

# **Sistema Multi-UAV Heterogéneo para Cobertura de Cultivos**



**LISETH VIVIANA CAMPO ARCOS**

Tesis de Doctorado en Ingeniería Telemática

**Director:**

PhD. Juan Carlos Corrales Muñoz

**Universidad del Cauca  
Facultad de ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telemática  
Línea de investigación e-@mbiente  
Popayán, 2023**





**LISETH VIVIANA CAMPO ARCOS**

**Sistema Multi-UAV Heterogéneo para Cobertura de  
Cultivos**

**Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería  
Electrónica y Telecomunicaciones de la  
Universidad del Cauca para la obtención del  
Título de**

**Doctor en:**  
Ingeniería Telemática

**Director:**  
PhD. Juan Carlos Corrales Muñoz

**Popayán  
2023**





***Agradezco a Dios por darme la vida y el intelecto, y por concederme el milagro de mi hijo durante la realización de estos estudios. Extiendo las gracias a mi madre por sus incasables oraciones, a mi familia por su paciencia, y a las personas que han iluminado mi camino profesional en todos estos años.***





# Resumen Estructurado

**Antecedentes:** El trabajo de investigación con múltiples vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) ha trascendido desde los logros en el ámbito militar hacia servicios para la población civil, que abarcan no sólo el despliegue de enjambres para eventos, también incluyen fotogrametría y riego aéreo usando flotas pequeñas de drones. De esta manera, los productos resultantes de tales misiones de cobertura se valoran como una herramienta emergente para procesos de agricultura de precisión en zonas de estudio extensas y con acceso restringido. Esta expectativa para alcanzar el uso masivo de la tecnología multi-UAV está limitada por los entornos al aire libre, los cuales implican riesgo para completar las misiones y por tanto riesgo de pérdidas en la inversión tecnológica.

**Objetivo:** Diseñar un sistema de múltiples UAV heterogéneos para cobertura de cultivos.

**Métodos:** El método usado para resolver el objetivo propuesto está centrado en la gestión de la heterogeneidad de los UAV y la conectividad de la flota. Ambos factores están comprometidos con la partición de área de cobertura y con la interacción entre vecinos cercanos para lograr la cooperación en caso de escenarios de riesgo de misión incompleta. La resolución subsiguiente a la identificación de la alerta sostiene un esquema de movilidad y enrutamiento basado en roles jerárquicos: Maestro, Coordinador y Operador, los cuales atienden la alerta y asignan acciones adicionales a las tareas iniciales para completar la misión global. Esta nueva misión se asume de manera determinista para considerar que un agente cubra los espacios que sus recursos le permitan.

**Resultados:** Los resultados evidencian que el sistema multi-UAV propuesto puede lograr al menos un 8% más de vida útil al final de la misión en comparación con métodos tradicionales de asignación de tareas como Boustrophedon y K-means; considerando además el gasto energético por comunicación durante enrutamiento de alertas y resolución de riesgo de misión incompleta. Esta reserva de energía garantiza que, en presencia de fallos, el sistema concluya la misión con al menos un 70% de área cubierta.

**Conclusiones:** La validación realizada mediante modelación de agentes permitió evidenciar que la adaptación de la descomposición de Voronoi para tareas heterogéneas era factible para gestionar eficientemente recursos de vuelo, comunicación y cognición. En concordancia, los resultados de las métricas de vida restante, de número de paquetes gestionados y de cobertura de área usando la plataforma centrada en simulación con software de autopilotos convencionales, confirmaron la efectividad y robustez del sistema multi-UAV diseñado.

**Palabras Clave:** Agente robótico, Asignación de tareas, Cobertura de área, Micro vehículo aéreo, Misión de cobertura, Sistema Multi-UAV, Red de vehículos aéreos, Resolución de alertas.

# Structured Abstract

**Background:** Research work with multiple unmanned aerial vehicles (UAV) has transcended from military achievements to services for the civilian population, encompassing not only the deployment of swarms for events, but also including photogrammetry and aerial irrigation using small fleets of drones. Thus, the products resulting from such coverage missions are valued as an emerging tool for precision agriculture processes in large study areas with restricted access. This expectation to achieve mass use of multi-UAV technology is limited by outdoor environments, which imply risk to complete the missions and therefore risk of losses in the technological investment.

**Objective:** Design a system of multiple heterogeneous UAVs for crop coverage.

**Methods:** The method used to solve the proposed objective is focused on the management of UAV heterogeneity and fleet connectivity. Both factors are engaged with coverage area partitioning and near-neighbor interaction to achieve cooperation in case of incomplete mission risk scenarios. The resolution of alert after its identification supports a mobility and routing scheme based on hierarchical roles: Master, Coordinator and Operator, which attend the alert and assign additional actions to the initial tasks to complete the overall mission. This new mission is assumed in a deterministic way to consider that an agent covers the spaces that its resources allow.

**Results:** The results show that the proposed multi-UAV system can achieve at least 8% more end-of-mission lifetime compared to traditional tasking methods such as Boustrophedon and K-means; and even more considering the energy expenditure for communication during alert routing and incomplete mission risk resolution. This energy reserve ensures that, in the presence of failures, the system concludes the mission with at least 70% of the area visited.

**Conclusions:** The validation performed by agent modeling provided evidence that the adaptation of the Voronoi decomposition for heterogeneous tasks was feasible to efficiently manage flight, communication, and cognition resources. Accordingly, the results of the remaining life, number of managed packets and area coverage metrics using the simulation platform with conventional autopilot confirmed the effectiveness and robustness of the designed multi-UAV system.

**Keywords:** Robotic agent, Task assignment, Area coverage, Micro aerial vehicle, Coverage mission, Multi-UAV system, Aerial vehicle network, Alert resolution.

# Contenido

Lista de Figuras	IV
Lista de Tablas	VI
Nomenclatura	VII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Motivación	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.3.1 Hipótesis	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Contribuciones	4
1.5.1 Productos de Investigación	5
1.6 Contenido de monografía	6
Capítulo 2. Estado Actual del Conocimiento	8
2.1 Conceptos generales	8
2.1.1. Agricultura de Precisión	8
2.1.2. Misión de Cobertura de Área	9
2.1.3. Sistemas Multi-UAV	10
2.2 Estado del Arte	12
2.2.1 Mapeo Sistemático	12
2.2.2 Revisión Sistemática	16
2.2.2.1 Asignación de tareas de cobertura para una flota de UAVs	16
2.2.2.2 Comunicación en redes ad-hoc de UAVs	19
2.2.2.3 Resolución cooperativa de tareas en una misión de cobertura de área	22
2.2.3 Brechas de investigación	23
2.2.3.1 Asignación de tareas de cobertura para una flota de UAVs	23
2.2.3.2 Comunicación en redes ad-hoc de UAVs	24
2.2.3.3 Resolución cooperativa de tareas en una misión de cobertura de área	24
2.3 Resumen	25

Capítulo 3. Asignación de Tareas de Cobertura para un Sistema multi-MAV	26
3.1 Modelo del sistema Multi-MAV	26
3.2 Diseño del Método: <i>Plan MCO</i>	28
3.2.1 Abstracción del mundo.	29
3.2.2 Partición de área	30
3.2.3 Asignación de roles	33
3.2.4 Generación de ruta de cobertura.	34
3.2.5 Asignación de Tareas.	36
3.2.6 Herramienta para asignación de tareas	37
3.3 Herramienta para Modelar Agentes MAV	38
3.4 Resultados y Discusión	38
3.4.1 Partición de área	41
3.4.2 Asignación de roles y tareas con ruta en zigzag	45
3.4.3 Asignación de roles y tareas con ruta Firefly	49
3.4 Resumen	51
Capítulo 4. Modelo de Comunicación para un Sistema Multi-UAV durante una Misión de Cobertura	52
4.1 Modelo de conectividad	52
4.2 Diseño del Método	56
4.2.1 Interacción MAV-MAV y MAV-GCS	56
4.2.2 Enrutamiento de Alertas	59
4.3 Herramienta para Simulación de Red de MAVs	62
4.4 Resultados y Discusión	64
4.4.1 Experimento con interacción pasiva	66
4.4.2 Experimento con interacción activa para una alerta	67
4.4.3 Experimento con interacción activa para dos alertas	70
4.5 Resumen	72
Capítulo 5. Resolución de Fallos durante una Misión de Cobertura	74
5.2 Diseño del método	74
5.2.1 Subasta y consenso para resolver la alerta	75
5.2.2 Enrutamiento de la decisión	78
5.2.3 Resolución cooperativa del riesgo	78
5.3 Herramienta para Generación de Ortofotos	80
5.4 Resultados y Discusión	80
5.4.1 Etapa de consenso	81

5.4.2 Etapa de resolución	85
5.5 Resumen	88
Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros	89
6.1 Conclusiones	89
6.2 Trabajos futuros	91
Referencias	93

# Lista de Figuras

Figura 1. Mapeo de Publicaciones.....	13
Figura 2. Mapeo de principales revistas y publicaciones por año .....	14
Figura 3. Mapeo de Autores.....	15
Figura 4. Mapeo de palabras clave.....	15
Figura 5. Modelo de planificación de cobertura .....	26
Figura 6. Componentes del plan MCO.....	29
Figura 7. Huella del sensor remoto y solapamiento.....	30
Figura 8. Técnicas de partición de áreas (a) segmentos, (b) agrupamiento y (c) Basada en Voronoi. ....	30
Figura 9. Partición base .....	31
Figura 10. Subparticiones.....	32
Figura 11. Representación de dos niveles de partición.....	33
Figura 12. Jerarquía relacionada con un nivel de partición .....	34
Figura 13. Método FIPA adaptado para asignación de tareas.....	37
Figura 14. Herramienta desarrollada para asignación de tareas de cobertura. ....	37
Figura 15. Espacios de trabajo seleccionados en Cauca, Colombia (a) finca La Rejoya (b) Zona Urbana y (c) finca Los Naranjos. ....	39
Figura 16. Partición del área de estudio .....	42
Figura 17. Análisis de heterogeneidad para cada espacio de trabajo. (a) Rejoya, (b) Zona urbana, (c) Los naranjos. ....	43
Figura 18. Tiempos de misión y tasa de MAV activos en misión: (a)(b) Rejoya, (c)(d) Zona urbana, (e)(f) Los Naranjos .....	46
Figura 19. Gestión de energía y conectividad para (a), (b) Rejoya, (c), (d) Zona Urbana, y (e), (f) los Naranjos .....	50
Figura 20. Topología de red estática para cada espacio de trabajo estudiado y cada método de planificación. ....	53
Figura 21. Enlaces promedio durante el tiempo de la misión para (a) Rejoya, (b) Zona Urbana y (c) Los .....	56
Figura 22. Paquete de datos para transmitir durante un enlace de comunicación. ....	57
Figura 23. Ejemplo de mensaje FIPA-Query.....	58
Figura 24. Ejemplo de mensajes FIPA-Request.....	58
Figura 25. Ejemplo de mensajes FIPA-Risk.....	59
Figura 26. Ejemplo de enrutamiento de alertas usando jerarquía MCO .....	60
Figura 27. Interfaz para despliegue de misión de cobertura con fallas (a) Estructura de capas de herramienta de simulación y (b) Interfaces de la herramienta diseñada para simulación de alertas .....	63
Figura 28. Misión de cobertura para probar el modelo de comunicación (a) cultivo seleccionado, (b) plan MCO calculado y (c) vista de la misión en ejecución .....	66
Figura 29. Métricas de rendimiento durante interacción pasiva de agentes (a) retardo, (b) vida restante y (c) PDR .....	67
Figura 30. Métricas de rendimiento durante interacción activa de bajo riesgo (a) Throughput, (b) vida restante y (c) PDR y (d) Latencia.....	68
Figura 31. Métricas de rendimiento durante interacción activa de medio riesgo (a) Throughput, (b) vida restante y (c) PDR y (d) Latencia.....	69

Figura 32. Métricas de rendimiento durante interacción activa de alto riesgo (a) Throughput, (b) vida restante y (c) PDR y (d) Latencia.....	70
Figura 33. Métricas de rendimiento para el escenario de dos alertas durante una misión de cobertura (a) Vida restante y (b) PDR.....	72
Figura 34. Escenario de simulación con Gazebo y el modelo MAV de IRIS 3DR ..	74
Figura 35. Etapa de consenso para decidir la resolución del riesgo reportado al Máster .....	76
Figura 36. Ejemplo de mensaje FIPA-Cfp .....	77
Figura 37. Ejemplo de mensaje FIPA-Request.....	77
Figura 38. Ejemplo de mensaje FIPA-Propose.....	78
Figura 39. Resolución de alertas (a) Consenso, (b) Enrutamiento, (c) Ruta extendida y (d) Cobertura esperada .....	79
Figura 40. Plan MCO para 10 agentes MAV .....	81
Figura 41. Comparación de mecanismos de consenso en escenario de riesgo bajo (a) throughput, (b) PDR y (c) latencia.....	83
Figura 42. Comparación de mecanismos de consenso en escenario de riesgo alto (a) throughput, (b) PDR y (c) latencia.....	84
Figura 43. Batería promedio restante durante la misión con alto riesgo de cobertura incompleta.....	85
Figura 44. Batería promedio restante durante la misión con alto riesgo de cobertura incompleta.....	85
Figura 45. Construcción de orto-mosaico del cultivo de espacio de prueba con 4 agentes.....	86
Figura 46. Puntos desatendidos en misiones con riesgo para 4, 6, 8 y 10 agentes MAV. ....	87
Figura 47. Porcentaje de cobertura cubierto durante una cobertura completa (barras azules) y cobertura con riesgo de alerta de alto nivel (barras naranjas) ....	88

## Lista de Tablas

Tabla 1. Búsqueda de trabajos relacionados .....	12
Tabla 2. Reglas para el control BDI.....	27
Tabla 3. Alertas simuladas con nivel de riesgo para la misión .....	64
Tabla 4. Roles para un nivel de partición .....	34
Tabla 5. Metaheurísticas vs. Zigzag movimiento.....	35
Tabla 6. Puntuación de costo de tareas y ofertas .....	36
Tabla 7. Características de casos de estudio.....	39
Tabla 8. Correlación entre MCO y otros métodos en la Rejoya. ....	44
Tabla 9. Correlación entre MCO y otros métodos en zona urbana. ....	44
Tabla 10. Correlación entre MCO y otros métodos en la finca los Naranjos. ....	44
Tabla 11. Batería restante en la Rejoya. ....	47
Tabla 12. Batería restante en zona urbana. ....	48
Tabla 13. Batería restante en la finca Los Naranjos.....	48
Tabla 14. Conexiones en la Rejoya.....	53
Tabla 15. Conexiones en zona urbana.....	54
Tabla 16. Conexiones en los Naranjos.....	54
Tabla 17. Número de agentes activos durante la misión en la Rejoya.....	50
Tabla 18. Número de agentes activos durante la misión en la zona urbana .....	51
Tabla 19. Número de agentes activos durante la misión en los Naranjos .....	51
Tabla 20. Capacidades de Agentes MAV definidas en el plan MCO.....	60
Tabla 21. Configuración de simulación para pruebas del modelo de comunicación .....	65

# Nomenclatura

**AODV** Enrutamiento basado en Vector de Distancias a Demanda

**AP** Agricultura de Precisión

**BDI** Control basado en Creencias, Deseos e Intenciones

**CBBA** Algoritmo de Asignación basado en Consenso

**CCP** Planificación de Cobertura Completa

**FANET** Red Ad-hoc de Vehículos Aéreos

**FIPA** Fundación de Agentes Físicos Inteligentes

**GCS** Estación de Control en Tierra

**MAV** Micro Vehículo Aéreo

**MCO** Jerarquía de agentes Máster, Coordinador y Operador

**ODM** Plataforma abierta para construcción de orto mosaicos

**PDR** Métrica de rendimiento que relaciona paquetes entregados por tiempo

**SITL** Simulación de software en medio

**UAV** Vehículo Aéreo No Tripulado

**ZLI** Zonas de bajo Interés



# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Contexto

Los vehículos aéreos no tripulados llamados UAV por sus siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicle) o drones son considerados una herramienta de apoyo en diferentes actividades civiles, dado que mantiene un nivel de vuelo controlado de manera remota. Consecuentemente, desde hace más de 10 años, la FAA de Estados Unidos (Federal Aviation Administration) creó el reglamento de operaciones para personas, la cual le permite a los pilotos de drones operar en el espacio aéreo. Actualmente y bajo la norma 107 (Operaciones comerciales con drones), los pilotos pueden volar de noche, sobre personas y en vehículos en movimiento sin una exención, siempre que se cumplan con los requisitos definidos en la regulación. La incorporación de esta norma ha representado el paso incremental hacia la integración de aeronaves no tripuladas (UAV) en las actividades civiles en diferentes países [1]. Aunque no solo desde la normativa mundial se viene promoviendo el uso de drones, el acelerado desarrollo de dispositivos micro-electromecánicos y sensores en miniatura, ha permitido que el rol de los drones en las aplicaciones civiles tome fuerza, abriendo expectativas en investigación y desarrollo; no solo para generar tecnologías innovadoras y nuevo conocimiento, sino también, para plantear nuevos modelos de negocio.

En la actualidad, los UAV pequeños denominados micro-UAV (MAV), han tenido mayor acogida en el mercado, no solo por su costo sino también porque requieren menos logística para la ejecución de una misión de vuelo y pueden operar en alturas bajas cercanas a los dos metros. Gracias a estas características, favorecen diferentes dominios de aplicación como búsqueda y rescate de personas, vigilancia de infraestructuras, teledetección, mapeo geoespacial, reconstrucción de estructuras tridimensionales y monitoreo ambiental, Todas ellas se pueden abordar como una extensión del problema conocido en la teoría de agentes robóticos como planificación de cobertura de áreas, y por sus siglas en inglés como CPP (Coverage Path Planning), que ubica a un robot en el entorno para recorrerlo/descubrirlo de una manera eficiente. Este problema plantea la necesidad de visitar cada punto sobre la zona de interés evitando obstáculos, basándose en ruta óptima mediante sensores y/o con información previa del entorno [2].

La solución de CPP es útil en la adquisición de datos para estrategias de agricultura de precisión, ya que se puede construir un mapa digital mediante sensores de

observación portados en MAVs [3]. Con la proyección digital de los cultivos y la respectiva geolocalización del terreno, se apoya la toma de decisiones del productor con respecto a la aplicación de fertilizantes, abonos, pesticidas y agua, conduciendo a disminuir costos y tiempo en los procesos agrícolas.

## 1.2 Motivación

La adquisición de datos de cultivos suele ser realizada con MAVs de tipo ala fija, puesto que tienen un mayor tiempo de vuelo en comparación a un MAV multirrotor, logrando una misión de cobertura extensa de manera ágil. Sin embargo, los de tipo multirrotor tienen protagonismo al tener la capacidad de despegar y aterrizar en cualquier lugar y ser menos costosos, en comparación a los de ala fija, los cuales están restringidos para zonas de difícil acceso (relieve irregular y espacio limitado). No obstante, la fuente de energía de un solo vehículo multirrotor no suele ser suficiente para completar una misión de cobertura en cultivos extensos y restringidos. Ante este escenario, se encuentran proyectos de investigación y algunas iniciativas comerciales que abordan la problemática de completar misiones de cobertura para este tipo de áreas de trabajo. Un primer enfoque es la gestión de la energía mediante rutas óptimas y precisión en posicionamiento global [4], otro planteamiento es la realización de paradas en medio del camino para abastecimiento de combustible/batería [5]. El último enfoque es el despliegue de sistemas multi-MAV los cuales están inspirados en la teoría de agentes para resolver una misión cooperativa [6]. De los anteriores, esta tesis está centrada en la alternativa precedente puesto que optimización de vuelo no lograría ganar suficiente energía para terrenos extensos y las estaciones de abastecimiento infieren un despliegue de infraestructura que no todos los ambientes agrícolas disponen.

