debe abarcar los objetivos planteados en el trabajo, durante la etapa de selección, clasificación y extracción de la información de los documentos, se recomienda usar la base de datos Scopus, que indexa a otras bases de datos y es la más completa, así como la plataforma gratuita CADIMA que facilita el desarrollo del estudio, permitiendo disminuir tiempo en el procesamiento de la información y obtener los datos ordenados.

Debido a la gran cantidad de información que se maneja en la investigación, se sugiere incluir tablas y graficas de comparación tanto de los objetivos a maximizar, las variables a optimizar y los métodos implementados como estrategias de solución, de manera que se permita visualizar y comprender los resultados obtenidos en el estudio realizado.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Shahid, N., M. Abrar, U. Ajmal, R. Masroor, S. Amjad, y M. Jeelani. «Path Planning in Unmanned Aerial Vehicles: An Optimistic Overview». *International Journal of Communication Systems* 35, n.º 6 (2022). <https://doi.org/10.1002/dac.5090>.
- [2] Elmokadem, T., y A.V. Savkin. «Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey». *Sensors* 21, n.º 18 (2021). <https://doi.org/10.3390/s21186223>.
- [3] Yu, Z., F. Sun, X. Lu, y Y. Song. «Overview of Research on 3D Path Planning Methods for Rotor UAV». En *Proc. - Int. Conf. Electron., Circuits Inf. Eng., ECIE*, 368-71. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ECIE52353.2021.00081>.
- [4] Musaab Jasim, Hayder Khaleel Al-Qaysi, Yousif Allbadi. «Comprehensive Study On Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)». *Advanced Mathematical Models & Applications*, Vol.5, No.2, 2020, pp.240-259. <https://www.researchgate.net/publication/344158369>
- [5] Yuan, Z., Y. Yang, D. Wang, y X. Ma. «Energy-Efficient Trajectory Optimization for UAV-Enabled Cellular Communications Based on Physical-Layer Security». *Aerospace* 9, n.º 2 (2022). <https://doi.org/10.3390/aerospace9020050>.
- [6] Aggarwal, S., y N. Kumar. «Path Planning Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: A Review, Solutions, and Challenges». *Computer Communications* 149 (2020): 270-99. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>.
- [7] Flores-Caballero, G., A. Rodríguez-Molina, M. Aldape-Pérez, y M.G. Villarreal-Cervantes. «Optimized Path-Planning in Continuous Spaces for Unmanned Aerial Vehicles Using Meta-Heuristics». *IEEE Access* 8 (2020): 176774-88. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3026666>.
- [8] Aiello, G., K.P. Valavanis, y A. Rizzo. «Fixed-Wing UAV Energy Efficient 3D Path Planning in Cluttered Environments». *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 105, n.º 3 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01608-1>.
- [9] Vashisth, A., R. Singh Batth, y R. Ward. «Existing Path Planning Techniques in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Systematic Review». En *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Knowl. Econ., ICCIKE*, editado por Naranje V., Singh B., y Velan S., 366-72. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICCIKE51210.2021.9410787>.
- [10] Abhishek, B., S. Ranjit, T. Shankar, G. Eappen, P. Sivasankar, y A. Rajesh. «Hybrid PSO-HSA and PSO-GA Algorithm for 3D Path Planning in Autonomous UAVs». *SN Applied Sciences* 2, n.º 11 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03498-0>.