Los acercamientos pioneros y referentes sobre sistemas multi-UAV, se encuentran en el campo militar como por ejemplo el proyecto Gremlins de DARPA [7], lanzado en el 2017 para realizar tareas de vigilancia y reconocimiento de zonas enemigas. Derivado de estos avances, las aplicaciones civiles han llegado hasta el despliegue de más de 1000 cuadricópteros para formar figuras en el firmamento como medio publicitario o para entretenimiento [8]. Más allá de los llamativos enjambres en eventos, la mayoría de flotas de MAVs al servicio de la personas se despliegan en misiones de cobertura, como por ejemplo para monitoreo de la salud de cultivos, gestión de desastres naturales [9], inspección de predios y estructuras [10], o más recientemente, para proveer o asistir redes inalámbricas [11]. Dichas misiones de cobertura se despliegan en ambientes no controlados al aire libre, lo cual aumenta el riesgo de que los MAVs queden a la deriva, colisionen con otros agentes o que sus sensores/actuadores fallen durante una misión, conduciendo a misiones incompletas y a pérdidas en la inversión tecnológica. Este riesgo inherente con las

---

flotas de MAVs impide su uso masivo en aplicaciones agrícolas y es el principal motivo del planteamiento de esta tesis que procura por una herramienta tecnológica que facilite el aprovechamiento de sistemas multi-MAV.

### **1.3 Planteamiento del problema**

La investigación en misiones de cobertura con sistemas multi-MAV se pueden generalizar en tres enfoques: el primero, es la asignación de tareas, este considera el número de vehículos desplegados de acuerdo con la división del área de cobertura. Algunas soluciones proponen la asignación usando métodos óptimos; sin embargo, la inclusión de perturbaciones del ambiente y zonas de poco interés, no suelen ser tratadas en conjunto, siendo estos factores predominantes en cultivos agrícolas. El segundo enfoque trata la coordinación de los vehículos durante la misión, en este reto se proponen arquitecturas y modelos de comunicación para evitar colisiones y reasignar tareas; en este sentido se encuentran pocos trabajos que surtan las implicaciones de desplegar en ambientes abiertos y el consumo de potencia implícito en las interacciones para cooperar entre varios agentes. Asociado a la coordinación de la flota se encuentra un tercer enfoque, que es la toma de decisiones en caso de eventos inesperados o fallos durante la misión, la literatura describe acciones basadas en la cognición de un agente central o en el estado de agentes vecinos. No obstante, la estrategia centralizada sostiene el reto de la latencia en comunicaciones y la estrategia basada en vecinos conlleva a mantener una comunicación estable y continua; ambas limitan la eficacia de la resolución del evento.

Adicional a los retos para el despliegue mencionados para sistemas Multi-UAV, se debe pensar en el costo-beneficio para los agricultores o posibles usuarios, para quienes no es de interés el conocimiento tecnológico, sino tomar decisiones que no conduzcan a pérdidas. Por lo tanto, una restricción sería desplegar misiones de cobertura con MAV comerciales y adaptables para facilitar el uso, mantenimiento y adquisición de datos; y de esta manera mitigar el riesgo en la inversión relacionado con el espacio de trabajo, la dinámica de los vehículos, la falta de suministro eléctrico y condiciones geofísicas.

De acuerdo con el planteamiento anterior se resalta la necesidad de superar los retos para desplegar exitosamente un sistema multi-UAV en cultivos agrícolas, por tanto, esta propuesta pretende centrar su investigación en la siguiente pregunta:

¿Cómo lograr una misión cooperativa de cobertura de cultivos con un sistema multi-UAV, considerando limitaciones en potencia y perturbaciones del ambiente?

### 1.3.1 Hipótesis

Un sistema multi-UAV puede lograr una misión de cobertura de cultivos usando tecnología y espacios de trabajo restringidos mientras exista eficiencia en la asignación de tareas, en la interacción colaborativa y en la gestión de fallos.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de múltiples UAV heterogéneos para cobertura de cultivos.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar un método de asignación de tareas de cobertura considerando limitaciones de potencia en los UAV y entorno conocido
- Diseñar un modelo de comunicación para la cooperación de múltiples UAVs en ambientes no controlados.
- Plantear un mecanismo para el control de fallos en la coordinación de una misión de cobertura cooperativa.
- Evaluar los métodos propuestos mediante una flota prototipo de al menos tres UAV heterogéneos para una misión de cobertura en un cultivo real.

## 1.5 Contribuciones

Las principales contribuciones de este trabajo de investigación están dadas por los resultados de los objetivos 1, 2, y 3. El último objetivo integra los resultados de los anteriores objetivos:

- Un método de asignación de tareas para una flota de MAVs que incluye:
  - Mecanismo para abstracción de zonas de interés basado en un ráster georreferenciado de un cultivo agrícola.
  - Método de partición poligonal de área mediante la adaptación de la teselación de Voronoi para generar sub-áreas heterogéneas.
  - Proceso de asignación de roles en una sociedad de agentes llamada MCO basado en la distribución heterogéneas de recursos para completar tareas de cobertura e interacción que conducen a la cooperación.
- Un modelo de comunicaciones coherente con la sociedad de agentes MCO que incluye:

- Mecanismo para interacción entre agentes MAVs basado en la adaptación de protocolos FIPA que codifican mensajes de alerta.
- Método de enrutamiento adaptativo de paquetes de datos hacia tomadores de decisión para para gestionar escenarios de riesgo durante misiones de cobertura
- Un mecanismo de resolución de fallos en misiones de cobertura que incluye:
  - Proceso de subasta y consenso centralizado que selecciona los agentes que cooperarán con la mitigación del riesgo de completitud
  - Proceso de resolución de la alerta de misión incompleta basada en el cambio de modos de vuelo de acuerdo con la cercanía a puntos desatendidos

### 1.5.1 Productos de Investigación

Desde las contribuciones descritas anteriormente se presentan algunos medios de verificación de la investigación:

- Un artículo científico publicado en la revista DRONES categorizada JCR - Q2 y en pubindex como A1 [12]: LV Campo, A Ledezma, JC Corrales, “MCO Plan: Efficient Coverage Mission for Multiple Micro Aerial Vehicles Modeled as Agents”, Drones, <https://doi.org/10.3390/drones6070181>
- Una herramienta de planificación de tareas basada en algoritmos de optimización (Ver Anexo 1)
- Una herramienta software para simulación de experimentos con una flota de MAVs modelados como agentes con arquitectura de control BDI, comunicaciones basadas en protocolo FIPA y resolución de eventos debidos a fallas no estructurales del UAV optimización (Ver Anexo 1)
- Otras publicaciones:
  - JF Trujillo, Y Villamil, L Campo, JC Corrales (2018), “Cover Missions Planning for Unmanned Aerial Vehicles”, in International Conference of ICT for Adapting Agriculture to Climate Change AACC 2017, Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC,volume 687), [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5_4)
  - JA Bolaños, L Campo, JC Corrales, JC Corrales (2018), “Characterization in the visible and infrared spectrum of agricultural crops from a multicopter air vehicle”, in International Conference of ICT for Adapting Agriculture to Climate Change AACC 2017, Part of the Advances in Intelligent Systems and Computing book series (AISC,volume 687), [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5_3)
  - LV Campo, A Ledezma, JC Corrales (2020), “Optimization of coverage mission for lightweight unmanned aerial vehicles applied in crop data

acquisition”, Expert Systems with Applications, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113227>

- J Bolaños, JC Corrales, LV Campo (2023), “Feasibility of Early Yield Prediction per Coffee Tree Based on Multispectral Aerial Imagery: Case of Arabica Coffee Crops in Cauca-Colombia”, Remote Sensing, <https://doi.org/10.3390/rs15010282>

## 1.6 Contenido de monografía

La monografía presentada en este documento se compone de seis capítulos introducidos a continuación:

### *Capítulo 2. Estado actual del conocimiento*

Este capítulo se enfoca en establecer las bases conceptuales para la comprensión del trabajo de investigación, revisión de los trabajos relacionados de los últimos cinco años y la identificación de las brechas existentes en las que este trabajo está enmarcado.

### *Capítulo 3. Planificación de Misión de Cobertura para un Sistema Multi-UAV*

El capítulo aborda el método planteado para asignación de tareas de cobertura considerando una flota de MAV heterogéneos. El origen del método está basado en geometría computacional para dar respuesta a una planificación de tareas en un espacio de trabajo conocido.

### *Capítulo 4. Coordinación de un Sistema Multi-UAV para Misión de Cobertura*

El capítulo describe el modelo diseñado para la comunicación de múltiples UAVs durante una misión de cobertura. El modelo es factible para gestionar alertas de riesgo en la completitud de cobertura bajo conectividad intermitente y un consumo de energía equilibrado.

### *Capítulo 5. Resolución Cooperativa de Fallos durante una Misión de Cobertura*

Este capítulo es consecuente con los resultados de los anteriores métodos, estableciendo una alternativa para que la flota de MAVs supere el riesgo de misión incompleta. La validación de la integración de métodos se realiza a través de la

comparación orto mosaicos como producto central de un sistema multi-MAV desplegado en cultivos agrícolas.

### *Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros*

Este capítulo final destaca los resultados obtenidos con esta tesis y los trabajos futuros para el refinamiento y escalabilidad de la presente tesis.

## **Capítulo 2. Estado Actual del Conocimiento**

En esta sección se precisa la base teórica fundamental para comprender y abstraer el contexto de la tesis de doctorado. De acuerdo con los objetivos, se abordan fundamentos en la agricultura de precisión, misión de cobertura completa de áreas y sistemas multi-UAV. Cada uno de los cuales se relaciona con el apartado de trabajos relacionados que sigue un proceso de revisión sistemática en tres temas principales asignación de tareas para una flota de UAVs en una misión de cobertura, comunicación entre robots aéreos en ambientes abiertos y resolución de la misión de cobertura completa en presencia de agentes en fallo. Finalmente, en cada temática abordada se identifica las brechas de investigación.

### **2.1 Conceptos generales**

En esta sección se explican en detalle los conceptos que introducen a la comprensión de la tesis de doctorado tales como agricultura de precisión, misión de cobertura de área y sistemas multi-UAV

#### **2.1.1. Agricultura de Precisión**

El surgimiento de la tendencia en agricultura de precisión fue necesario debido al crecimiento en la extensión de los cultivos y la producción intensiva del siglo XX, donde los tratamientos manuales y mecánicos implicaban gran cantidad de mano de obra, alta inversión en fertilizantes, abonos, pesticidas, agua, y dispendiosos análisis de datos; con pocas posibilidades de ejecutar acciones efectivas para todo el cultivo [13]. Con el establecimiento de un sistema de posicionamiento global (GPS) basado en un grupo de satélites colocados en la década de los setenta, fue posible recolectar información localizada del estado de los cultivos, consolidando de esta manera el concepto de agricultura de precisión. Formalmente la agricultura de precisión es conocida como una nueva forma de gestión de los cultivos, basada en la observación, recolección de datos, procesamiento de la información y la toma de decisiones para las operaciones principales del cultivo [14].

En la actualidad, la agricultura de precisión incluye el aprovechamiento de las tecnologías emergentes y convergentes, como los sistemas microelectromecánicos, redes de sensores inalámbricos, entre otras tendencias; con el propósito de obtener información detallada, que le permita al agricultor registrar temporal y espacialmente los cultivos, para lograr una mejor productividad; tratar enfermedades en zonas

puntuales y distribuir eficientemente los recursos, considerando la sostenibilidad del medio ambiente. La ejecución de las técnicas de agricultura de precisión plantea un ciclo con tres fases generales: *Recolección de los datos*, que incluye el mapeo de la variabilidad del suelo, la planta y el medio ambiente; *Interpretación de los Datos* mediante mapas de rendimiento y nutrientes, que resulta en un esquema de toma de decisiones y la fase final de *Aplicación* que gestiona el riego y fertilizantes sobre el cultivo [15].

### **2.1.2. Misión de Cobertura de Área**

La adquisición de datos confiables para agricultura de precisión implica una monitorización completa de los cultivos en la fase de adquisición de datos. Dicha monitorización puede ser realizada mediante recorridos de personal técnico en los cultivos, usando sensores in-situ desplegados en lugares estratégicos o mediante mapeo geoespacial. Este último es el enfoque de esta investigación, el cual puede ser considerado como una extensión del problema conocido como planificación de ruta de cobertura completa (CPP), que para los UAVs se realiza regularmente con una trayectoria en zigzag generada por un software de cartografía. La planificación de la trayectoria de vuelo para cubrir un área es el proceso de calcular un recorrido factible que debe hacer un agente autónomo para escanear o inspeccionar un entorno de interés [16].

Los dos principales componentes de la planificación de cobertura son la generación de puntos a visitar y la generación de rutas de cobertura. La generación de puntos del recorrido se conoce como abstracción del mundo, y se encarga de definir las posiciones del agente desde el que se recogerán los datos, lo cual da la precisión a la cobertura global. La abstracción del mundo puede configurarse dependiendo del objetivo de la misión de cobertura, la más conocida es la de tipo rejilla (cuadrícula) en la que los puntos centrales de cada cuadrilla es punto de visita, otras similares pero con forma poligonal diferente también pueden ser encontradas [17].

El segundo componente respecto al problema de cobertura es calcular una ruta con una distancia y tiempo mínimo en el que los agentes móviles realicen tareas de monitorización, cuidando de volver al punto de partida. En ese orden, el segundo componente es asumido por investigadores para lograr que los UAV en realidad maximicen sus capacidades y completen las misiones de cobertura. Las alternativas se pueden resumir en heurísticas, metaheurísticas, tales como optimización de colonia de hormigas u de enjambre de partículas, y consecuentemente en metaheurísticas multiobjetivo [18]. La selección del método depende del número de puntos a conectar en la ruta, los recursos del agente para recorrerla y las restricciones de orden computacional que pueda tener una misión de cobertura.

### 2.1.3. Sistemas Multi-UAV

La mayoría de los investigadores coinciden en que un sistema de múltiples agentes puede realizar tareas de manera más eficiente que un solo, además que este tipo de sistemas incrementa la robustez, y regularmente distribuye la tarea para disminuir la complejidad. Tal precepto aplica para cualquier agente físico de diversas formas, tamaños y capacidades, tales como vehículos aéreos no tripulados, vehículos terrestres no tripulados, vehículos acuáticos no tripulados, humanoides y otros que hayan sido habilitados para cooperar entre sí y con los humanos, con el fin de realizar con éxito tareas complejas [19].

En particular, los vehículos aéreos no tripulados o drones son aeronaves propulsadas, sin piloto o pasajeros, que pueden operar remotamente o de manera autónoma debido a sensores, microprocesadores u otros dispositivos electrónicos [20]. Su operación además está reglamentada por la mayoría de los países tanto para uso civil como militar, clasificándolos en diferentes categorías [21], de las cuales la categoría de Micro Vehículos Aéreos (MAV), encuentra un abanico de aplicaciones comerciales en la mayoría de los casos con aquellos basados en múltiples rotores, denominados robots aéreos; ya que presentan mejor estabilidad, modelado físico sencillo y fácil maniobrabilidad. Las principales áreas de uso son en agricultura de precisión, monitoreo de la infraestructura, entrega de paquetes, y publicidad.

Dentro de las tendencias para operar los vehículos mencionados, se encuentran los sistemas multi-UAV, los cuales se caracterizan por seguir arquitecturas de agentes que describen la interacción entre ellos, la robustez y la escalabilidad de la flota. Las arquitecturas para un sistema multi-UAV se denominan centralizadas, jerárquicas, descentralizadas e híbridas. La arquitectura centralizada evolucionó a partir de sistemas de un solo UAV y se implementó para tecnología de enjambre de UAV. Cada UAV forma una relación de uno a uno con la infraestructura y recibe directamente los comandos de control. Es relativamente estable, adopta algoritmos de enrutamiento más simples y tiene una escala más pequeña. Cuando el tamaño del enjambre de UAV y el área de cobertura de la misión es reducida y la misión relativamente sencilla, este tipo de arquitectura es adecuada. Suelen ser imprácticas ya que hay una gran vulnerabilidad al tener un solo punto de falla, además se dificulta la comunicación estable en tiempo real porque no tiene una frecuencia ajustable para cada agente individual. En las arquitecturas jerárquicas cada agente supervisa las acciones de un grupo pequeño de agentes, este grupo supervisa otro grupo y así en adelante hasta alcanzar la tarea asignada. Esta arquitectura escala mejor que la centralizada, sin embargo, en el control de fallas no se puede volver a los agentes de las capas altas del árbol. Las arquitecturas descentralizadas son las más comunes para sistemas multi-UAV ya que cada participante toma acciones basadas en el conocimiento local de su contexto en

---

tiempo real, eliminando la dependencia a la infraestructura y las restricciones del rango de comunicación. Pueden ser robustas a las fallas, sin embargo, la resolución de una tarea es compleja puesto que la meta global debe estar incorporada en el control local de cada UAV. Finalmente, las arquitecturas híbridas superan las dificultades de la arquitectura descentralizada combinando el control local y el control de alto nivel para llevar a cabo metas globales, planes o control de manera robusta [22].

Bajo las arquitecturas descentralizadas e híbridas los sistemas multi-UAV tienen dos retos principales para desplegar misiones de cobertura de área: asignación de tareas y comunicación explícita. Para la asignación de tareas, el objetivo es el mapeo de las tareas de los multi-UAV correspondiendo con las necesidades de tal manera que el costo sea mínimo. Se realiza tomando en cuenta factores como la sensibilidad al tiempo y la tolerancia al retraso, los lugares específicos para cumplirlas y demás. Las estrategias de asignación de tareas se clasifican con respecto a las aplicaciones consecuentes, como búsqueda y rescate, vigilancia, búsqueda de alimento, formación, seguimiento de objetivos, manipulación cooperativa y exploración. La evaluación de las estrategias de asignación de tareas está basada en la optimización de la solución, el tiempo de asignación y las restricciones del problema [23].

La comunicación es necesaria para llevar a cabo soluciones globales coherentes, esto implica obtener información del estado o acciones de sus compañeros. Y respecto a la comunicación se encuentra que las arquitecturas basadas en infraestructura no son adecuadas para sistemas multi- UAV, dado que los agentes son móviles y se someten a una topología rápida de cambios. La solución conceptual es una red Flying Ad-hoc (FANET), la cual, transfiere datos a la estación base independiente, dentro del rango de comunicación e infraestructura de manera inalámbrica, ya sea directamente o utilizando nodos intermedios [24]. Su velocidad es muy variable, desde ser estático en la cobertura aérea o en los nodos de la red de transmisión, hasta volar a grandes velocidades en tareas de búsqueda y rescate. Es importante resaltar que los nodos tienen la capacidad de poder moverse en las tres dimensiones espaciales con total libertad de movimiento y pueden rotar independientemente en los tres ejes (balanceo, cabeceo y guiñada). Los nodos FANET vuelan a una altura considerable, lejos de posibles reflejos que pueden originarse en el suelo, edificios u obstáculos. Además, suele haber línea de visión (LoS) entre los nodos interconectados. Debido a la posición de los nodos, se pueden distinguir dos tipos de enlaces con diferentes características: un enlace que conecta dos nodos voladores (UAV-a-UAV o U2U) y un enlace que conecta un UAV volador y un nodo terrestre (UAV-a-Tierra, UAV-a-BS, o U2G).

## 2.2 Estado del Arte

En esta sección se presenta en principio resultados del mapeo sistemático siguiendo la metodología de Petersen, et al. en [25] que ubica la investigación respecto a publicadores, temáticas y autores principales. Después de esta contextualización, se describe los trabajos relacionados principales encontrados en el mapeo para los tres ejes temáticos de la tesis, concluyendo con el análisis de brechas y su correspondiente propuesta desde los objetivos desarrollados.

### 2.2.1 Mapeo Sistemático

Desde hace algunos años la agricultura y los UAVs se integran para lograr una aplicar la investigación en temas relacionados con actividades agrícolas, como el monitoreo de cultivos, estimación de rendimiento, evaluación de enfermedades y plagas, y riego/aplicación de fertilizantes. A pesar de esto, la mayoría de las investigaciones consideran un solo dron en la solución para la gestión eficiente de cultivos, señalando como reto principal la extensión de la autonomía de vuelo para alcanzar una mayor cobertura [26]. Para solucionar esto, se plantea la alternativa de usar múltiples UAVs cooperativos que realicen tareas individuales para cumplir una meta global. El alcance de la meta requiere por lo general de la planificación y ejecución de una misión de cobertura, que puede llegar a no cumplirse, si perturbaciones externas alteran la operación de cada agente.