- [11] Del Alamo, J.M., D.S. Guaman, B. García, y A. Diez. «A Systematic Mapping Study on Automated Analysis of Privacy Policies». *Computing* 104, n.o 9 (2022): 2053-76. <https://doi.org/10.1007/s00607-022-01076-3>.
- [12] Acosta, J.F., V.H. Andaluz, M.X. Naranjo, J.I. Molina, A.G. Santana, A.O. Topa, y G. Erazo. «3-D Path Planning Using Subatomic Particles and Feynman Diagrams». En *Proc. World Conf. Smart Trends in Syst., Secur. Sustain., WorldS4*, editado por Yang X.-S., Dey N., y Joshi A., 368-75. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. <https://doi.org/10.1109/WorldS4.2019.8903957>.
- [13] Ahmed, N., C.J. Pawase, y K. Chang. «Distributed 3-D Path Planning for Multi-UAVs with Full Area Surveillance Based on Particle Swarm Optimization». *Applied Sciences (Switzerland)* 11, n.º 8 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11083417>.
- [14] Ahn, H., J. Park, H. Bang, y Y. Kim. «Model Predictive Control-Based Multirotor Three-Dimensional Motion Planning with Point Cloud Obstacle». *Journal of Aerospace Information Systems* 19, n.º 3 (2022): 179-93. <https://doi.org/10.2514/1.1010956>.
- [15] Aiello, G., K.P. Valavanis, y A. Rizzo. «3D Real-Time Energy Efficient Path Planning for a Fleet of Fixed-Wing UAVs». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 1037-46. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476769>.
- [16] Allasia, G., A. Rizzo, y K. Valavanis. «Quadrotor UAV 3D Path Planning with Optical-Flow-Based Obstacle Avoidance». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 1029-36. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476762>.
- [17] Bahabry, A., X. Wan, H. Ghazzai, H. Menouar, G. Vesonder, y Y. Massoud. «Low-Altitude Navigation for Multi-Rotor Drones in Urban Areas». *IEEE Access* 7 (2019): 87716-31. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925531>.
- [18] Balasubramanian, E., E. Elangovan, P. Tamilarasan, G.R. Kanagachidambaresan, y D. Chutia. «Optimal Energy Efficient Path Planning of UAV Using Hybrid MACO-MEA\* Algorithm: Theoretical and Experimental Approach». *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-04098-z>.
- [19] Bolourian, N., y A. Hammad. «LiDAR-Equipped UAV Path Planning Considering Potential Locations of Defects for Bridge Inspection». *Automation in Construction* 117 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103250>.
- [20] Chen, J., U. Mitra, y D. Gesbert. «3D Urban UAV Relay Placement: Linear Complexity Algorithm and Analysis». *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20, n.º 8 (2021): 5243-57. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3066429>.

- [21] Chen, L., I. Mantegh, T. He, y W. Xie. «Fuzzy Kinodynamic RRT: A Dynamic Path Planning and Obstacle Avoidance Method». En *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 188-95. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213964>.
- [22] Chen, Y., W. Li, y R. Qi. «Research and Simulation of UAV Three-Dimensional Path Replanning in Complex Environment». En *Proc. IEEE Asia-Pacific Conf. Image Process., Electron. Comput., IPEC*, 746-51. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/IPEC51340.2021.9421155>.
- [23] Chowdhury, M.M.U., S.J. Maeng, E. Bulut, y I. Guvenc. «3-D Trajectory Optimization in UAV-Assisted Cellular Networks Considering Antenna Radiation Pattern and Backhaul Constraint». *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 56, n.º 5 (2020): 3735-50. <https://doi.org/10.1109/TAES.2020.2981233>.
- [24] D'Amato, E., I. Notaro, L. Blasi, y M. Mattei. «Smooth Path Planning for Fixed-Wing Aircraft in 3D Environment Using a Layered Essential Visibility Graph». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 9-18. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8797929>.
- [25] Dehbi, Y., L. Klingbeil, y L. Plümer. «UAV Mission Planning for Automatic Exploration and Semantic Mapping». En *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, editado por Paparoditis N., Mallet C., Lafarge F., Hinz S., Feitosa R., Weinmann M., y Jutzi B., 43:521-26. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2020. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-521-2020>.
- [26] Dewangan, R.K., A. Shukla, y W.W. Godfrey. «Three Dimensional Path Planning Using Grey Wolf Optimizer for UAVs». *Applied Intelligence* 49, n.º 6 (2019): 2201-17. <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1384-y>.
- [27] Du, N., Y. Zhou, W. Deng, y Q. Luo. «Improved Chimp Optimization Algorithm for Three-Dimensional Path Planning Problem». *Multimedia Tools and Applications* 81, n.º 19 (2022): 27397-422. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12882-4>.
- [28] Fareh, R., M. Baziyad, T. Rabie, I. Kamel, y M. Bettayeb. «Sobel Potential Field: Addressing Responsive Demands for UAV Path Planning Techniques». *Drones* 6, n.º 7 (2022). <https://doi.org/10.3390/drones6070163>.
- [29] Faria, M., R. Marín, M. Popović, I. Maza, y A. Viguria. «Efficient Lazy Theta\* Path Planning over a Sparse Grid to Explore Large 3D Volumes with a Multicopter UAV». *Sensors (Switzerland)* 19, n.º 1 (2019). <https://doi.org/10.3390/s19010174>.
- [30] Farid, G., S. Cocuzza, T. Younas, A.A. Razzaqi, W.A. Wattoo, F. Cannella, y H. Mo. «Modified A-Star (A\*) Approach to Plan the Motion of a Quadrotor UAV in Three-