Bajo este contexto se realiza una búsqueda general que permita mapear el estado del arte de la investigación, considerando la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la tendencia de investigación relacionada con los sistemas multi-UAV en agricultura?

La búsqueda se conduce bajo la ecuación de búsqueda, y los criterios inclusión y exclusión de la Tabla 1. Como resultado, se detectaron 347 publicaciones para el análisis.

Tabla 1. Búsqueda de trabajos relacionados

<b>Ecuación de Búsqueda</b>	multi-UAV OR fleet AND (MAV OR drone) AND path AND coverage AND (surveillance OR remote sensing OR search) AND (agriculture OR crop)			
<b>Criterios de Inclusión</b>	Publicaciones 2017-2022	Revisión, Artículos, libros o capítulos, tesis y memorias	Agentes físicos - robóticos	Simulaciones y ambiente real
<b>Criterios de Exclusión</b>	Teledetección satelital	Redes de sensores inalámbricos - WSN	Cobertura persistente	Multiagente con aprendizaje por

				reforzamiento
--	--	--	--	---------------

De acuerdo con la ecuación de búsqueda y a los criterios del mapeo sistemático, se inicia el descubrimiento de patrones y seguimiento de la evolución de los trabajos relacionados a través del análisis bibliométrico.

### *Publicaciones*

Los resultados están basados en Web of Science [27] y VOSviewer [28], los cuales describen que del total de trabajos mapeados, un gran porcentaje son publicados por la biblioteca digital de IEEE superando incluso a publicadores no clasificados correspondiente al 20% (Figura 1). Es para denotar que el siguiente mayor porcentaje se lo lleva MDPI, que da cuenta de la relevancia de las publicaciones de acceso abierto en la temática de investigación evaluada. Más allá y aunque con porcentaje menor aparece la base de datos Wiley Online Library dentro los cinco principales publicadores.

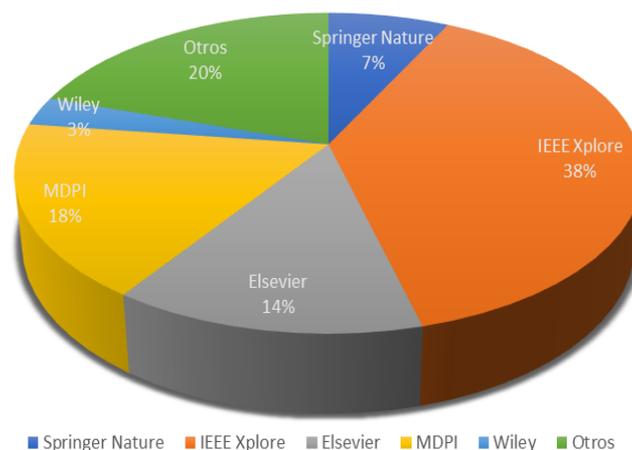


Figura 1. Mapeo de Publicaciones

El mapeo de publicadores se enlaza con los hallazgos respecto a las 7 revistas que más publican del tema de la Figura 2. Como se puede observar IEEE Access tiene la media representativa más alta, seguido por la revista Drones que en el presente año va tomando la ventaja. La revista Sensors también ha hecho contribuciones representativas sin embargo su existencia sólo se percibe desde 2021. Es posible denotar que, en este ranking de revistas, son las de acceso abierto las protagonistas y que la temática toma relevancia a partir del año 2019.

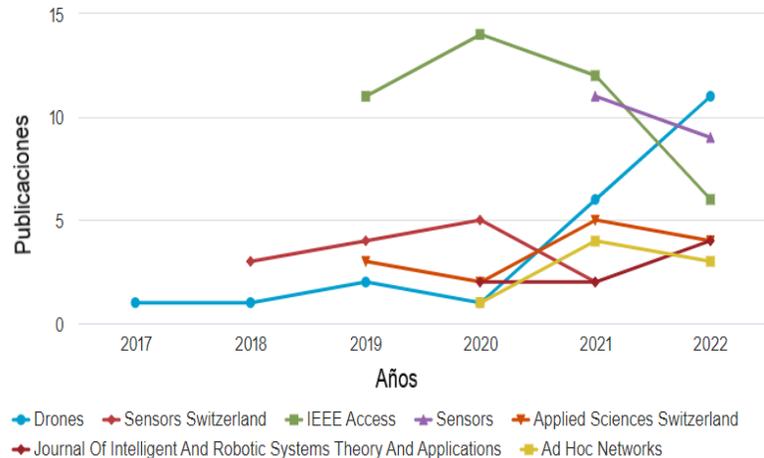


Figura 2. Mapeo de principales revistas y publicaciones por año

### *Autores representativos*

El mapeo de acuerdo con la Figura 3, ubica Chen Jy su equipo con la mayor contribución, seguido del grupo liderado por Wang Y. En el mapeo se encuentran otros equipos importantes y con aportes más recientes como es el caso de Wang W y Zhou H, aunque el número de publicaciones es similar autores no conectados como es Ollero y Xu Y. En particular las publicaciones del autor representan método de asignación de tareas y sólo en algunas publicaciones enlaza arquitecturas de redes de UAVs. En contraste Ollero trabaja la temática desde el dominio de aplicación, por lo cual integra más diferentes componentes de las FANET para requerimientos en agricultura y ordenamiento territorial. Los autores más recientes se enfocan en la ver las flotas de UAV como redes de nodos que son o hacen parte de infraestructura para la interconexión con otras redes inalámbricas.

### *Palabras clave*

Con el mapeo de los principales autores y su aporte a través de los años, se puede realizar el mapeo de las temáticas que se han considerado como lo muestra la Figura 4. Las temáticas más relevantes asocian los términos relacionados a vehículo aéreo no tripulado, que en conjunto con optimización, redes y diseño conforman la mayoría de las técnicas depositadas en los documentos encontrados. Sin embargo, las temáticas más recientes se asocian a gestión y asignación de tareas, diseño de trayectorias de vuelo y despliegue. Este resultado es coherente con el enfoque de aplicación en agricultura, ya que con la base tecnológica existente asociada a algoritmia, optimización y redes ad-hoc se debería avanzar en la gestión de recursos de los UAV y la tolerancia a fallos cooperativamente.

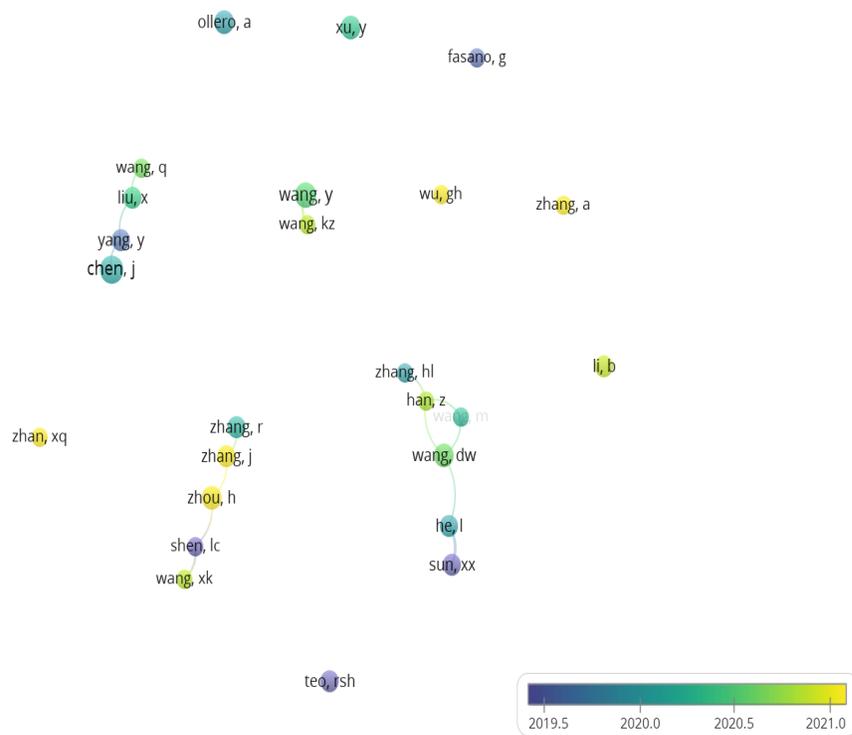


Figura 3. Mapeo de Autores

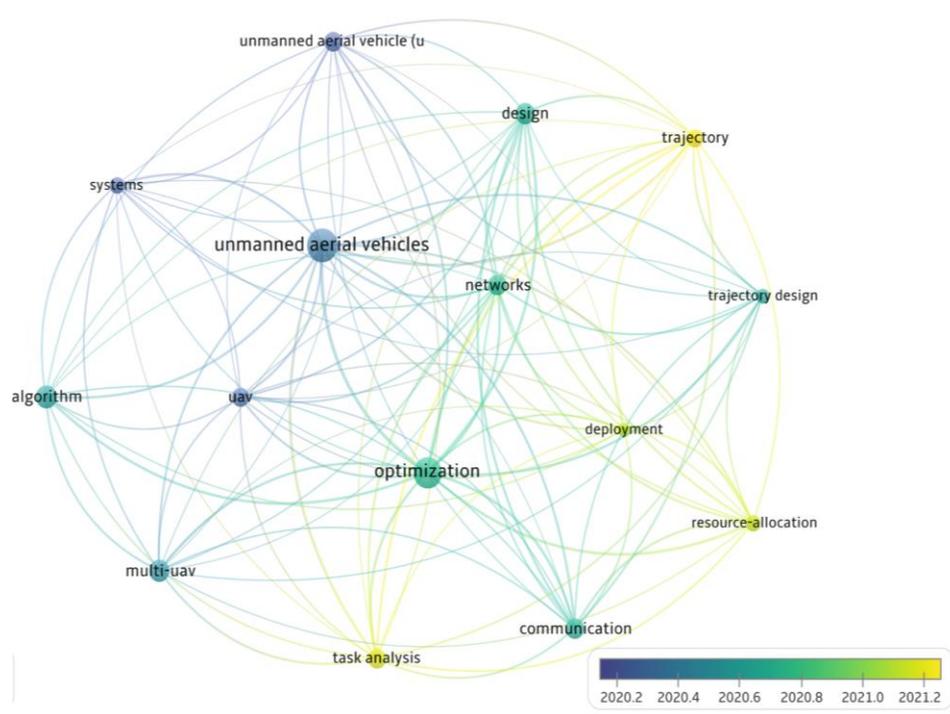


Figura 4. Mapeo de palabras clave

## 2.2.2 Revisión Sistemática

Conforme al análisis del mapeo sistemático se establecieron tres temáticas principales para profundizar con el ánimo de encontrar las propuestas metodológicas que contribuyan al desarrollo de los objetivos. Las temáticas que se describe a continuación son: asignación de tareas de cobertura para una flota de UAVs, comunicación en redes ad-hoc de UAVs y resolución cooperativa de fallos en una misión de cobertura de área.

### 2.2.2.1 Asignación de tareas de cobertura para una flota de UAVs

La siguiente clasificación trata de agrupar la mayoría de las estrategias en línea de tiempo, con métodos específicos para abstracción del mundo, división de áreas y distribución de tareas. Todo bajo el principio de que la asignación de tareas debería considerar eficiencia energética.

#### *Asignación de tareas de cobertura basada en polígonos*

Uno de los trabajos pioneros en este tema se encuentra en [29]. En este, se trata un problema respecto a la búsqueda cooperativa en áreas, considerando la complejidad computacional requerida para su implementación en aplicaciones de tiempo casi real. Luego, Maza y Ollero definieron una descomposición poligonal de la región, donde cada dron es asignado a uno de los polígonos resultantes por un coordinador en tierra, con base a puntuaciones deterministas. Para optimizar la trayectoria de cobertura del UAV, se propuso minimizar el número de giros durante un patrón en zigzag, utilizando la dirección de barrido óptima (líneas de vuelo) del MAV de ala fija para vigilancia.

Respecto a soluciones en 2D para optimizar líneas de vuelo, el trabajo [30] es representativo para ilustrar el tema. Valente dividió el espacio de trabajo en celdas como una cuadrícula. Luego, planificó las subáreas con la mejor aproximación al segmento de línea mínimo. La planificación fuera de línea considera las limitaciones inherentes a un ráster y otras restricciones que se deben tener en cuenta al optimizar. Para calcular las rutas de cobertura, se planteó una heurística de frente de onda extendida sobre un grafo, el cual es generado por la adyacencia de la vecindad. Sobre las tareas, los autores propusieron realizar negociaciones entre agentes, basados en un mecanismo de subasta sólo al inicio de la misión de cobertura. Continuando en la línea de cobertura óptima con MAVs, los autores en [31] descompusieron el área observada como una cuadrícula regular, y la partición del área fue realizada en segmentos verticales iguales. Para encontrar la dirección de barrido óptima y las trayectorias con pocas líneas de vuelo, el área fue rotada hasta encontrar las mejores condiciones. Compararon los patrones de espiral, Zamboni y cortadora de césped para calcular las trayectorias de cobertura. Las

---

trayectorias se complementaron con las curvas Dubbin con el fin de optimizar la energía del agente.

En los anteriores trabajos no fueron incluidos mecanismos de coordinación para la misión de cobertura; sin embargo, en [32] se propuso un algoritmo de coordinación uno a uno para la partición de áreas en misiones de patrullaje, en donde se consideraba limitaciones de la comunicación. Esta estrategia descentralizada tenía como objetivo minimizar el tiempo de actualización de la misión; cada MAV intercambiaba información liviana con los vecinos. Propusieron una descomposición rectangular y técnicas de reasignación utilizando enlaces cercanos de forma iterativa. Los recursos de comunicación también fueron abordados por Balampanis et al. en [33]. Los autores describieron un novedoso algoritmo para misiones de cobertura heterogénea en regiones costeras no convexas con ZLIs. Se trató de la utilización de la Triangulación de Delaunay Restringida para representar el espacio de trabajo, las trayectorias eran espirales centradas en la primera celda etiquetada para un algoritmo mejorado de frente de onda. Las subregiones se calcularon en función de las capacidades del MAV y de una posición inicial definida; Después, se ajustaron las trayectorias cooperativamente para resolver situaciones de bloqueo. Las instancias SITL de Ardupilot validaron los resultados usando el middleware de ROS.

En propuestas recientes, la partición de áreas tiene una relevancia para las aplicaciones marítimas, como [34]. El trabajo utilizó un algoritmo de descomposición de polígonos para realizar una cobertura de búsqueda completa. La estrategia fijaba las posiciones de inicio en el borde para dividir el espacio de trabajo a través de segmentos de línea que resultaba en áreas, cada segmento se optimizó con un mecanismo de "ángulo máximo-mínimo". Los resultados numéricos mostraron el rendimiento y la complejidad computacional del algoritmo propuesto. La ruta de cobertura era un patrón de búsqueda de barrido paralelo que se mejoraba disminuyendo los giros y la distancia recorrida. En [35] se encontró un enfoque crítico para las misiones de vigilancia. Dividieron el área de interés dado el número de MAVs, los requisitos del sitio a cubrir y la posición inicial de cada MAV. La trayectoria de cobertura era un patrón de ida y vuelta con una separación transversal determinada. El novedoso método de partición se basó en un grafo dirigido sobre las subregiones obtenidas mediante una triangulación de Delaunay restringida. Cada subregión se ajustó con un pseudo-sitio para iniciar la misión, la asignación de trayectorias se centralizó y se consideraron unos pocos giros. Finalmente, en [36] se presentó una propuesta generalizada de la descomposición de polígonos para cualquier agente robótico. La base de la propuesta consistía en dividir un polígono en dos partes para unos requisitos de área dados en función del perímetro de la parte correspondiente. El algoritmo continuaba hasta dividir los espacios de trabajo en el número dado de vértices en el borde del polígono (puntos de inicio).

### *Asignación de tareas de cobertura basada en agrupamiento*

Los planes de cobertura basados en agrupamiento consisten en dividir el espacio de trabajo en subáreas homogéneas que podrían ser heterogéneas si existen ZLIs. Como ejemplo, en [37] se descompuso el área total utilizando el algoritmo genético K-means, el cual, calculó las rutas de cobertura para cada grupo, y asignó un único MAV a cada uno. Propusieron dos variantes del método para rutas de cobertura offline y online, y el análisis se hizo para áreas de tamaño pequeño, mediano y grande. De forma similar, en [38] se desplegó una misión de reconocimiento de área con una planificación offline y una replanificación parcial online. La planificación previa se basó en el algoritmo de cobertura de árbol de expansión; a continuación, se ejecutó un algoritmo de agrupación difusa llamado C-means para calcular las rutas múltiples y las subáreas correspondientes. El objetivo de la replanificación en línea era distribuir las tareas en caso de fallos del MAV.

Leng et al. en [39] presentaron una nueva propuesta para optimizar las trayectorias y maximizar la visibilidad del terreno considerando las oclusiones naturales en los bosques. Los autores cambiaron la abstracción tradicional de la cuadrícula por las celdas de Voronoi para representar los puntos a visitar. Cada MAV fue asignado a un grupo de celdas de Voronoi para llevar a cabo la vigilancia. La trayectoria de cobertura de cada MAV se calculó con un algoritmo personalizado de alternancia de espirales. Siguiendo el equilibrio entre áreas y trayectorias, en [40], la misión de cobertura se definió resolviendo el Problema del Vendedor Viajero Múltiple (m-TSP). En primer lugar, se generaron subáreas libres de colisiones mediante el algoritmo de intercambio a $\beta$ . En segundo lugar, se actualizaron las subáreas para encontrar la partición que minimiza la trayectoria más larga de los MAV.

Inspirado en el algoritmo denominado "Clustering by the Fast Search and Find of Density" (CFSFDP) [41]. Las regiones se clasificaron en grupos y se obtuvieron rutas óptimas aproximadas punto a punto para los UAV. Los UAVs simulados eran heterogéneos por su velocidad de vuelo, suministro de energía y ancho de barrido de los sensores a bordo. La trayectoria de cobertura se calculó bajo la formulación de programación minea mixta, aunque los puntos de ruta se visitaron de forma eficiente con estrategias de optimización complementarias. La solución incluyó la política de "más cercano a cualquiera" para clasificar las regiones no asignadas en grupos y una estrategia de optimización para ajustar el orden de visita de las áreas clasificadas en el mismo grupo, lo que resulta en una reducción del tiempo de tarea de los MAV.

Con un enfoque más sofisticado, en [42] se modeló una flota de MAVs conducidos por inteligencia artificial para inspeccionar zonas urbanas. La propuesta mezclaba Redes Neuronales Artificiales y una versión modificada del famoso algoritmo A\* para resolver la planificación de rutas de cobertura. El espacio de trabajo se agrupó

---

combinando K-means y los Diagramas de Voronoi para lograr una distribución homogénea. Los resultados con diferentes áreas complejas se calcularon en el simulador Gazebo utilizando el marco ROS.

### **2.2.2.2 Comunicación en redes ad-hoc de UAVs**

En esta temática, la principal rama de trabajos se encontró en el concepto de FANET, definido desde mediados de 2014 [43]. Las FANETs en aplicaciones de cobertura incluyen frecuentemente espacios de trabajo al aire libre, lo que significa entornos complejos y grandes, aumentando la probabilidad de misiones incompletas. A partir de este marco, se buscaron referencias para superar el desafío sobre los espacios físicos y la dinámica de los MAVs, considerando el enrutamiento de datos y el mecanismo de movilidad. Ambos se agrupan en modelos basados en la exploración y en modelos basados en la planificación. Un modelo de comunicación basado en la exploración puede aplicarse a misiones de detección de enfermedades en zonas específicas o a la búsqueda de animales; en este los MAVs se mueven aleatoriamente. Por el contrario, un modelo basado en planes tiene UAVs con rutas definidas para cubrir áreas; es apropiado para aplicaciones como teledetección, vigilancia o patrullaje.

#### *Modelos de comunicación basados en exploración*

Los autores que han trabajado este tipo de modelos enfocan la misión de cobertura centralizada en una GCS y en espacios de trabajo conocidos; pero incluyendo la eficiencia energética mediante el control de potencia de transmisión y el ajuste de la ubicación enmarcado por la teoría de juegos [44]. La eficiencia energética es un requisito para operar múltiples MAVs, por lo que las restricciones de movimiento son comunes para modelar interacciones como en [45], que optimizó el recurso para controlar la topología usando un algoritmo tolerante a fallos basado en el grado de libertad de movimiento de los nodos. El artículo asumía una red de malla isomórfica y proponía predecir la localización del UAV para obtener el mejor k-salto en una red bi-conectada.

Un método para mantener la topología y distribuir solicitudes de reclutamiento también fue encontrado en [46], donde se apoya el proceso de eliminación de parásitos en los cultivos. La investigación probó mecanismos reactivos y proactivos para enrutar mensajes de ayuda, considerando una topología de red almacenada, y el nivel residual de pesticida relacionado con otros drones. En los mencionados métodos de enrutamiento, la operación realista es difícil de optimizar, por ejemplo, una de las restricciones a tener en cuenta es el retraso en el intercambio de paquete (delay). Para ello, en [47] se propuso un enrutamiento basado en clusters, donde los miembros del cluster fueron elegidos de acuerdo con el mínimo retardo con la

cabeza del cluster. Además, las posiciones de los UAVs fueron optimizadas para cumplir con las restricciones de retardo y maximizar la eficiencia de la cobertura. La cabeza de clúster disponía de recursos informáticos como Mobile Edge Computing para procesar los datos. Otra restricción es el rendimiento máximo, que según [48] es posible garantizar la transmisión de mensajes mediante una convergencia centralizada de los UAV, con un enrutamiento eficiente utilizando la búsqueda A\* y técnicas criptográficas. Del mismo modo, se encontraron otras heurísticas para enrutar los mensajes como en [49], que utilizó el algoritmo Bat bajo un mecanismo jerárquico para lograr eficiencia con respecto a la vida útil de la red, el consumo de energía y el tiempo de construcción de clústeres. Pero un simple camino más corto puede no ser suficiente para el balance energético de la movilidad y comunicación de los UAV, por lo que en [50] se propuso una estrategia para determinar una ruta que disminuyera los mensajes de control indeseables en la red basada en un ángulo de reenvío. La solución gestiona el siguiente salto con mejor nivel de energía y utiliza la fuerza de la señal para lograr una alta conectividad. Otra solución por encima de la heurística se encontró en [51], con un protocolo llamado COCOMA propuesto para reducir la energía total. COCOMA mostró una razón de entrega de paquetes optimizado en más de un 22% comparado con el protocolo SP-GMRF; todo ello basado en la gestión del retardo, el número de saltos y el rendimiento de la red.

Las métricas mencionadas son conocidas como requisitos de QoS (Quality of Service) en un modelo de comunicación que varían según la aplicación. En ese orden, los autores en [52] propusieron QoS basado en restricciones de latencia y ociosidad para capturar periódicamente datos de localizaciones de detección de forma almacena-y-avanza. La herramienta utilizada para el desarrollo fue GUROBI (optimization solver) y el mecanismo puede ser aplicado en cualquier grafo como abstracción del mundo. Se espera una mejor QoS con la tecnología 5G, y algunos investigadores avanzan con bancos de pruebas para arquitecturas FANET. Como ejemplo, en [53], los UAV y una GCS estaban equipados con puntos de acceso 5G, y toda la información intercambiada pasaba a través de un nodo 5G. Los objetivos eran mantener la formación en línea recta y en polígono evitando obstáculos. La misión contó con el apoyo de operadores.

### *Modelos de comunicación basados en planificación*

Este tipo de modelo exige un mayor equilibrio entre la misión de cobertura y la conectividad de FANET que los modelos basados en exploración, ya que aumenta el riesgo de misión incompleta. Por lo tanto, alternativas eficientes de planificación de rutas son comunes y frecuentemente se unen a arquitecturas de comunicación basadas en roles. Como ejemplo, en [54] se utilizó un rol llamado UAV relé integrado en una optimización de enjambre de partículas (PSO) para calcular la secuencia

---

óptima de comandos de control. Los autores implementaron dichos UAVs de retransmisión múltiple para intercambiar información entre ellos a través de saltos simples y múltiples bajo un enfoque centralizado. Otro enfoque basado en PSO, fue llamado dPSO-U, pero para calcular movimientos en escenarios post-catástrofe fue encontrado en [55]. El objetivo era intercambiar información ligera sobre la localización, para explorar un área con la máxima conectividad y tiempo para cubrir a las víctimas.

La restricción de la conectividad entre agentes por causa de la energía limitada de los MAVs se puede soportar en infraestructura terrestre como en [56]; que utilizó una red de sensores inalámbricos terrestres para recoger datos con una cobertura planificada y reenviarlos a una GCS. El sistema propuesto definía un diseño de trayectoria del UAV para la transmisión de datos basado en la altitud de vuelo, velocidad del UAV, las características de la antena y la longitud de los paquetes transmitidos. Los autores también sabían si un paquete estaba dañado o se había perdido, ya que era necesario demostrar la integridad de las visitas a las estaciones base. De forma similar, en una granja camaronera, la conectividad se apoyó en nodos inalámbricos fijos para realizar las mediciones de la calidad del agua [57]. Los datos perdidos se trabajaron a partir de un enrutamiento multi-trayectoria hacia un único destino al denominado gateway o punto de acceso.

En [58] se describe una forma de conseguir una cobertura completa de drones y conectividad. El trabajo presentó una solución para el problema de asignación de misión y gestión de topología en FANETs. Utilizan un mecanismo basado en roles, denominado MCFO, para alternar entre la realización de misiones y la retransmisión de datos como respuesta a los cambios en la topología de la red. Estos cambios suponen un riesgo en las misiones y cuando se detectan, los agentes deben solicitar ayuda. Para tratar con el riesgo los autores de [59] propusieron una estrategia de reclutamiento sobre enrutamiento bioinspirado para MAVs equipados con una batería, un tanque de pesticida, un módulo inalámbrico, y un pack de sensores para la detección dinámica de infestaciones. El intercambio de datos se basaba en la inundación para elegir el siguiente movimiento y reclutar a otros drones en caso de necesidad de ayuda. La resolución del riesgo se ha tratado con algoritmos de consenso como en [60]. La alternativa denominada algoritmo de agrupamiento basado en consenso (G-CBBA) que puede reducir el número de mensajes mediante la formación de grupos en la red con una comunicación intermitente. En correspondencia, en [61] se encontró una alternativa intermedia para hacer frente a la inundación de mensajes y al limitado intercambio de datos. Scherer y Rinner minimizaron la ociosidad de la información y limitaron la latencia mediante una cobertura planificada que reunía a dos UAV en un rango de comunicación. Los datos se envían de un UAV a otro, que viaja por una ruta de latencia mínima entre los UAV y una GCS como destino. En este enfoque, los vehículos aéreos no tripulados se

dirigen a la GCS mediante el método de almacenamiento y reenvío, y el tiempo de transmisión de datos se gestiona esperando al vehículo aéreo no tripulado precedente. Otra alternativa para conseguir eficiencia con los modelos de comunicación es predecir la posición de los UAV en el espacio de trabajo, como se explica en [62]. La investigación trabajó con un mecanismo basado en roles para tener una estrategia de reenvío de datos que ahorre energía. Cuando un nodo iniciaba la transmisión, todos los nodos actuaban como nodos de retransmisión para ayudar al enrutamiento.

### **2.2.2.3 Resolución cooperativa de tareas en una misión de cobertura de área**

Los trabajos relacionados a continuación se agrupan de acuerdo con la restricción para abordar la resolución de tareas de cobertura. La clasificación de trabajos para resolución cooperativa se delimitó para sistemas multi-UAV con énfasis en el dominio de aplicación para espacios de trabajo al aire libre como bosques y cultivos.

#### *Resolución de tareas basadas en técnicas de optimización*

En esta categoría se encuentra un trabajo en 2013 relevante por tener la misma abstracción de la misión que la presente propuesta. En [63] plantean un sistema multi-UAV para vigilancia persistente que considera la naturaleza estocástica del entorno conducente a fallas en los vehículos en un enfoque híbrido jerárquico descentralizado que combina técnicas de planificación de misión con semi-heurísticas basadas en probabilidad colectiva para abordar el caso de replanificación. El mecanismo está centrado encontrar eficientemente el dominio de cobertura para cada UAV. En adelante se encuentran sistemas multi-UAV con la optimización de la replanificación como en [64], que bajo un método de predicción del gasto energético según las condiciones ambientales, se produjo la replanificación on-line. Las metas no visitadas se repartieron entre los integrantes de la flota de acuerdo con posiciones y energía disponible. Los puntos distribuidos fueron visitados conforme al algoritmo A\* y el planificador a bordo fue el encargado de calcular la energía y el tiempo requerido para la replanificación. En este trabajo el espacio de trabajo es dividido en celdas hexagonales y es sometido a patrones de viento para simular la necesidad de replanificación. Los resultados numéricos la capacidad de reducir el consumo de energía frente a otros enfoques.

A diferencia de los trabajos previos en [65] plantean un paso previo a la replanificación, con el uso de un modelo de control predictivo en el que los UAV comparten las rutas las trayectorias en cada interacción para resolver posibles conflictos durante la misión. Los resultados de simulaciones numéricas muestran demuestran la factibilidad de resolver y ajustar las rutas, sin tener en cuenta el retardo de comunicación y la turbulencia por condiciones dinámicas del ambiente.

Esta interacción se torna importante para la resolución no solo de conflictos, sino también de tareas como se plantea [66], en el que extendieron el algoritmo Consensus-based bundle algorithm (CBBA) con capacidad de replanificación local basada en un conjunto de restablecimientos programados para añadir nuevas tareas a la responsabilidad del UAV. Los resultados demuestran la factibilidad del método para resolver rutas en un tiempo óptimo durante una misión en comparación con otros algoritmos.

### *Resolución de tareas con comunicación limitada*

En esta categoría se continua CBBA marcando tendencia, ya que la abstracción del método permite refinar y plantear soluciones adecuadas para las aplicaciones con comunicación limitada. Este es el caso de [67], en el que los autores introducen la asignación de tarea de manera asíncrona para reducir la complejidad computacional y los tiempos de comunicación entre UAVs. Los resultados evidencian la factibilidad y la reducción de comunicaciones en la etapa de consenso del algoritmo. Con el mismo algoritmo [60] mejoran la eficiencia de comunicación en la etapa de consenso por lograr una iteración anidada entre el consenso local y global. En este trabajo también fue mejorada la propagación de ofertas innecesarias sin degradar la convergencia al consenso. El algoritmo también fue extendido para resolver múltiples tareas con restricción de acoplamiento para aplicaciones de búsqueda y rescate [68]. El nuevo algoritmo intenta que las tareas asignadas tengan acoplamiento con los perfiles de vehículos heterogéneos. Los resultados demuestran la efectividad de la asignación con diferentes topologías de red y con diferentes ventanas de tiempo.

Un enfoque diferente fue publicado en [69] con el que se pretendía generar rutas de vuelo libre de colisiones basándose en la partición del espacio tridimensional usando la partición de Voronoi. Las simulaciones numéricas demuestran la convergencia rápida hacia soluciones y el complemento de las curvas de Bézier aseguran cumplir con las restricciones de colisión.

## **2.2.3 Brechas de investigación**

De acuerdo con los trabajos relacionados expuestos en la sección precedente se exponen a continuación las brechas identificadas para cada temática.

### **2.2.3.1 Asignación de tareas de cobertura para una flota de UAVs**

La revisión previa de las técnicas de asignación de tareas para sistemas multi-MAV que deben cumplir con misiones de cobertura, señaló que la distribución de tareas basada en geometría computacional es más frecuente que las otras dos. El

resultado podría analizarse porque el trabajo práctico requiere frecuentemente de personal de campaña e infraestructura en el campo; por tanto, los escenarios simulados y/o experimentos con pocos agentes podrían acelerar y abaratar las pruebas. El alcance de los métodos basados en polígonos es optimizar la división de áreas con ZLI, pero no incluyó características de interacción entre agentes.

La estrategia de agrupamiento resultó en un enfoque para desplegar una cobertura óptima con una posible colaboración entre agentes; sin embargo, poco se profundizó en la heterogeneidad y consumo de energía. En resumen, pocos trabajos alcanzan el equilibrio de recursos entre la asignación de tareas y los desafíos de comunicación desde la etapa de planificación de la cobertura. Además, ninguno de los resultados encontrados incluye las expectativas del usuario para el despliegue de una misión con una flota de MAVs.

### ***2.2.3.2 Comunicación en redes ad-hoc de UAVs***

Los trabajos clasificados arriba mostraron coincidencias en la coordinación jerárquica, el enrutamiento basado en almacene-y-envíe y un esfuerzo por la eficiencia en la conectividad. Sin embargo, los modelos basados en la exploración tendieron a transmitir datos en multi-trayectoria para sostener convergencia bajo alta conectividad. Y los modelos basados en la planificación conducen a un alto procesamiento y almacenamiento en los UAV para el enrutamiento y gestión de riesgo, además la dinámica de los espacios de trabajo no fue tomada en cuenta. Desde lo anterior, es necesario encontrar un equilibrio de energía y robustez entre la conectividad para gestionar el intercambio de datos durante las misiones sobre el terreno, que tienen un riesgo inherente de cobertura incompleta por perturbaciones o fallos internos.

### ***2.2.3.3 Resolución cooperativa de tareas en una misión de cobertura de área***

De los trabajos detallados en esta temática se puede resumir la implementación de dos etapas que incurren en la resolución de una tarea o conflicto la negociación y la replanificación. La replanificación es una estrategia que se asume por cada agente para aportar a la resolución de una tarea cooperativa y es por eso por lo que esta etapa está enfocada en los esfuerzos de optimización de recursos. Por parte de la negociación, el factor de la calidad en las comunicaciones se asume durante la negociación, buscando ganar rendimiento en la transmisión de paquetes y en la pertinencia de la tarea a subastar. En este sentido ambas etapas son implementadas en agentes son simulados, asumiendo que tengan capacidades cognitivas y de almacenamiento sin restricción, por lo cual las propuestas que demuestran eficiencias en energía y en tiempos de resolución se debilitan puesto que un despliegue realista de estas estrategias no solo exige reducción de complejidad en la negociación y en la planificación para que en misiones de cobertura efectivamente se garantice energía para resolver tareas no completadas.

## 2.3 Resumen

En este capítulo se definieron los fundamentos teóricos de esta tesis y se abordaron trabajos relacionados a tres temáticas principales como la asignación de tareas de cobertura para una flota de UAVs, comunicación en redes ad-hoc de UAVs y resolución cooperativa de fallos en una misión de cobertura de área. Para llegar a tales enfoques, se retomaron los resultados del mapeo sistemático mediante el cual se indagó en los aportes de los investigadores más destacados, considerando la tendencia a la adaptación de avances en algoritmia y optimización para gestionar las tareas de múltiples agentes. Consecuentemente se abordan las temáticas seleccionadas mediante la clasificación de técnicas y posteriormente se describen las brechas que se abordaran en los siguientes capítulos.

# Capítulo 3. Asignación de Tareas de Cobertura para un Sistema multi-MAV

En este apartado se describe el método planteado para el primer objetivo considerando que inicialmente se validará el modelo de agentes MAV para avanzar con certeza a una implementación más próxima a la realidad. El primer ítem plantea la abstracción del sistema multi-UAV que se continuará manejando en la tesis. Se prosigue con la descripción del método llamado MCO, y se abordan las herramientas de modelación y asignación de tareas en GSC. Se despliegan experimento y se describen los resultados a través de métricas que se enfocan en medir la eficiencia energética para comparar con otros métodos de asignación basados en polígonos, ampliamente estudiados en la literatura.

## 3.1 Modelo del sistema Multi-MAV

El objetivo es obtener información remotamente de un campo agrícola utilizando múltiples MAV, buscando que los datos adquiridos correspondan con el área de interés. Para llevar a cabo esta meta, se trata con el problema de planificación de cobertura completa con múltiples MAVs habilitados en comunicación para cooperar. El despliegue de la misión considera un grupo de MAVs heterogéneos y un área poligonal conocida, que representa un espacio de trabajo restringido. El espacio de trabajo se divide en subáreas correspondientes a los MAV y tiene zonas de bajo interés (ZLI) como en la Figura 5.

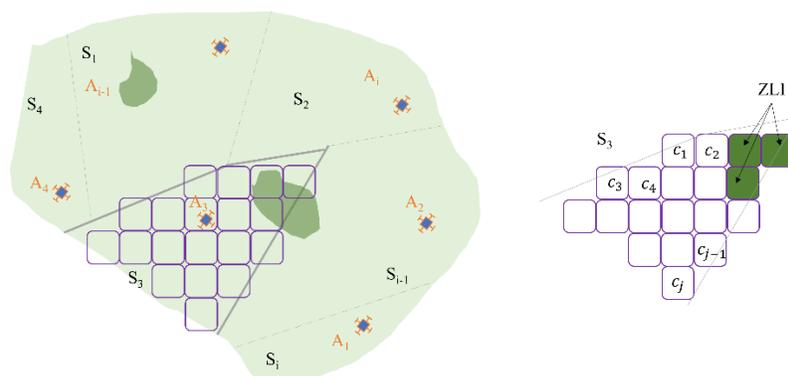


Figura 5. Modelo de planificación de cobertura

Sea  $A_1, A_2, \dots, A_n$  un grupo de  $n$  agentes MAV para realizar la misión de cobertura.  $S$ , el área de cobertura total, y cada subárea es un conjunto de celdas. Entonces  $S_1, S_2, \dots, S_i$  son subáreas de  $S$ , donde  $S_i$  se asigna a un agente MAV  $A_n$ . En la figura

5, cada subárea  $S_i$  se compone de celdas lo más cercanas posible al tamaño de la huella del sensor remoto del MAV, lo que se denomina abstracción del mundo.

Cada MAV se modela como un agente con habilidades para moverse, percibir su estado, el entorno, seguir un plan, alcanzar un objetivo, interactuar y adaptarse a un comportamiento. Se modelan bajo la arquitectura de control Creencia - Deseo - Intención (Belief – Desire - Intention, BDI) [70], y la interacción entre ellos se basa en protocolos FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) [71].

En la arquitectura de control, las creencias están relacionadas con predisposiciones durante la ejecución de una tarea. Pueden actualizarse según cambios en el entorno o eventos internos; luego el agente MAV debe verificar cada creencia bajo reglas lógicas del autoconocimiento y la tarea asignada. En este documento, el agente MAV debe alcanzar un solo objetivo siguiendo un plan. El plan considera las intenciones y deseos para definir acciones, que se definen bajo una misión de cobertura. Como ejemplo, se puede creer que el agente está en el objetivo de la tarea (At\_target). El MAV debe verificar cada creencia bajo reglas lógicas del autoconocimiento y la tarea asignada que lo lleven a convertirse en un deseo, que podría ser regresar a casa (Return\_home). Pero un agente no puede alcanzar una meta sin un plan. La biblioteca de planes considera las intenciones y deseos para definir las acciones que van a afectar el medio ambiente. Del ejemplo, es el momento cuando el deseo se convierte en intención, y por tanto un vuelo de crucero podría ser el plan para alcanzar un único objetivo. La Tabla 2 describe cómo las creencias se convierten en acciones de los agentes MAV usando los pasos 1 a 5 después de establecer cualquier creencia. En resumen, una creencia motiva un deseo; entonces, cuando el deseo establece una meta se adopta una intención. La intención conlleva a ejecutar un plan y luego acciones.