- Dimensional Obstacle-Cluttered Environment». *Applied Sciences (Switzerland)* 12, n.º 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/app12125791>.
- [31] Fu, Q., X. Lan, Y. Ji, X. Sun, y F. Ren. «Heuristic RRT Fusion A\* for 3D Path Planning of UAV». En *IEEE Inf. Technol. Mechatronics Eng. Conf., ITOEC*, editado por Xu B. y Mou K., 1433-43. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. <https://doi.org/10.1109/ITOEC53115.2022.9734628>.
- [32] Ghambari, S., M. Golabi, J. Lepagnet, M. Breveilliers, L. Jourdan, y L. Idoumghar. «An Enhanced NSGA-II for Multiobjective UAV Path Planning in Urban Environments». En *Proc. Int. Conf. Tools Artif. Intell. ICTAI*, editado por Alamaniotis M. y Pan S., 2020-November:106-11. IEEE Computer Society, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICTAI50040.2020.00027>.
- [33] Guo, J., C. Liang, K. Wang, B. Sang, y Y. Wu. «Three-Dimensional Autonomous Obstacle Avoidance Algorithm for UAV Based on Circular Arc Trajectory». *International Journal of Aerospace Engineering* 2021 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/8819618>.
- [34] He, X., S. Zhou, H. Zhang, L. Wu, Y. Zhou, Y. He, y M. Wang. «Multiobjective Coordinated Search Algorithm for Swarm of UAVs Based on 3D-Simplified Virtual Forced Model». *International Journal of Systems Science* 51, n.º 14 (2020): 2635-52. <https://doi.org/10.1080/00207721.2020.1799110>.
- [35] Herynek, J., P. Vana, y J. Faigl. «Finding 3d Dubins Paths with Pitch Angle Constraint Using Non-Linear Optimization». En *European Conf. Mob. Robot., ECMR - Proc.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ECMR50962.2021.9568787>.
- [36] Huang, J., G. Tian, J. Zhang, y Y. Chen. «On Unmanned Aerial Vehicles Light Show Systems: Algorithms, Software and Hardware». *Applied Sciences (Switzerland)* 11, n.º 16 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11167687>.
- [37] Huang, S., y R.S.H. Teo. «Computationally Efficient Visibility Graph-Based Generation of 3D Shortest Collision-Free Path among Polyhedral Obstacles for Unmanned Aerial Vehicles». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 1218-23. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8798322>.
- [38] Huang, Y., J. Chen, H. Wang, y G. Su. «A Method of 3D Path Planning for Solar-Powered UAV with Fixed Target and Solar Tracking». *Aerospace Science and Technology* 92 (2019): 831-38. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.06.027>.
- [39] Hustiu, S., M. Kloetzer, y A. Burlacu. «Collision Free Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Environments with Dynamic Obstacles». En *Int. Conf. System Theory, Control Comput., ICSTCC - Proc.*, editado por Barbulescu L.-F., 520-25.

- Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ICSTCC50638.2020.9259702>.
- [40] Hustiu, S., M. Kloetzer, y C. Mahulea. «Mission Assignment and 3D Path Planning for a Team of UAVs». En *Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput., ICSTCC - Proc.*, editado por Ferariu L., Matcovschi M-H., y Ungureanu F., 401-6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICSTCC52150.2021.9606861>.
- [41] Jamshidi, V., V. Nekoukar, y M.H. Refan. «Real Time UAV Path Planning by Parallel Grey Wolf Optimization with Align Coefficient on CAN Bus». *Cluster Computing* 24, n.º 3 (2021): 2495-2509. <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03276-6>.
- [42] Jiang, H., y X. Liu. «Fast Three-Dimensional Path Planning with Obstacle Avoidance Constraints». En *AIAA Scitech Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0357>.
- [43] Jiang, W., Y. Lyu, Y. Li, Y. Guo, y W. Zhang. «UAV Path Planning and Collision Avoidance in 3D Environments Based on POMPD and Improved Grey Wolf Optimizer». *Aerospace Science and Technology* 121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107314>.
- [44] Kiani, F., A. Seyyedabbasi, R. Aliyev, M.A. Shah, y M.U. Gulle. «3D Path Planning Method for Multi-UAVs Inspired by Grey Wolf Algorithms». *Journal of Internet Technology* 22, n.º 4 (2021): 743-55. <https://doi.org/10.53106/160792642021072204003>.
- [45] Kim, H., J. Jeong, N. Kim, y B. Kang. «A Study on 3D Optimal Path Planning for Quadcopter UAV Based on D\* Lite». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 787-93. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8797815>.
- [46] Li, Y., B. Sun, P. Xia, y Y. Yang. «Energy-Optimal 3D Path Planning for MAV with Motion Uncertainty». *Complexity* 2021 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/9994680>.
- [47] Lieret, M., M. Kalenberg, C. Hofmann, y J. Franke. «Environment Representation and Path Planning for Unmanned Aircraft in Industrial Indoor Applications». En *Procedia Manuf.*, 55:176-82. Elsevier B.V., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.025>.
- [48] Lindqvist, B., A.-A. Agha-Mohammadi, y G. Nikolakopoulos. «Exploration-RRT: A Multi-Objective Path Planning and Exploration Framework for Unknown and Unstructured Environments». En *IEEE Int Conf Intell Rob Syst*, 3429-35. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636243>.
- [49] Lv, J.-X., L.-J. Yan, S.-C. Chu, Z.-M. Cai, J.-S. Pan, X.-K. He, y J.-K. Xue. «A New Hybrid Algorithm Based on Golden Eagle Optimizer and Grey Wolf Optimizer for 3D