Tabla 2. Reglas para el control BDI

Pasos		Creencia			
		On takeoff	See neighs	Receive msg	At target
1	<b>Deseo</b>	Go on a path	Send a message	Read message	Return to home
2	<b>Meta</b>	Do a complete path	Update fleet state	Update fleet state	State inactive
3	<b>Intención</b>	Go on a path	Send a message	Read message	Return to home
4	<b>Plan</b>	Follow path steps	Interaction as priority	Interaction as priority	Go to the setpoint
5	<b>Acción</b>	Move to next waypoint	Transmit message	Reply message	Fly as cruise mode

El sistema para desplegar sigue los siguientes principios:

1. El área de cobertura total es conocida y debe tener una extensión al menos tres veces mayor que la distancia nominal recorrida por un solo agente MAV.
2. Los Zbl se pueden identificar en S. Las celdas correspondientes a ZLI no se deben considerar en la ruta asignada. Portanto, cada An sólo debe recorrer las celdas libres  $c_j$  de cada Si (Figura 7).
3. Todos los agentes MAV en la misión tienen la misma altura y velocidad de vuelo. En la práctica, no sucederá, pero el interés actual está restringido a la cobertura bidimensional y las velocidades de crucero pequeñas.
4. Una subárea Si correspondiente a cada agente MAV no puede separarse ni cruzarse con otra subárea, para evitar colisiones durante la misión.
5. El número de agentes MAV y el área de cobertura, los fija el usuario. La planificación de la cobertura debe hacerse con los MAV disponibles sin obligar al usuario a realizar una inversión mayor.
6. Existe al menos una estación de control en tierra (GCS) para monitorear a los agentes. Con frecuencia, la estación estará cerca de edificios o suministro eléctrico.
7. La heterogeneidad de los agentes MAV está dada por el adecuado tiempo de vuelo, capacidad de decisión y habilidades de comunicación.
8. Los agentes MAV tienen el mismo sensor remoto como carga útil. La carga útil es el sensor remoto decidido por el usuario de obtener datos relacionados al negocio correspondiente.
9. Cada An debe tener capacidades de comunicación básicas para interactuar. La habilidad de conectividad es necesaria para posibles tareas cooperativas.
10. Los An y la estación de tierra tienen los mismos módulos de comunicación con antena omnidireccional, lo cual define el máximo rango de transmisión
11. El intercambio de datos sólo sucede cuando dos agentes se encuentran espacialmente en un rango definido.
12. Una alerta se genera por uno o más agentes que no puedan continuar con su tarea de cobertura. Lo cual genera riesgo de incumplir con la misión general.

### **3.2 Diseño del Método: *Plan MCO***

El plan diseñado comienza tomando en cuenta el área de cobertura conocida (ráster georreferenciado) con ZLI, la cantidad de MAV disponibles, el resumen de MAV y los parámetros del sensor remoto. Por ende, el resultado son roles asignados y tareas de cobertura a seguir. Es importante tomar en cuenta que el enfoque esperado con un plan para asignación de rutas de cobertura debe ser escalable y

cercano a óptimo, buscando un equilibrio entre la heterogeneidad y la conectividad. Para alcanzar ese objetivo, cinco componentes para la planificación de la misión de cobertura se representan en la Figura 6 y se describen a continuación.

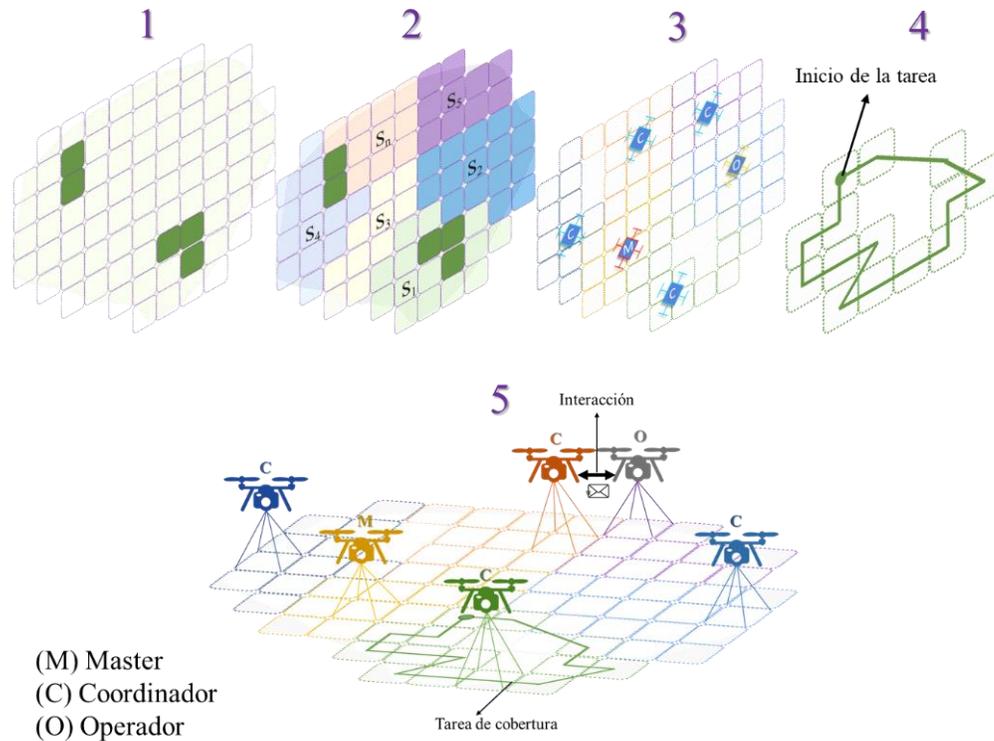


Figura 6. Componentes del plan MCO

### 3.2.1 Abstracción del mundo.

El primer paso en el plan de cobertura es definir cómo el agente MAV observa el mundo. Para ello, la abstracción del mundo considera un agente MAV para adquirir información remota (a través de cámaras, escáneres, etc.). Este tipo de información útil proyecta una huella en el espacio de trabajo observado que define la forma de las celdas con las que se divide el área. Cada centro de celda es un punto de referencia visitado por un agente MAV (Figura 7). De acuerdo con la especificación de la misión de cobertura, los centros deben estar lo suficientemente cerca como para llegar a superponerse en más del 60%, según los fundamentos fotogramétricos. El tamaño de celda se calcula con  $L_x$  y  $L_y$  a partir de la ecuación (1), donde  $h$  Es la altura de vuelo,  $\alpha$  es el ángulo de visión desde el sensor y el tamaño de la imagen se define mediante  $I_x$  y  $I_y$ . La huella final viene dada por  $L_x(1-p)$  y  $L_y(1-q)$ , donde  $p$  y  $q$  son porcentajes respectivos (0 a 1) de superposición longitudinal y transversal.

$$L_x = 2 * h * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), L_y = L_y\left(\frac{L_x}{L_y}\right) \quad (1)$$

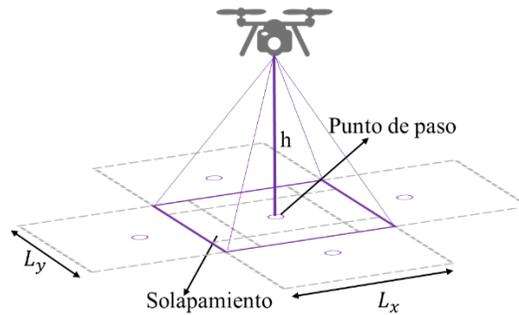


Figura 7. Huella del sensor remoto y solapamiento

Algunas áreas del espacio de trabajo original no podrían incluirse en la cuadrícula rectangular, pero si es el caso, la celda debe reducirse tanto como lo permita la aplicación. La abstracción del mundo se implementa en cuatro pasos: se carga un ráster georreferenciado, luego el usuario identifica las áreas de cobertura (coberturas), y un ráster con territorios reconocidos es segmentado. El procesamiento de imágenes extrae los ZLI del ráster como en [4].

### 3.2.2 Partición de área

El enfoque para la partición del espacio de trabajo es cómo dividir los puntos a visitar correspondientes al número de MAV. Para esto, se analizó que la asignación de tareas se puede clasificar como poligonal, mecanismo que utiliza segmentos en la geometría del área, lo que da como resultado subáreas heterogéneas, mientras que la distribución basada en agrupamientos tiende a la homogeneidad. Los representantes de la partición basada en poligonales pueden ser el enfoque Boustrophedon[72] y Voronoi-tessellation[73], y para la partición basada en agrupamiento puede ser el algoritmo K-means [74]. La Figura 8 muestra la partición por segmentos, el agrupamiento y la teselación de Voronoi como un ejemplo para cuatro agentes MAV.

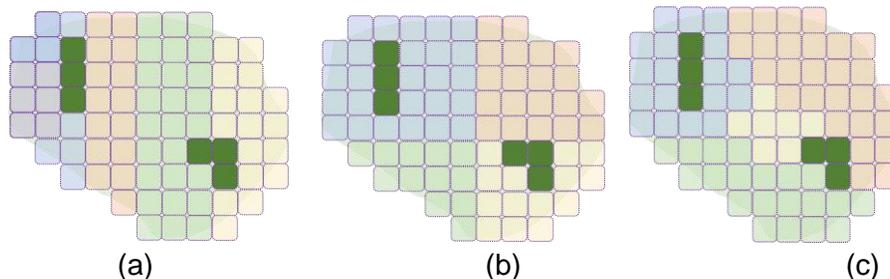


Figura 8. Técnicas de partición de áreas (a) segmentos, (b) agrupamiento y (c) Basada en Voronoi.

La figura 8(c) muestra la descomposición de Voronoi como el candidato inicial para esta investigación dado que la complejidad computacional puede volverse menor que el método de agrupamiento; las áreas para conectar con los vecinos son más que otras en algunos trabajos relacionados.

Pruebas previas plantearon que, con frecuencia, la partición basada en Voronoi da como resultado divisiones heterogéneas. Sin embargo, esa heterogeneidad es para números pequeños de flotas de MAVs; el resultado obtenido puede volverse homogéneo si el número de MAVs aumenta. Por tanto, en la investigación actual se propone una extensión para conservar la heterogeneidad y resolver la generalización de la descomposición de Voronoi. Las fases de la nueva partición se describen a continuación:

**Fase I:** Se debe seleccionar una ubicación de despegue, llamada  $p_0$ , para generar los centroides de la teselación de Voronoi (podría ser el centro del área de cobertura). Otros centroides se centran en  $p_0$  y siguen una circunferencia como en la Figura 9. El radio de la circunferencia se calcula dividiendo el ancho medido del espacio de trabajo entre el número de agentes MAV,  $n$ . La distribución de los centroides iniciales  $p_1, p_2, \dots, p_{n-1}$  dentro de la circunferencia es aleatorio.

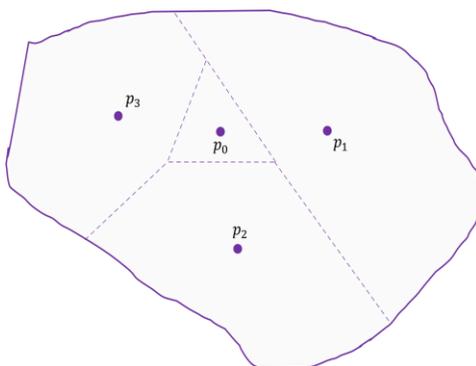


Figura 9. Partición base

Sin embargo, después de calcular la primera teselación de Voronoi, algunas particiones para más agentes MAV pueden convertirse en una distribución homogénea. Con el fin de resolver este problema, se diseña un mecanismo determinista sobre la partición base que satisface el siguiente postulado.

*Postulado 1: Una partición base puede tener entre dos y cuatro divisiones. Por lo tanto, una sola subárea puede tener hasta tres subáreas vecinas.*

**Fase II:** si los agentes MAV a implementar son más de cuatro ( $n > 4$ ), los centroides de la partición base se redistribuyen en función del centroide  $p_i$  de la subárea más grande detectada ( $p_1$  es la subárea más grande en la Figura 13). El centroide se

mueve un tercio del radio más cerca al punto de partida de la partición base. En consecuencia, la subárea seleccionada se vuelve más grande después de volver a ejecutar la descomposición de Voronoi.

Las siguientes subáreas resultan de dividir el área más grande usando el método de la Fase I. A continuación, el número de centroides secundarios se actualiza para obtener las subáreas requeridas (Figura 10). El resultado de la Fase II se denomina Subpartición, la cual satisface el siguiente postulado.

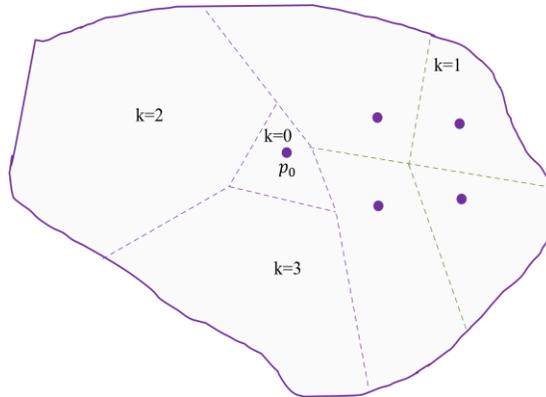


Figura 10. Subparticiones

*Postulado 2: Una subpartición puede tener entre dos o más subáreas. Luego, si  $n > 4$ , el número de divisiones por una subpartición es  $(n-3)$ .*

**Fase III:** se ejecuta un proceso iterativo para obtener Subparticiones siguiendo el postulado 2. El movimiento del centroide secundario de la subárea más grande concierne al centroide  $p$  más cercano, y el ciclo continúa para completar la división del área hasta 16 subáreas. Según el enunciado del problema para las misiones de cobertura, el máximo de 16 se define como suficientes agentes MAV considerando la posible inversión de un agricultor. La implementación de más de 16 MAVs puede ser una gran inversión compleja de mantener. Sin embargo, la escalabilidad es esencial para la investigación; por lo tanto, la última fase se propone a continuación.

**Fase IV:** si los agentes MAV a desplegar son más de dieciséis ( $n > 16$ ), el número de divisiones para el área completa,  $S$ , se calcula por múltiplos de 16. Es decir, el número de  $p_0$  a localizar es el cociente entre  $n$  y 16 más 1 ( $\frac{n}{16} + 1$ ), llamado  $v$ . Para cada nuevo  $p_0$  se aplican las Fases I, II y III, para completar un nivel de partición. Cada nivel de partición se centra en un nuevo  $p_0^v$  (lugares de despegue) como el que se muestra en la Figura 11, que satisface el siguiente postulado.

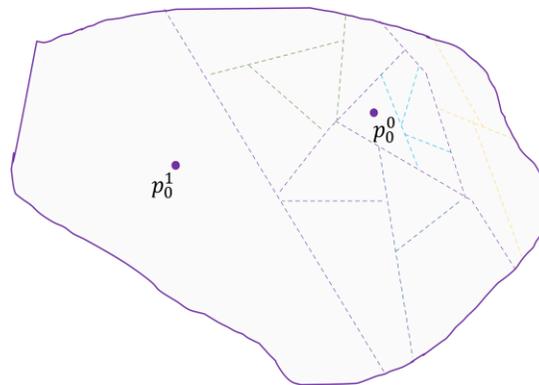


Figura 11. Representación de dos niveles de partición

*Postulado 3: Un nivel de partición puede tener hasta 16 subáreas. Luego, un nuevo nivel de partición es generado cuando  $v \geq 1$ .*

### 3.2.3 Asignación de roles

La mayoría de los trabajos sobre despliegue de misiones de cobertura describen solamente el método para asignar subáreas. No obstante, la presente propuesta está proyectada para agentes MAV con interacción durante las misiones. En consecuencia, el plan propuesto crea roles con el fin de definir un comportamiento del modelo de agente, creando una coordinación jerárquica. El modelo no está diseñado para conectividad continua ya que provocaría exceso de consumo de energía. Entonces, la estrategia para administrar la energía de la flota durante la misión considera conectividad parcial con pocos vecinos (en un tiempo restringido), es decir, cada agente MAV solo puede interactuar cuando vecinos están dentro del rango definido.

El modelo jerárquico tiene tres roles, Máster, Coordinador y Operador, para gestionar la heterogeneidad y la conectividad de la flota, de acuerdo con los puntajes de capacidad de tiempo de vuelo, comunicación y decisión. El Master debe tener puntaje alto en decisión y comunicación, y puntaje bajo en tiempo de vuelo. Los coordinadores deberán tener puntaje medio en decisión y tiempo de vuelo, y puntaje alto en comunicación. En caso de que un Máster falle, los coordinadores deberán apoyar las decisiones. Los operadores deben tener una puntuación baja en decisión y comunicación, y una puntuación alta en tiempo de vuelo.

El rol del Master es único para un nivel de partición. El rol podría tomar decisiones principales para completar la misión y debería ser el más cercano a una estación terrestre (en relación con la ubicación del despegue). Un agente Master debe tener una ruta de cobertura corta para ahorrar energía para transmitir y recibir mensajes de los coordinadores. El rol de coordinador es para un agente MAV que funciona

como enrutador de comunicación entre Operadores y Master. Un Coordinador puede tomar decisiones secundarias, y su ruta de cobertura debería ser intermedia. Los coordinadores son los cuatro agentes más cercanos al Master. Finalmente, el rol de Operador es quien tiene el trabajo duro en la cobertura de las subáreas periféricas, que suelen ser las más grandes. A continuación, en la Tabla 3 se resumen las especificaciones de los roles solicitados para cubrir cada subárea y las posibles interacciones. Estas restricciones determinan los recursos que se deben solicitar a los agentes MAV para una misión de cobertura. Los roles descritos son el resultado del método de partición de áreas, como ejemplo, la Figura 12 muestra cada rol en un área bajo el método de partición propuesto. Para evitar una posible sobrecarga de transacciones en la red, se propone que el número de vecinos por cada rol sea de cuatro (como consecuencia de las fases de partición).

Tabla 3. Roles para un nivel de partición

Rol	Subárea asignada	Interactúa con
Master	Subáreas más cercanas al lugar de despegue	Coordinadores y otros Master
Coordinador	Subáreas más cercanas al Master	Master, operadores y otros coordinadores
Operador	Subáreas alrededor de los coordinadores	Coordinadores y otros operadores.

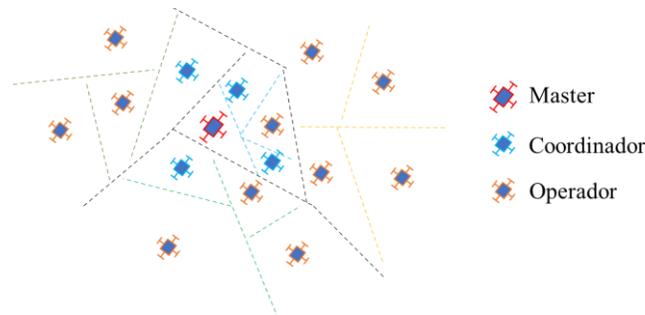


Figura 12. Jerarquía relacionada con un nivel de partición

### 3.2.4 Generación de ruta de cobertura.

Después de definir los requisitos para cubrir cada subárea, el siguiente paso es calcular la ruta de cobertura. El componente de generación de ruta asume que el agente MAV adquirirá datos mientras visita cada punto de ruta.

Las rutas de cobertura para los MAV son frecuentemente movimientos en zigzag o de cortadora de césped con mejoras en la orientación de la línea de vuelo y los giros

suaves para optimizar la tarea. Sin embargo, los movimientos en zigzag son indiferentes a las ZLIs, y pueden ser ineficientes dado que no consideran el regreso a casa como parte del camino. Por consiguiente, significa más tiempo de vuelo y alta redundancia considerando la planificación de la cobertura con los ZLI incluidos. Para poder superarlo, se deben considerar formas irregulares en los espacios de trabajo y un tiempo de ejecución práctico para calcular las misiones. Un tiempo de ejecución adecuado para el cálculo de las rutas de cobertura está en el rango de horas, ya que los despliegues prácticos pueden requerir implementaciones continuas.

La literatura describe alternativas para calcular los caminos de cobertura basados en heurísticas y metaheurísticas que resuelven el TSP. Algunas soluciones fueron previamente evaluadas para decidir cuál cumple con los requisitos anteriores. Las heurísticas como el frente de onda y el árbol de expansión son adecuadas para algunas aplicaciones con pocos puntos de vuelo; si el alcance aumenta, la optimización disminuye. Por su parte, las metaheurísticas encontradas se pueden clasificar como basadas en la trayectoria o basadas en población. Los primeros son casi óptimos, pero el tiempo de ejecución fue más significativo que las metaheurísticas basadas en población. Las pruebas de aquellos basados en población versus el movimiento en zigzag se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Metaheurísticas vs. Zigzag movimiento.