- Path Planning of Multiple UAVs in Power Inspection». *Neural Computing and Applications* 34, n.º 14 (2022): 11911-36. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07080-0>.
- [50] Madridano, Á., A. Al-Kaff, D. Martín, y A. de la Escalera. «3d Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies». *Sensors (Switzerland)* 20, n.º 3 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20030642>.
- [51] Mandloi, D., R. Arya, y A.K. Verma. «Unmanned Aerial Vehicle Path Planning Based on A\* Algorithm and Its Variants in 3d Environment». *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 12, n.º 5 (2021): 990-1000. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01186-9>.
- [52] Melo, A.G., M.F. Pinto, A.L.M. Marcato, L.M. Honório, y F.O. Coelho. «Dynamic Optimization and Heuristics Based Online Coverage Path Planning in 3d Environment for Uavs». *Sensors (Switzerland)* 21, n.º 4 (2021): 1-25. <https://doi.org/10.3390/s21041108>.
- [53] Mokrane, A., A.C. Braham, y B. Cherki. «UAV Path Planning Based on Dynamic Programming Algorithm on Photogrammetric DEMs». En *Int. Conf. Electr. Eng., ICEE*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ICEE49691.2020.9249903>.
- [54] Natalizio, E., L. Di Puglia Pugliese, N.R. Zema, y F. Guerriero. «Download and Fly: An Online Solution for the UAV 3D Trajectory Planning Problem in Smart Cities». En *DIVANet - Proc. ACM Symp. Des. Anal. Intell. Veh. Networks Appl.*, 49-56. Association for Computing Machinery, 2019. <https://doi.org/10.1145/3345838.3356012>.
- [55] Ortiz, A., S. Garcia-Nieto, y R. Simarro. «Comparative Study of Optimal Multivariable Lqr and Mpc Controllers for Unmanned Combat Air Systems in Trajectory Tracking». *Electronics (Switzerland)* 10, n.º 3 (2021): 1-31. <https://doi.org/10.3390/electronics10030331>.
- [56] Papaioannou, S., P. Kolios, T. Theocharides, C.G. Panayiotou, y M.M. Polycarpou. «3D Trajectory Planning for UAV-Based Search Missions: An Integrated Assessment and Search Planning Approach». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 517-26. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476869>.
- [57] Park, J.-K., y T.-M. Chung. «Boundary-RRT\* Algorithm for Drone Collision Avoidance and Interleaved Path Re-Planning». *Journal of Information Processing Systems* 16, n.º 6 (2020): 1324-42. <https://doi.org/10.3745/JIPS.04.0196>.
- [58] Petit, L., y A.L. Desbiens. «RRT-Rope: A Deterministic Shortening Approach for Fast near-Optimal Path Planning in Large-Scale Uncluttered 3D Environments». En *Conf.*



- Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, 1111-18. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/SMC52423.2021.9659071>.
- [59] Potter Neto, C.A., G. De Carvalho Bertoli, y O. Saotome. «2D and 3D A\* Algorithm Comparison for UAS Traffic Management Systems». En *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 72-76. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9214028>.
- [60] Qin, Z., C. Dong, H. Wang, A. Li, H. Dai, W. Sun, y Z. Xu. «Trajectory Planning for Data Collection of Energy-Constrained Heterogeneous UAVs». *Sensors (Switzerland)* 19, n.º 22 (2019). <https://doi.org/10.3390/s19224884>.
- [61] Rey, R., J.A. Cobano, L. Merino, y F. Caballero. «Adaptation of Lazy-Theta for UAS 3D Path Planning Considering Safety Costs». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 387-93. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476772>.
- [62] Sababha, B.H., A. Al-mousa, R. Baniyounisse, y J. Bdour. «Sampling-Based Unmanned Aerial Vehicle Air Traffic Integration, Path Planning, and Collision Avoidance». *International Journal of Advanced Robotic Systems* 19, n.º 2 (2022). <https://doi.org/10.1177/17298806221086431>.
- [63] Saeed, R.A., M. Omri, S. Abdel-Khalek, E.S. Ali, y M.F. Alotaibi. «Optimal Path Planning for Drones Based on Swarm Intelligence Algorithm». *Neural Computing and Applications* 34, n.º 12 (2022): 10133-55. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-06998-9>.
- [64] Samaniego, F., J. Sanchis, S. Garcia-Nieto, y R. Simarro. «Smooth 3d Path Planning by Means of Multiobjective Optimization for Fixed-Wing UAVs». *Electronics (Switzerland)* 9, n.º 1 (2020). <https://doi.org/10.3390/electronics9010051>.
- [65] Sanchez-Lopez, J.L., M. Wang, M.A. Olivares-Mendez, M. Molina, y H. Voos. «A Real-Time 3D Path Planning Solution for Collision-Free Navigation of Multirotor Aerial Robots in Dynamic Environments». *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 93, n.º 1-2 (2019): 33-53. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0809-5>.
- [66] Shi, L., G. Mehrooz, y R.H. Jacobsen. «Inspection Path Planning for Aerial Vehicles via Sampling-Based Sequential Optimization». En *Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst., ICUAS*, 679-87. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476784>.
- [67] Song, J., M. Zhao, E. Yang, y J. Lin. «The High-Speed Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle Path Planning Based on the Biogeography-Based Optimization Algorithm». *Advances in Mechanical Engineering* 11, n.º 5 (2019). <https://doi.org/10.1177/1687814019847863>.

- [68] Taha, M.Y., M.J. Mohamed, y O.N. Ucan. «Optimal 3D Path Planning for the Delivery Quadcopters Operating in a City Airspace». En *Int. Symp. Multidiscip. Stud. Innov. Technol., ISMSIT - Proc.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9254715>.
- [69] Taoudi, A., y C. Luo. «Obstacle Avoidance for a Quadrotor Using A\* Path Planning and Lqr-Based Trajectory Tracking». En *AIAA Scitech Forum.* American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1566>.
- [70] Teng, H., I. Ahmad, A. Msm, y K. Chang. «3D Optimal Surveillance Trajectory Planning for Multiple UAVs by Using Particle Swarm Optimization with Surveillance Area Priority». *IEEE Access* 8 (2020): 86316-27. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992217>.
- [71] Wang, H., Y. Wang, C. Gao, C. Bai, y Z. Huang. «Design of UAV's Safe Obstacle Avoidance Trajectory Based on Point Cloud». En *Proc. - Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Appl., ITCA*, 258-61. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ITCA52113.2020.00062>.
- [72] WANG, X., Y. YANG, D. WANG, y Z. ZHANG. «Mission-Oriented Cooperative 3D Path Planning for Modular Solar-Powered Aircraft with Energy Optimization». *Chinese Journal of Aeronautics* 35, n.º 1 (2022): 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.04.015>.
- [73] Wang, X., Y. Yang, D. Wu, Z. Zhang, y X. Ma. «Mission-Oriented 3D Path Planning for High-Altitude Long-Endurance Solar-Powered UAVs with Optimal Energy Management». *IEEE Access*, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045934>.
- [74] Wu, C., X. Huang, Y. Luo, S. Leng, y F. Wu. «An Improved Sparse Hierarchical Lazy Theta\* Algorithm for UAV Real-Time Path Planning in Unknown Three-Dimensional Environment». En *Int. Conf. Commun. Technol. Proc. ICCT*, 2020-October:673-77. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ICCT50939.2020.9295690>.
- [75] Xia, S., y X. Zhang. «Constrained Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle in 3d Terrain Using Modified Multi-Objective Particle Swarm Optimization». *Actuators* 10, n.º 10 (2021). <https://doi.org/10.3390/act10100255>.
- [76] Xiao, J., H. Sun, X. Chai, B. Qu, P. Wen, Y. Zhou, H. Wang, y D. Wang. «Multi-UAV 3D Path Planning Based on Improved Particle Swarm Optimizer». En *Proc. - Int. Conf. Comput., Internet Things Control Eng., CITCE*, 144-49. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/CITCE54390.2021.00035>.
- [77] Xiong, C., B. Xin, M. Guo, Y. Ding, y H. Zhang. «Multi-UAV 3D Path Planning in Simultaneous Attack». En *IEEE Int. Conf. Control Autom., ICCA*, 2020-October:500-