Metaheurísticas	Tiempo de ejecución (s)	Puntos visitados
AG	1998	150
PSO	112188	200
ACO	37	120
BCO	6542	184
CS	0.953	168
FA	0.038	101
Zigzag	0.025	111

Las puntuaciones utilizadas para comparar fueron el tiempo de ejecución del algoritmo, y los puntos visitados hasta alcanzar de nuevo el inicio (objetivo). Las pruebas son para un área de 100 celdas libres distribuidas homogéneamente, población inicial de 500 individuos y 5000 iteraciones. La Tabla 5 muestra los resultados de las rutas calculadas mediante el algoritmo genético general (AG), la optimización por enjambre de partículas (PSO), la optimización por colonia de hormigas (ACO), la Optimización por colonia de abejas (BCO), Búsqueda Cucú (CS)

y Algoritmo Firefly (FA). Denotando que FA [75] fue superior a los demás con menos puntos revisados y en menor tiempo.

### 3.2.5 Asignación de Tareas.

La asignación de tareas es el último componente del Plan MCO, el cual, busca que cada agente MAV obtenga un rol y una ruta de cobertura. Para desarrollar el método, el presente trabajo considera la taxonomía para la asignación de tareas de la referencia en [76]. La taxonomía resuelve problemas de múltiples robots relacionando el número de robots con el número y el periodo de las tareas. Por tanto, el problema actual es de tipo tarea única (ST); cada tarea puede ser realizada por un único agente MAV (SR), y se programa una asignación instantánea (IA).

La asignación de tareas adapta la Especificación del Protocolo de Interacción de Subasta Inglesa FIPA [77] como en la Figura 17. El iniciador es una estación de tierra, y los agentes MAV son participantes. El iniciador informa de la subasta y requiere la confirmación de los agentes MAV para conocer sus ofertas. La oferta de cada agente MAV se calcula con tres puntuaciones conociendo su puntuación sobre el historial de uso, las especificaciones de la batería y del módulo de comunicación, el tipo de piloto automático y la capacidad de procesamiento en una pequeña placa de ordenador. El iniciador toma la información del papel y el tiempo de vuelo para calcular las mismas tres puntuaciones. Ambos calculan tres características: tiempo de vuelo, capacidad de decisión y habilidades de comunicación, y el iniciador da un valor para los umbrales (resta de puntuaciones). La Tabla 5 presenta las fuentes de puntuación utilizadas en la ecuación (2) para cada puntuación.

$$puntuación = 3 * \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

Tabla 5. Puntuación de costo de tareas y ofertas

Parámetro X	Estación en Tierra	Agente MAV
<b>Tiempo de vuelo</b>	Tiempo estimado de cobertura	Tiempo estimado de batería
<b>Comunicación</b>	Posición inicial de cada camino respecto al área	Estimado a partir de la potencia del módulo de telemetría
<b>Decisión</b>	Posición inicial de cada camino respecto al área	Piloto automático y posible computador a bordo

Las puntuaciones van de cero (0) a tres (3), donde tres significa el número máximo de recursos. El iniciador rechaza a los participantes con ofertas más pequeñas que el coste de la tarea calculado y acepta las solicitudes superiores. También, el iniciador puede aumentar los primeros umbrales y volver a subastar en caso de que

haya varios agentes MAV con ofertas aceptadas. Para asignar la tarea al agente, se selecciona la mejor oferta. Cuando se asigna una tarea, el agente MAV seleccionado la guarda en la memoria y espera la llamada para iniciar el despegue. A continuación, el proceso de la Figura 13 vuelve a empezar para la asignación de otra tarea.

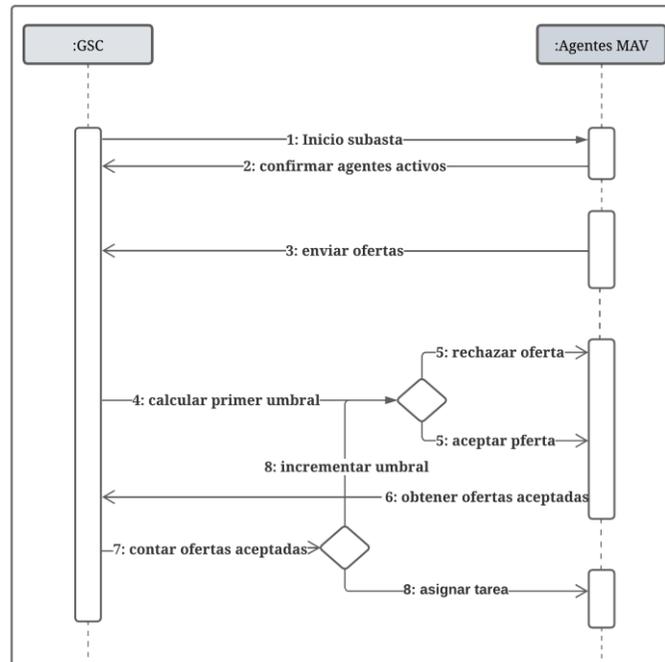


Figura 13. Método FIPA adaptado para asignación de tareas.

### 3.2.6 Herramienta para asignación de tareas

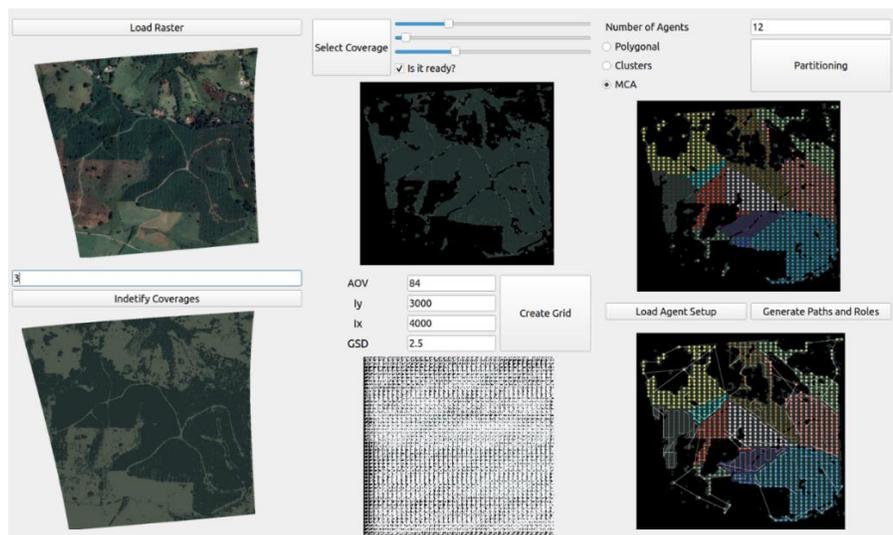


Figura 14. Herramienta desarrollada para asignación de tareas de cobertura.

De acuerdo con todos los componentes expuestos anteriormente, se desarrolló una herramienta para poder facilitar la integración con plataformas de simulación y para realizar seguimiento de los resultados esperados hasta la asignación de roles y rutas (Figura 14). Esta herramienta fue desarrollada en QT5 bajo Python 3.8 en sistema operativo Ubuntu 20.04, y permite cargar un ráster georreferenciado, segmentar las coberturas vegetales encontradas en el cultivo, seleccionar la cobertura que represente la zona de interés a cubrir y seguidamente fijar parámetros de sensor remoto para establecer las celdas rectangulares que determinaran la secuencia de la ruta a calcular. Cuando todo el proceso de abstracción se ha completado, se pasa a la partición y con ella los procesos necesarios para asignar a cada área un rol y una ruta. La asignación de tareas hacia agentes se realiza en el proceso de simulación. La especificación técnica de esta plataforma se encuentra en el ANEXO 1.

### **3.3 Herramienta para Modelar Agentes MAV**

Se encontraron diferentes alternativas para modelar agentes robóticos, algunas más citadas como NetLogo [78] y Repast Simphony [79], y otras como MAS-Planes [80] enfocadas únicamente a UAVs. Sin embargo, se requiere un motor físico y habilidades de comunicación para modelar MAV. Ambos factores se encuentran en la Plataforma GAMA [81]. La plataforma GAMA es un entorno de desarrollo para modelado y simulación de código abierto y para construir simulaciones basadas en agentes explícitos espacialmente. Ofrece la posibilidad de cargar y manipular datos SIG (Sistema de Información Geográfica) en los modelos y permite utilizar directamente un gran número de tipos de datos, ya sean archivos CSV, OSM, cuadrícula, imágenes, SVG, pero también archivos 3D, como 3DS y OBJ. Adicionalmente, presenta la posibilidad de conectarse directamente a bases de datos y utilizar herramientas y entornos externos como R. La presentación final del modelo usado en GAMA y las especificaciones de codificación se encuentran reportadas en el ANEXO 1.

### **3.4 Resultados y Discusión**

La validación de la propuesta se realizó utilizando tres espacios de trabajo diferentes con ZLIs ubicados en Cauca, Colombia. Se seleccionaron como áreas para posibles usos con múltiples drones (cultivos y zonas urbanas). Los casos de estudio fueron seleccionados para probar la eficiencia de tres mecanismos para planear una misión de cobertura en áreas con diferentes formas de ZLIs y número de puntos en

espacios libres. Tales variaciones impactan en la heterogeneidad de tareas y la capacidad de conectividad de la flota. La Figura 15(a) es la finca Rejoya con 70 Hectáreas, tiene espacio libre en el centro y algunas áreas separadas, y es el espacio de trabajo más grande. La finca Los Naranjos en la Figura 15(b) con 27 Hectáreas tiene un área libre pequeña, pocas ZLI en el borde y es el área más pequeña. Y la Zona Urbana en la Figura 15(c), con aproximadamente 54 Hectáreas, tiene el espacio libre más amplio y una ZLI grande en el borde.



Figura 15. Espacios de trabajo seleccionados en Cauca, Colombia (a) finca La Rejoya (b) Zona Urbana y (c) finca Los Naranjos.

La Tabla 6 muestra el número de ZLI y el área de cobertura seleccionada usando la herramienta descrita previamente. El número de puntos a visitar se calculó de acuerdo con los parámetros de la cámara, como el ángulo de visión ( $87^\circ$ ), la resolución ( $4000 \times 3000$  píxeles), el GSD (2 cm) y la superposición (75 %). El número de subáreas mínimas y máximas calculadas se limitó a partir de la descomposición de Boustrophedon porque el método no permite seleccionar deliberadamente el número de áreas (dependencia de ZLI).

Tabla 6. Características de casos de estudio

Espacio de Trabajo	ZLI	Cobertura	Puntos	Subáreas (Min, Max)
Granja Rejoya	6	Cultivo de café	200	3.12

Granja Naranjos	3	Mezcla de cultivos	315	2.7
Zona Urbana	2	Lote de Construcción	870	3.10

Los siguientes resultados presentan las pruebas de desempeño usando la plataforma GAMA. Las pruebas se realizan respecto a las etapas propuestas del plan MCO, en concreto, la partición de áreas, la asignación de roles y tareas con un patrón en zigzag y las rutas generadas por el algoritmo Firefly. Cada enfoque se analiza para las misiones de cobertura resultantes del plan MCO, Boustrophedon y K-means. Para cada plan se prueba el alcance para gestionar la heterogeneidad y la conectividad. Con el fin de evaluarlas, se utilizan métricas como la desviación estándar, la tendencia de heterogeneidad, los MAV activos en el tiempo, la batería restante por agente y los vínculos probables entre vecinos.

La gestión de la heterogeneidad se considera el principal factor para la gestión eficiente de los recursos al trabajar con flotas MAV [82]. El Plan MCO define los MAV con tres características para manipular la heterogeneidad, el tiempo de vuelo adecuado, la capacidad de decisión y la habilidad de comunicación. Cada uno representa la principal fuente de energía residual para un MAV. El tiempo de vuelo adecuado depende de la batería y del uso; la capacidad de decisión depende de la carga útil para procesar datos a bordo; finalmente, la habilidad de comunicación puede cambiar por el módulo de telemetría y el soporte de flujo de datos. De ahí que la clave está en gestionar la heterogeneidad en las tareas para satisfacer el equilibrio de recursos de los agentes, entendiéndose como una efectividad equilibrada entre tres características.

La heterogeneidad considerada en esta investigación es una propiedad transparente para el usuario ya que es natural en despliegues prácticos con MAVs. Los usuarios pueden decidir la inversión en al menos un MAV equipado y algunos básicos, o bien adaptar capacidades para algunos MAV básicos, o como ideal tener todos los MAV equipados con altos recursos de procesamiento y comunicación. El usuario no debe limitarse a MAV homogéneos para la misión de cobertura, aunque deben ser adaptables y tener un sensor remoto igual.

Por otro lado, el Plan MCO implica la conectividad desde la planificación de la misión. El tema cobra importancia ya que la coordinación requiere interacción para solucionar fallas diagnosticadas durante el despliegue. La estimación de los recursos de comunicación en la misión de cobertura ayuda de manera eficiente a detectar eventos inesperados durante la misión. El Plan MCO desarrollado implica una comunicación explícita entre los agentes para monitorear las tareas asignadas y el estado del agente. La conectividad es parcial durante un corto tiempo mientras los vecinos más cercanos se encuentran dentro de un rango mínimo. Por lo tanto,

la idea es lograr que los agentes encuentren continuamente vecinos, pero interactúen con un gasto de recursos limitado.

### 3.4.1 Partición de área

En esta sección se muestra cómo la partición de áreas propuesta en el Plan MCO alcanza una heterogeneidad equilibrada de subáreas de cobertura. Las métricas para comparar el plan MCO con Boustrophedon y el plan basado en K-means son la magnitud y la tendencia de la heterogeneidad; ambas fueron analizadas en los espacios de trabajo seleccionados en el Cauca.

La Figura 16 muestra las subáreas resultantes de cada plan, y es la base para hacer un análisis cualitativo de la distribución máxima de puntos (última columna a la derecha en la Tabla 7), las cuales se agrupan por color para diferenciar las subáreas en cada cobertura. En la columna izquierda de la figura, la descomposición de Boustrophedon proyectó formas rectangulares verticales en todos los rangos, ya que esquinas de las ZLI se utilizan para segmentar la geometría del área. La agrupación por K-means en la columna central lanzó formas pentagonales. Las formas no regulares se obtienen con el Plan MCO en la columna derecha de la figura, ya que se basa en Voronoi que utiliza la intersección geométrica para generar las partes. En resumen, todas las proyecciones pueden cambiar geoméricamente cuando se incluyen ZLI en el espacio de trabajo, resolviéndose en subáreas heterogéneas.

El siguiente paso es el análisis cuantitativo de la magnitud de la heterogeneidad correspondiente a la desviación estándar. Entonces, si se compara la divergencia resultante para cada espacio de trabajo como en la Figura 21, es evidente que la partición basada en agrupamiento (línea roja) obtiene desviaciones menores que otros métodos. Por lo tanto, las subáreas homogéneas aumentan a medida que aumenta el número de agentes MAV. Por el contrario, la descomposición de Boustrophedon muestra la mayor divergencia para los tres casos de estudio, como se espera de la literatura, logrando una mejor habilidad de heterogeneidad que el plan MCO (línea amarilla).

En los resultados de la Figura 17, el plan MCO establece una desviación estándar máxima de 7.9% para la granja Naranjos, 9.2% para Zona Urbana y 7.5% para la granja Rejoya. Como se observa, el plan MCO alcanza valores medios entre la descomposición de Boustrophedon y el agrupamiento de K-means, aunque la tendencia no fue coherente entre ellos. Para profundizar en ello, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson entre los métodos tradicionales y el Plan MCO (Tablas 7 a 9) para detallar la tendencia de la heterogeneidad.

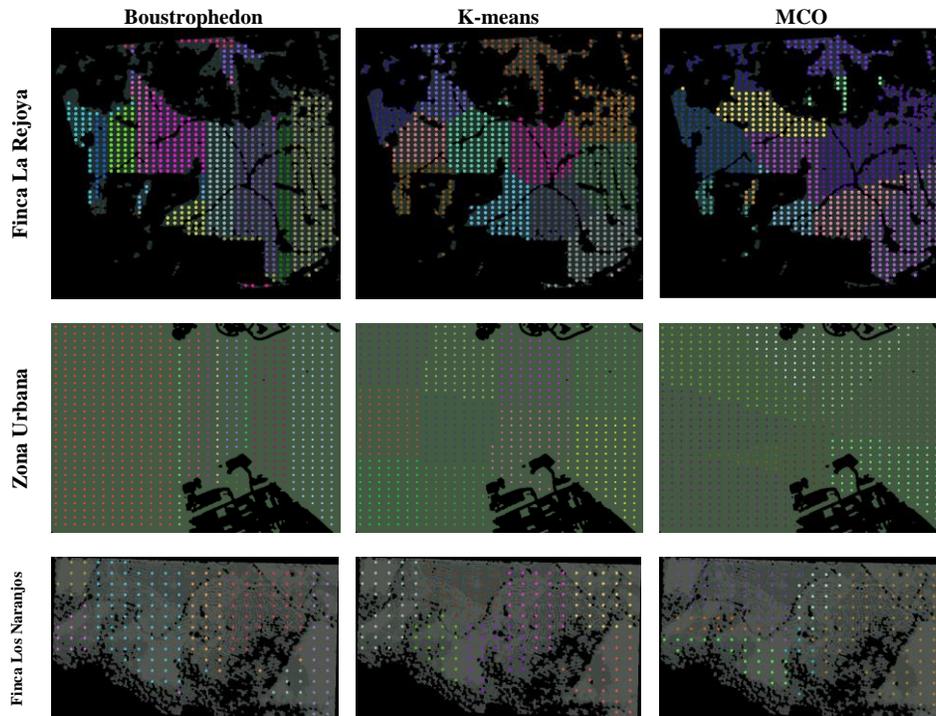


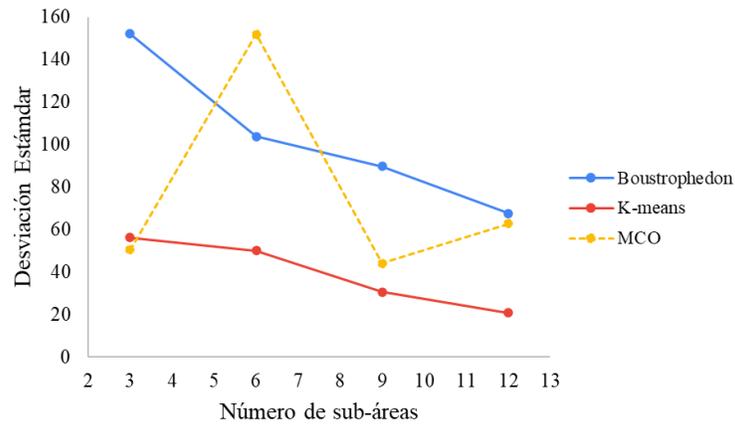
Figura 16. Partición del área de estudio

En resumen, las correlaciones son más altas mientras que el número de agentes es pequeño, como 2 o 3; es consistente porque, con menos subáreas, la heterogeneidad no es tangible.

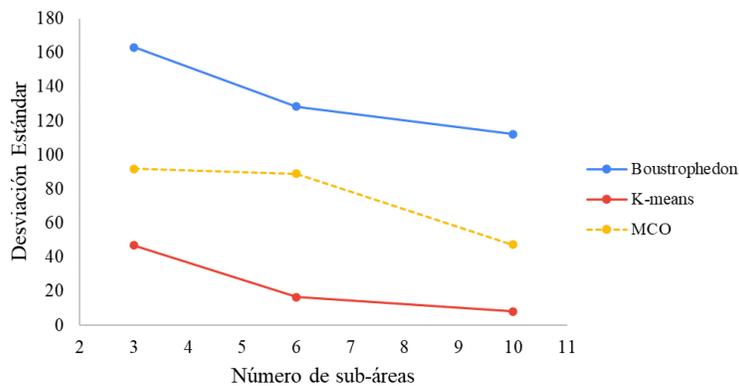
Mientras tanto, las correlaciones presentan que la partición del plan MCO está más cerca del patrón de K-means en la mayoría de los casos de estudio (Figura 20). Asimismo, en la Finca Naranjos (Tabla 9), las correlaciones son mayores que en otros espacios de trabajo, incluso con asociación perfecta. El resultado está dado por el amplio espacio de trabajo que fuerza la similitud de las áreas. Otro factor podría ser las ZLI convexas no centradas, que restringen la capacidad de propagar subáreas hacia los bordes como propone el Plan MCO.