505. IEEE Computer Society, 2020.  
<https://doi.org/10.1109/ICCA51439.2020.9264450>.
- [78] Xue, Z., y X. Liu. «Trajectory Planning of Unmanned Aerial Vehicle Based on the Improved Biogeography-Based Optimization Algorithm». *Advances in Mechanical Engineering* 13, n.º 3 (2021). <https://doi.org/10.1177/16878140211004295>.
- [79] Yang, H., X. Lu, X. Zhou, R. Zheng, Y. Liu, y S. Tao. «Expected Length of the Shortest Path of the Traveling Salesman Problem in 3D Space». *Journal of Advanced Transportation* 2022 (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/4124950>.
- [80] Yang, L., J. Guo, y Y. Liu. «Three-Dimensional UAV Cooperative Path Planning Based on the MP-CGWO Algorithm». *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 16, n.º 3 (2020): 991-1006. <https://doi.org/10.24507/ijicic.16.03.991>.
- [81] Yang, L., P. Wang, y Y. Zhang. «Coordinated Path Planning for UAVs Based on Sheep Optimization». *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics* 37, n.º 5 (2020): 816-30. <https://doi.org/10.16356/j.1005-1120.2020.05.016>.
- [82] Yang, Q., J. Liu, y L. Li. «Path Planning of UAVs under Dynamic Environment Based on a Hierarchical Recursive Multiagent Genetic Algorithm». En *IEEE Congr. Evol. Comput., CEC - Conf. Proc.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185513>.
- [83] Yuan, M.-S., T.-L. Zhou, y M. Chen. «Improved Lazy Theta\* Algorithm Based on Octree Map for Path Planning of UAV». *Defence Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.01.006>.
- [84] Zammit, C., y E. van Kampen. «Comparison of A\* And Rrt in Real-Time 3d Path Planning of Uavs». En *AIAA Scitech Forum*, Vol. 1 PartF. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-0861>.
- [85] Zammit, C., y E.-J. Van Kampen. «Real-Time 3D UAV Path Planning in Dynamic Environments with Uncertainty». *Unmanned Systems*, 2022. <https://doi.org/10.1142/S2301385023500073>.
- [86] Zhang, N., M. Zhang, y K.H. Low. «3D Path Planning and Real-Time Collision Resolution of Multirotor Drone Operations in Complex Urban Low-Altitude Airspace». *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 129 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103123>.
- [87] Zhang, S., y R. Zhang. «Radio Map-Based 3D Path Planning for Cellular-Connected UAV». *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20, n.º 3 (2021): 1975-89. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3037916>.

- [88] Zhang, Z. «Obstacle Recognition and Path Planning of UAV Flight». En *Int. Conf. Control, Robot. Cybern., CRC*, 225-29. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/CRC52766.2021.9620154>.
- [89] Zheng, Z., T.R. Bewley, y F. Kuester. «Point Cloud-Based Target-Oriented 3D Path Planning for UAVs». En *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 790-98. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213894>.
- [90] Zhou, C., J. Yin, A. Rong, D. Guo, y J. Li. «Research on UAV Fire Fight Based on Analytic Hierarchy Process». En *ACM Int. Conf. Proc. Ser.*, 16-22. Association for Computing Machinery, 2021. <https://doi.org/10.1145/3473714.3473718>.
- [91] Zhou, Q., S. Gao, B. Qu, X. Gao, y Y. Zhong. «CROSSOVER RECOMBINATION-BASED GLOBAL-BEST BRAIN STORM OPTIMIZATION ALGORITHM FOR UAV PATH PLANNING». *Proceedings of the Romanian Academy Series A - Mathematics Physics Technical Sciences Information Science* 23, n.º 2 (2022): 207-16.
- [92] ZHOU, Y., Y. SU, A. XIE, y L. KONG. «A Newly Bio-Inspired Path Planning Algorithm for Autonomous Obstacle Avoidance of UAV». *Chinese Journal of Aeronautics* 34, n.º 9 (2021): 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.018>.
- [93] Zhu, Z., Y. Qian, y W. Zhang. «Research on UAV Searching Path Planning Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithm». En *Proc. IEEE Int. Conf. Civ. Aviat. Saf. Inf. Technol., ICCASIT*, editado por Sun H., 1319-23. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICCASIT53235.2021.9633591>.
- [94] Ziqi, S., X. Xiaoqiang, M. Yan, y G. Lirong. «Study on 3D Path Planning of UAV». En *Int. Conf. Commun. Technol. Proc. ICCT*, 2021-October:662-68. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <https://doi.org/10.1109/ICCT52962.2021.9657990>.
- [95] Pablo Pavón Mariño. «Optimization of Computer Networks – Modeling and Algorithms a Hands-on Approach». John Wiley & Sons, Ltd. 2016.
- [96] L. G. Stein, «Las fuentes secundarias,» dirección: [www.ts.ucr.ac.cr](http://www.ts.ucr.ac.cr).
- [97] Clasificación general de las fuentes de información | Biblioteca Virtual del Sistema de Universidad Virtual. dirección: <http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx/portal/clasificaciongeneral-de-las-fuentes-de-informacion>.
- [98] [60] CADIMA. dirección: <https://www.cadima.info/>.