De acuerdo con las observaciones anteriores, la descomposición de Boustrophedon alcanza la mayor habilidad de heterogeneidad en los tres espacios de trabajo evaluados, con más de 100 puntos de desviación estándar. Sin embargo, las subáreas resultantes podrían volverse tan pequeñas o grandes como las ZLI lo permitan, lo que se considera una heterogeneidad desequilibrada. Por ejemplo, el plan basado en Boustrophedon para Rejoja (esquina superior izquierda de la Figura 20) tenía subáreas con solo tres puntos de paso y otras áreas veinte veces más grandes. En consecuencia, los recursos no se gestionan de manera eficiente porque, en primer lugar, pocos agentes MAV tienen mayores responsabilidades y pueden realizar una misión incompleta. Por otro lado, el requisito de tiempos de vuelo más cortos o largos obliga al usuario de invertir en MAV más calificados. Se

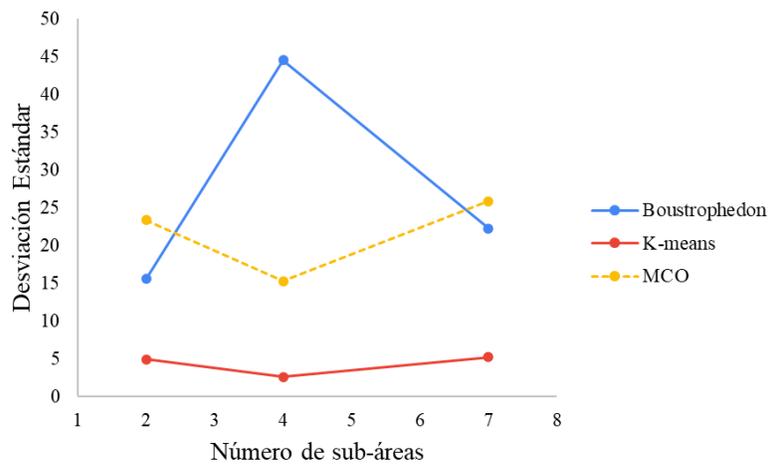
pueden realizar diferentes mejoras para lograr una heterogeneidad equilibrada con la partición de Boustrophedon como heurística, sin embargo, el esfuerzo tiene un límite debido a la heterogeneidad causada por los obstáculos, que consumirán más recursos computacionales para lograr una partición adecuada.



(a)



(b)



(c)

Figura 17. Análisis de heterogeneidad para cada espacio de trabajo. (a) Rejoja, (b) Zona urbana, (c) Los naranjos.

Tabla 7. Correlación entre MCO y otros métodos en la Rejoja.

Correlación	Número de agentes MAV			
	3	6	9	12
MCO vs. K-means	0.636	0.362	0.002	0.298
MCO vs. Boustrophedon	-0.472	0.476	0.045	-0.061

Tabla 8. Correlación entre MCO y otros métodos en zona urbana.

Correlación	Número de agentes MAV		
	3	6	10
MCO vs. K-means	0.999	0.233	-0.254
MCO vs. Boustrophedon	-0.967	0.104	0.315

Tabla 9. Correlación entre MCO y otros métodos en la finca los Naranjos.

Correlación	Número de agentes MAV		
	2	4	7
MCO vs. K-means	1.000	-0.690	-0.708
MCO vs. Boustrophedon	-1.000	-0.242	0.623

Las divergencias del plan basadas en K-means muestran los valores más bajos entre 2 y 50 puntos (líneas rojas en la Figura 17). A pesar de la baja magnitud, el método de agrupamiento se parece al patrón de descomposición de Boustrophedon, en el que se percibe una tendencia a disminuir la desviación para ambas estrategias. El patrón de Boustrophedon cambió notoriamente para un número menor de agentes como la Figura 17(c); lo cual podría ser el resultado de particiones dependientes de las ZLIs. Sin embargo, después de ocho divisiones, K-means disminuye linealmente la heterogeneidad; y la descomposición de Boustrophedon se estabilizará por los ZLI fijos en el espacio de trabajo. Por lo tanto, se indica que el Plan MCO involucra la habilidad de heterogeneidad como descomposición de Boustrophedon sin usar ZLI como referencia. Se compromete una disminución lineal sin llegar a la homogeneidad como K-means.

Además, en la Figura 16 es posible ver que el agrupamiento por K-means y la descomposición de Boustrophedon dieron como resultado subáreas desconectadas cuando las ZLI fueron complejas, como en la Finca Rejoya. No son deseables subáreas independientes para lograr apoyar el control cooperativo. El Plan MCO supera esa debilidad con subáreas que se expanden desde una posición de despegue hasta los bordes. Por lo tanto, las subáreas convergen, aumentando la probabilidad de una conexión entre ellas.

### 3.4.2 Asignación de roles y tareas con ruta en zigzag

La descripción anterior intentaba describir la heterogeneidad según el espacio de trabajo y su distribución de puntos bajo el principio de "divide y vencerás". Pero es necesario contrastar la partición del área con el comportamiento del agente MAV cuando se asigna una tarea de cobertura. Los siguientes resultados se obtuvieron utilizando el entorno de simulación (Plataforma GAMA) y según los mecanismos de asignación de roles y tareas descritos anteriormente. En este experimento, a cada agente MAV se le asignó una función y una ruta de cobertura basada en movimientos de ida y vuelta (una ruta en zigzag) utilizando el método de la Sección 3.2.5. Los resultados de las rutas zigzag por cada área de estudio se especifican en el ANEXO 2.

El objetivo es mostrar cómo el plan MCO puede lograr una mejor gestión energética durante una misión de cobertura utilizando una heterogeneidad equilibrada (magnitud y tendencia) y gestión de conectividad. Se calculan algunas métricas para medir el impacto de la heterogeneidad en cada espacio de trabajo y para los tres planes mencionados anteriormente. Las métricas son el tiempo que requiere cada flota MAV para completar la misión (tiempo de misión), la cantidad de agentes MAV activos por unidad de tiempo (tasa de MAVs) y el porcentaje de batería restante por agente después de terminar una misión (% de batería restante).

La Figura 18 establece la coherencia con la partición de cada plan. Teniendo en cuenta los tiempos de misión, la asignación basada en K-means tuvo los tiempos de misión más bajos. Aun así, áreas complejas como la finca Rejoya expandieron los tiempos de misión porque las subáreas resultantes pueden ser son amplias y homogéneas, como se muestra en la Figura 17(a). Por el contrario, para tener los mejores tiempos de misión, la asignación de K-means se basa en los agentes activos durante períodos más prolongados, como muestran las figuras 18(b), 18(d) y 18(f) en las columnas rojas. El resultado es que la mayoría de los MAV agotan la energía más rápido, lo que pone en riesgo la integridad de la misión de cobertura (Tablas 11, 12 y 13). Dado el caso que algún evento requiera cooperación, pocos agentes del MAV podrían apoyarlo.

Por su parte, la asignación basada en Boustrophedon denota una tendencia a estabilizar los tiempos de misión en cada caso de estudio en la Figura 17, lo que se

explica con las tareas resultantes alrededor de las ZLI. Luego, variaron poco y se resolvieron en tareas más livianas de acuerdo con el aumento de los agentes del MAV. Como ventaja, la asignación de Boustrophedon tiene la menor cantidad de MAV por unidad de tiempo, lo que es consecuencia de calcular muchas tareas pequeñas y solo tres o cuatro más largas, con tiempos de tarea más largos. La asignación de Boustrophedon transmite un mensaje de que la mayoría de los MAV podrían tener un exceso de energía significativo al final de la misión. Al mismo tiempo, una pequeña cantidad de los agentes MAV alcanzarían su límite de energía antes de que terminara la misión.

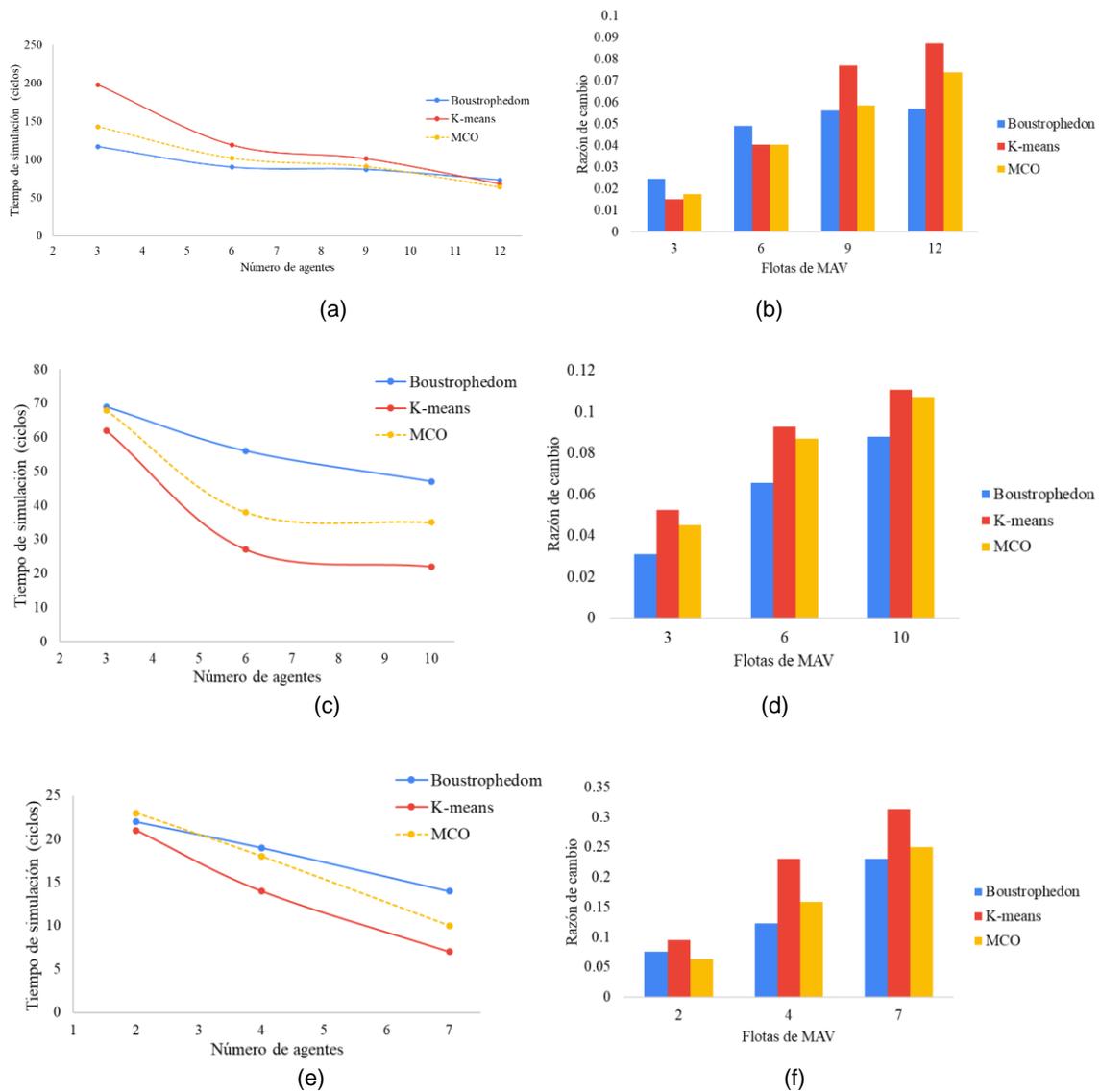


Figura 18. Tiempos de misión y tasa de MAV activos en misión: (a)(b) Rejaya, (c)(d) Zona urbana, (e)(f) Los Naranjos

Con respecto a las tasas de MAV en las Figuras 18(b), 18 (d) y 18(f), la asignación que utiliza el plan MCO tiene una tendencia a administrar agentes activos durante menos tiempo que la asignación de K-means, a pesar de la alta correlación demostrada en el apartado anterior. Este mecanismo se plantea porque el tamaño de las subáreas aumenta exponencialmente para el plan MCO, mientras que en la asignación de K-means, el crecimiento es lineal (compare las columnas amarillas en la Figuras 18(b), 18(d) y 18(e)). La interpretación del resultado es que el plan MCO puede equilibrar la gestión de misiones utilizando agentes MAV con recursos mínimos a intermedios, especialmente en aquellas misiones con pocas tareas, como se muestra en la Figura 18(f).

Las tablas 10, 11 y 12 muestran la batería restante después de completar la misión. Este indicador es esencial para la investigación actual porque permite que los MAV con habilidades intermedias cooperen con sus ahorros de energía. Los promedios obtenidos de energía ahorrada de todos los agentes para la Rejoja son del 90,77%, 87,76% y 89,93% con la asignación de Boustrophedon, K-means y MCO, respectivamente. En la Zona Urbana los porcentajes medios son 75.55%, 79.65% y 83.96%, correspondiendo con el último orden de métodos mencionado. En el mismo orden de formas, los porcentajes para los Naranjos son 75,33%, 86,83% y 86,96%. Por lo tanto, el plan MCO alcanzó valores más altos que otras asignaciones, distribuyendo los recursos de manera eficiente independientemente de las restricciones del espacio de trabajo. Además, la comparación de los métodos muestra una disminución de la batería sin superar el 40% para el plan MCO, mientras que Boustrophedon terminó con una reducción superior al 60%. Demuestra que el patrón de heterogeneidad identificado en la sección de partición del área influye efectivamente en la eliminación del consumo de energía de la flota de agentes MAV.

Tabla 10. Batería restante en la Rejoja.

# Agentes MAV	Boustrophedon (%)	K- means (%)	MCO (%)
1	99.98	93.46	99.47
2	99.98	93.52	97.44
3	99.62	93.2	95.9
4	99.5	93.22	93.88
5	97.2	93.82	93.49
6	96.7	91.3	92.55
7	93.26	90.9	85.83
8	91.49	88	86.83

9	89.20	83.23	84.07
10	88.83	82.31	84.08
11	66.88	79.28	83.09
12	66.61	70.83	82.52

Tabla 11. Batería restante en zona urbana.

# Agentes MAV	Boustrophedon (%)	K- means (%)	MCO (%)
1	94.01	84.87	94.63
2	92.6	83.81	92.03
3	91.57	84.17	91.94
4	86.59	82.11	89.53
5	86.54	79.95	86.35
6	81.57	79.31	86.03
7	77.93	79.4	85.82
8	71.05	76.63	79.72
9	43.39	73.38	69.65
10	30.24	72.87	63.87

Tabla 12. Batería restante en la finca Los Naranjos

# Agentes MAV	Boustrophedon (%)	K- means (%)	MCO (%)
1	89.92	87.91	89.11
2	89.33	87.38	89
3	88.85	87.35	88.25
4	66.33	86.81	87.38
5	66.2	86.17	87.33
6	63.74	86.13	85.51
7	62.96	86.07	82.18

Como inferencia final, un resultado del Plan MCO es que la mayoría de los agentes MAV tendrían suficiente energía restante para ser utilizada en caso de que se necesite cooperación para tareas no completadas.

La partición de áreas demostró anteriormente que la posibilidad de fallas sería mínima, a menos que existan causas ambientales. En cambio, la asignación de Boustrophedon obtiene un mayor caso de defectos en el despliegue de misiones al sobrecargar a unos pocos agentes. Finalmente, la disminución de energía para los agentes MAV con asignación de K-means es de hasta 22.63%, con una probabilidad de fallas menor que el método Boustrophedon y MCO. Sin embargo, el resultado estaría sujeto a agentes con niveles de recursos intermedios a altos y homogéneos para completar una misión.

### **3.4.3 Asignación de roles y tareas con ruta Firefly**

La gestión de recursos del plan propuesto en las secciones anteriores ilustró la ruta para implementar de manera eficiente la flota de MAV en el espacio de trabajo al aire libre, teniendo en cuenta algunos requisitos de los usuarios y el trabajo de campo. Sin embargo, la investigación actual desea avanzar en la gestión de la energía de la ruta de cobertura. Con base en la Sección 3.2.4 es posible optimizar las rutas de cobertura de la misión a través del algoritmo Firefly. La motivación para avanzar en el estudio se debe a que el movimiento en zigzag utilizado anteriormente y en la mayoría de las herramientas de mapeo revisadas se incluyen los ZLIs en el vuelo de crucero, adquiriendo posibles datos inútiles o redundantes para la toma de decisiones, además de incrementar los costos de procesamiento de datos. La asignación de tareas con este algoritmo Firefly se pueden evidenciar en el ANEXO 2.

La Figura 19 muestra que el consumo de energía puede mejorar con las rutas de cobertura calculadas con el algoritmo Firefly. En la finca Rejoya, la energía ganada alcanzó hasta un 10% (Figura 19(a)); en Zona Urbana, ganó hasta 2.5% (Figura 19(c)); y en los Naranjos, ganó hasta 1.9% (Figura 19(e)). Tal desempeño visto en las barras de las figuras es consistente con la heterogeneidad de la asignación de roles que se demostró arriba. Pero el algoritmo Firefly puede resolver tareas para pequeñas subáreas de manera más eficiente que el patrón en zigzag, ganando hasta algunos ciclos de tiempo para completar la misión. Como análisis complementario, las Figuras 19(b), 19(d) y 19(f) se muestran los promedios de los enlaces durante la misión. El Plan MCO tiene un mayor número de probables enlaces por unidad de tiempo, lo que puede explicarse ya que las rutas de Firefly comienzan por visitar los puntos periféricos de la subárea y continúan hasta que están lo más cerca posible de la ubicación de inicio nuevamente. Por lo tanto, hay posibilidad de aumentar la conectividad.