## 5 ANEXOS

Los Anexos de este proyecto son los siguientes:

### I ANEXO I: OBJETIVOS A MAXIMIZAR

**Tabla I.** Se muestra los objetivos maximizados en cada una de las contribuciones investigadas y al final de la tabla están señalados los artículos que tienen más de un objetivo a maximizar.

ID	Aptitud	Colisiones	Costo	Datos	Energía	Modelo ambiental	Radios de giro	Restricciones	Riesgos de vuelo	Tiempo	Vigilancia	Múltiple
A-01			✓									
A-02					✓							
A-03			✓		✓							✓
A-04			✓							✓		✓
A-05			✓							✓		✓
A-06					✓							
A-07			✓									
A-08										✓		
A-09					✓							
A-10			✓					✓				✓
A-11			✓									
A-12		✓										
A-13			✓									
A-14										✓		

A-15	✓		✓									✓
A-16										✓		
A-17			✓									
A-18			✓		✓		✓					✓
A-19			✓									
A-20			✓							✓		✓
A-21		✓										
A-22			✓									
A-23					✓					✓		✓
A-24			✓									
A-25					✓					✓		✓
A-26										✓		
A-27		✓										
A-28					✓							
A-29					✓				✓		✓	✓
A-30							✓					
A-31				✓	✓							✓
A-32				✓	✓							✓
A-33			✓							✓		✓
A-34		✓										
A-35			✓									
A-36			✓									
A-37		✓			✓					✓		✓

## II ANEXO II: VARIABLES A SER OPTIMIZADAS

**Tabla I.** Se muestra las variables que cada una de las contribuciones a optimizado y al final de la tabla están señalados los artículos que tienen más de una variable optimizada.

ID	Altitud	Angulo de inclinación	Colisiones	Densidad del aire	Distancia	Evadir radares	Exploración Explotación	Potencia	Velocidad angular Q	Múltiple
A-01	✓									
A-02	✓			✓						✓
A-03	✓				✓					✓
A-04					✓					
A-05	✓				✓					✓
A-06					✓					
A-07	✓				✓					✓
A-08	✓				✓					✓
A-09	✓									
A-10	✓				✓		✓			✓
A-11	✓		✓		✓	✓		✓		✓
A-12					✓					
A-13	✓									
A-14	✓									
A-15	✓									
A-16	✓				✓					✓

A-17	✓	✓							✓	✓
A-18	✓				✓					✓
A-19					✓					
A-20					✓					
A-21					✓					
A-22					✓					
A-23					✓					
A-24					✓					
A-25	✓				✓					✓
A-26	✓				✓					✓
A-27					✓					
A-28	✓									
A-29					✓					
A-30					✓					
A-31	✓									
A-32	✓									
A-33					✓					
A-34					✓					
A-35					✓					
A-36					✓					
A-37	✓									



### **III ANEXO III: BASE DE DATOS DE CADIMA Y DOCUMENTOS GENERADOS DURANTE LA ETAPA DE PLANIFICACIÓN.**

Los documentos utilizados en la ejecución de este proyecto se encuentran cargados en un repositorio, al cual se puede acceder mediante el siguiente enlace:

<https://github.com/marcomorales01/palth-planing-UAVs-3D>