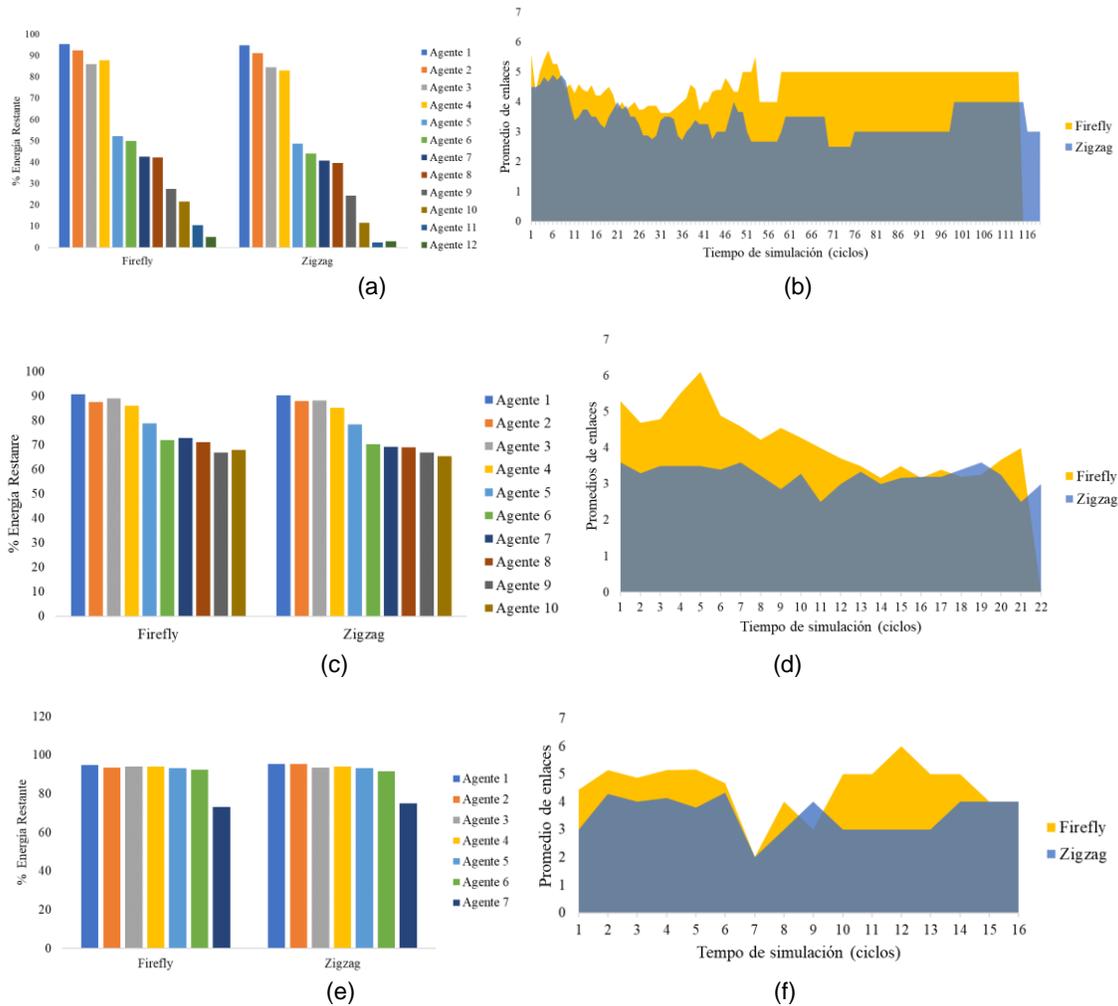


Figura 19. Gestión de energía y conectividad para (a), (b) Rejoya, (c), (d) Zona Urbana, y (e), (f) los Naranjos

El tiempo de misión ganado también se argumenta con las Tablas 13 a 15, que muestran los agentes MAV activos durante la misión. La ruta basada en el algoritmo Firefly completó las misiones ahorrando 2%, 9% y 25% de los agentes MAV liberados en los Naranjos, zona urbana y finca la Rejoya, respectivamente. Esta observación se destaca en las tablas para contrastar en tiempo de ejecución los cambios del Plan MCO para las dos opciones de cobertura.

Tabla 13. Número de agentes activos durante la misión en la Rejoja

Tiempo de ejecución												
Método	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115
Firefly	11	8	8	6	4	2	1	1	1	1	1	0
Zigzag	11	8	8	7	4	3	2	1	1	1	1	1

Tabla 14. Número de agentes activos durante la misión en la zona urbana

Tiempo de ejecución							
Método	3	6	9	12	15	18	21
Firefly	10	9	7	6	5	3	0
Zigzag	10	9	7	6	5	5	2

Tabla 15. Número de agentes activos durante la misión en los Naranjos

Tiempo de ejecución					
Método	3	6	9	12	15
Firefly	6	1	1	1	1
Zigzag	5	2	1	1	1

### 3.4 Resumen

En este capítulo se presentó el método diseñado para abstraer los puntos de interés, para dividir el área y finalmente llegar a la asignación de tareas a cada agente MAV. Esto componentes resultaron en el plan MCO, que garantiza un balance en la heterogeneidad de tareas, una tasa de consumo de energía óptima durante la misión, y un ahorro de energía promedio de al menos 8% al final de la misión. En el siguiente capítulo se asume esta eficiencia y se continua con la integración de la estrategia de coordinación especificando el modelo de comunicación.

## Capítulo 4. Modelo de Comunicación para un Sistema Multi-UAV durante una Misión de Cobertura

El método descrito anteriormente para asignar tareas de cobertura a múltiples MAV heterogéneos se clasifica como un plan de misión de cobertura basado en polígonos. Sin embargo, la primera sección de este capítulo continúa mostrando que el plan MCO proyecta la conectividad de la flota como base para el modelo de comunicaciones considerando posibles restricciones del ambiente y energía de los agentes. Posteriormente se presenta el modelo de comunicación Multi-MAV propuesto basado en planificación considerando conectividad intermitente e intercambio de datos limitado y se describe el entorno de simulación implementado, próximo a un despliegue realista. Finalmente se destacan los resultados partiendo de diferentes experimentos en un marco de simulación con SITL (Software In The Loop) y NS-3. El modelo propuesto se compara con el enrutamiento Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) como mecanismo similar a receptores bajo el protocolo Zigbee.

### 4.1 Modelo de conectividad

Luego de evaluar el efecto de la heterogeneidad en la asignación de tareas en el capítulo anterior, el siguiente análisis muestra cómo el plan MCO involucra la conectividad al estudiar la topología de red posible y la cantidad de enlaces cuando los agentes MAV encuentran vecinos en un rango definido. Para el experimento de simulación, el rango se calculó con la cuarta parte del segmento diagonal del espacio de trabajo.

La Figura 20 muestra una topología de red probable en las subáreas resultantes para cada espacio de trabajo y planificación de misión con el máximo de agentes MAV para implementar. Anteriormente, el plan basado en Boustrophedon daba como resultado formas rectangulares adyacentes (columna izquierda) y, en consecuencia, la topología posible parece un bus; significa que un agente probablemente se conectaría con sus vecinos laterales. La topología resultante para la planificación de K-means es como una malla (columna central), como resultado evidente de las distribuciones homogéneas de waypoints. Por otro lado, la topología para el plan MCO tiene un enfoque híbrido basado en topologías de múltiples estrellas centradas en los centroides del método de partición de áreas.

Aunque la Figura 20 es solo una estimación de los vínculos probables entre los agentes MAV, este rastro permite detectar la habilidad para reducir las fallas durante la misión y resolverlas sin afectar el objetivo general. La conectividad es baja para la asignación basada en Boustrophedon, aunque puede tener más tiempo de conexión cuando vuela los puntos sobre las intersecciones. El plan K-means supera al último para gestionar la cooperación, sin embargo, las implementaciones dinámicas en espacios de trabajo restringidos pueden tener una alta redundancia de datos si se mantiene una conexión persistente.

El plan MCO quiere superar los últimos problemas. prome

Los resultados numéricos de enlaces totales entre todas las flotas se encuentran en las Tablas 16 a 18, destacando el Master en cada opción de asignación a gestionar alto flujo de datos y rutas de cobertura más cortas. Estas pruebas confirman que el consumo eficiente de la flota puede ser el respaldo para el enrutamiento de datos.

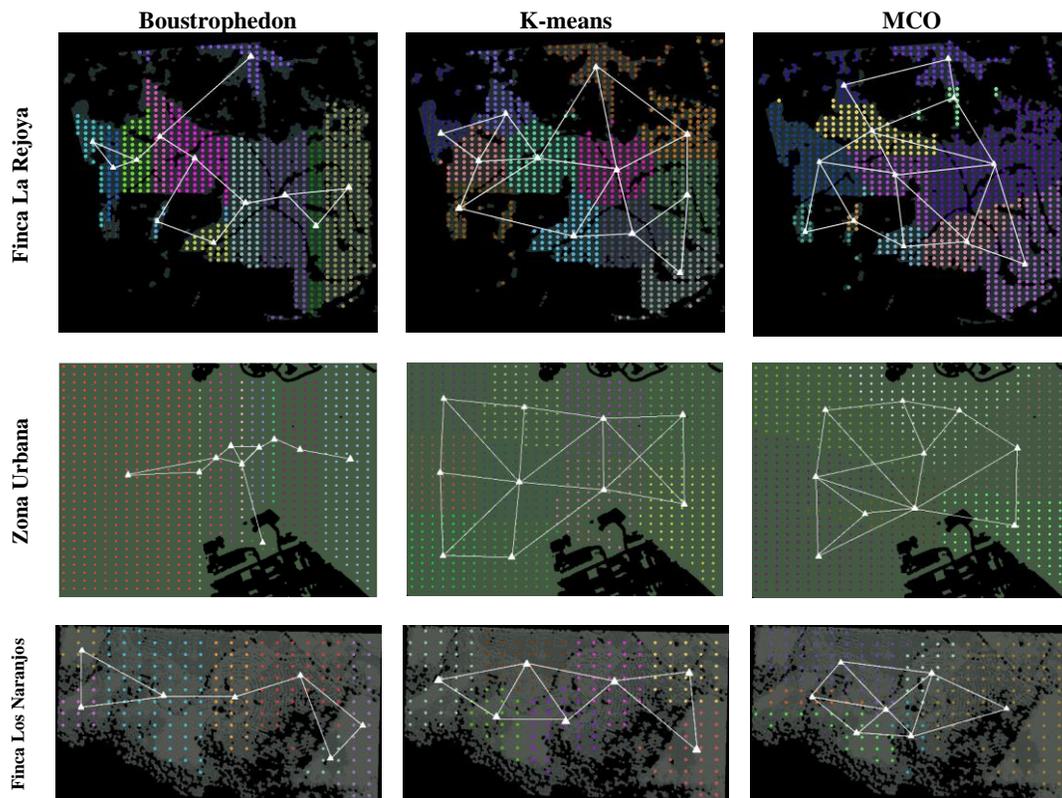


Figura 20. Topología de red estática para cada espacio de trabajo estudiado y cada método de planificación.

Tabla 16. Conexiones en la Rejoja

# agentes MAV	Boustrophedon	K-means	MCO
1	49	337	146

2	102	70	105
3	91	57	141
4	137	107	243
5	66	123	124
6	22	55	55
7	105	224	140
8	62	73	125
9	56	58	57
10	39	58	75
11	56	123	73
12	64	95	279

Tabla 17. Conexiones en zona urbana

# agentes MAV	Boustrophedon	K-means	MCO
1	72	49	125
2	98	52	85
3	46	50	97
4	20	54	45
5	30	80	130
6	58	102	60
7	73	69	35
8	58	41	51
9	2	24	47
10	2	57	25

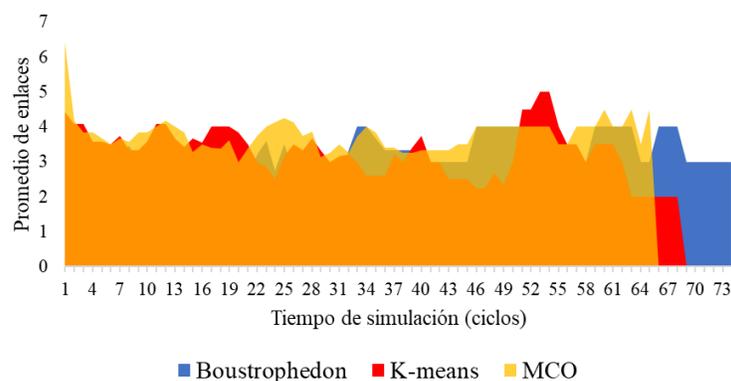
Tabla 18. Conexiones en los Naranjos

# agentes MAV	Boustrophedon	K-means	MCO
1	20	28	75
2	0	23	29
3	33	39	24
4	38	45	52

5	33	39	18
6	15	40	28
7	9	23	17

Las inferencias anteriores se confirman por la cantidad de enlaces para cada agente y el tiempo promedio de conectividad durante la misión. La asignación basada en Boustrophedon para Rejoja, zona urbana y los Naranjos tiene los promedios de conexiones más bajos con 70.7, 47.9 y 20.3 (áreas azules en la Figura 21) frente a 130.2, 70.1 y 30.7 del plan MCO, respectivamente (áreas amarillas). Por otro lado, el método de agrupamiento mantiene los promedios de conexión similar al Plan MCO, pero en tiempo de misión más corto como era de esperar según lo dicho arriba. La tendencia de K-means es tener un número similar de enlaces para cada agente MAV como muestran las tablas 14 a 16. Al mismo tiempo, el plan MCO propone centralizar el flujo de datos en unos pocos agentes, lo que resulta en una diferencia sustancial en las interacciones entre los colaboradores. Como muestran las tablas 15 a 18, aquellos MAVs con sobrecarga tienen suficiente energía para resolverla ya que el Plan MCO logra tener menos puntos para visitar con roles de Master o Coordinador. Estos se encuentran cerca del lugar de despegue, lo que facilita con flujos de datos alrededor de la estación terrestre y brinda más control para el usuario.

En resumen, el Plan MCO tiene los promedios de enlace más altos para cada espacio de trabajo, con valores entre 4 y 5 enlaces por unidad de tiempo debido a sus subáreas conectadas en una topología híbrida. El poder de una flota coordinada con roles se puede ver en el caso de Rejoja en la Figura 21 (a), ya que aún con ZLI en el medio, el plan MCO puede manejar menos tiempo para la misión mientras se mantiene la conectividad de la flota. El plan MCO converge a una habilidad de conectividad intermedia con espacios libres más grandes como la Zona Urbana y la Granja Naranjos.



(a)

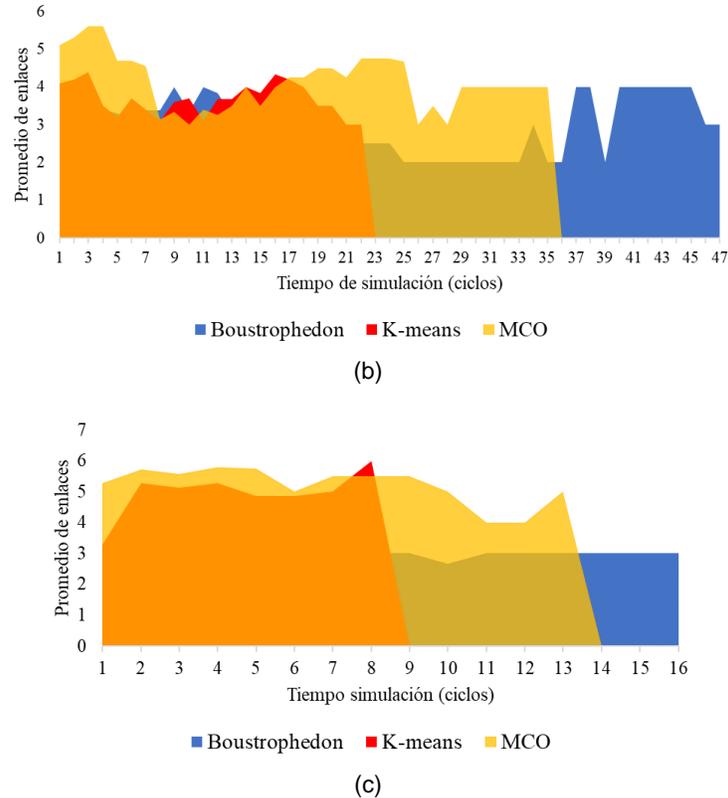


Figura 21. Enlaces promedio durante el tiempo de la misión para (a) Rejoya, (b) Zona Urbana y (c) Los

## 4.2 Diseño del Método

El modelo se basa en los retos encontrados en trabajos relacionados respecto a mecanismos de comunicación basado en planificación para FANETs los cuales evidenciaron mayor gestión de recursos. El modelo planteado a continuación considera restricciones del espacio de trabajo como zonas de difícil acceso y de no vuelo en el mecanismo de movilidad, ya que sigue el plan MCO bajo rutas de cobertura Firefly, ambos descritos en el capítulo anterior. El siguiente paso fue definir los mecanismos de intercambio de datos entre los agentes MAV y la GCS, diseñados para soportar un protocolo de enrutamiento en caso de misiones en riesgo de cobertura incompleta con uno o más MAVs en alerta. La validación de este modelo usa instancias de Software In The Loop (SITL) en Gazebo conectadas a un entorno de red para probar el rendimiento del modelo propuesto en comparación con un modelo ampliamente conocido para redes inalámbricas.

### 4.2.1 Interacción MAV-MAV y MAV-GCS

La transmisión y recepción de datos se modela bajo enlaces restringidos por la línea de vista (LoS) y el protocolo IEEE 802.15.4 para una conectividad robusta de punto

final. Según [83], el estándar ZigBee basado en IEEE 802.15.4 presenta un 75% de éxito en la transmisión para sistemas multi-UAV en escenarios realistas. Por tanto, el mecanismo de interacción se inspira en la pila de comunicación ZigBee para simular las comunicaciones entre agentes. El uso de estos dispositivos añade eficiencia energética para el despliegue de FANET ya que configuran el modo de bajo consumo mientras no transmiten y pueden transmitir con un alcance en kilómetros. En este trabajo se ha modelado el módulo ZigBee con una distancia de transmisión proporcional a la potencia de transmisión según la ecuación (3), basada en un modelo de desvanecimiento a gran escala para la transmisión de señales en espacio libre.  $I$  representa el ruido y las interferencias medidas a partir de la potencia y el umbral de la relación señal/ruido,  $\lambda$  es la longitud de onda portadora de la señal inalámbrica, y  $\alpha$  es el coeficiente de pérdida de trayecto y cuanto peor es el entorno. Todas las constantes dependen de las especificaciones del módulo de comunicación seleccionado.

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \left( \frac{P_t}{I} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3)$$

Si la distancia entre dos agentes MAV no es superior a  $d$ , los dos nodos son vecinos y pueden establecer un enlace de comunicación para intercambiar datos. La velocidad de transmisión de datos oscila entre 10 y 200 kb/s (sugerido por estándar ZigBee) y el paquete de datos se representa en la Figura 22. El Inicializador, la Cabecera y el CRC son datos estructurados (máximo 39 Bytes) por el estándar con información sobre la fuente, el destino, el rol de red y otros parámetros. La carga útil es una trama definida para tres tipos de mensajes basados los protocolos FIPA siguiendo las especificaciones de [71]: FIPA- Query, FIPA - Request y FIPA- Risk. Cada protocolo tiene un ID y un contenido que debe ser procesado por el destino.

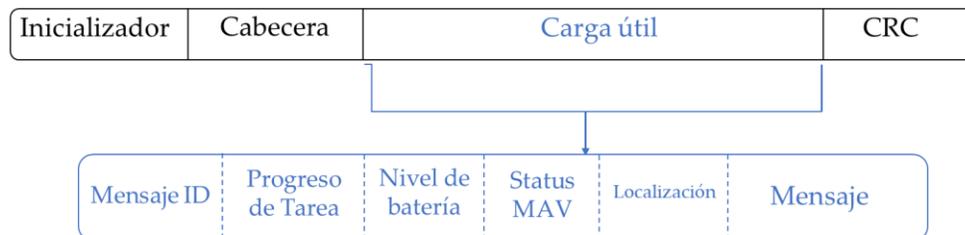


Figura 22. Paquete de datos para transmitir durante un enlace de comunicación

El ID del Mensaje representa el tipo de mensaje FIPA, el Progreso de la Tarea es el número de puntos asignados visitados, el Nivel de Batería es un porcentaje aproximado, el Estado del MAV es del monitoreo de los parámetros del piloto automático, la Ubicación corresponde a la longitud y latitud, y los datos del Mensaje varían de acuerdo con el protocolo FIPA, y el número de bytes del paquete puede cambiar entre 36 a 48 Bytes.

- **Mensaje FIPA-Query**

El agente MAV iniciador envía a cada vecino una consulta para conocer su estado, el receptor está de acuerdo o se niega; si el receptor está de acuerdo, se debe responder "falso" o "verdadero". En la Figura 23 se muestra un ejemplo de interacción.

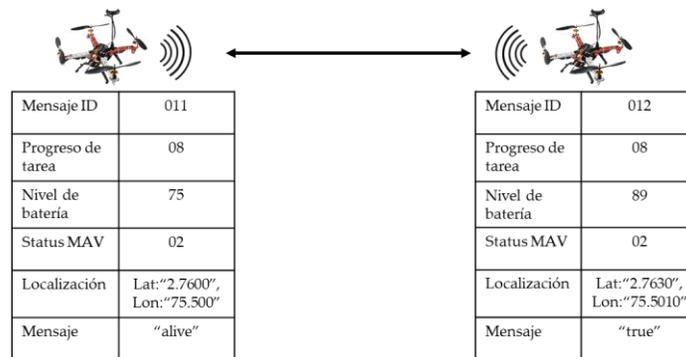


Figura 23. Ejemplo de mensaje FIPA-Query

- **Mensaje FIPA-Request**

El agente MAV iniciador envía a cada vecino una petición para compartir un paquete de datos con alerta, el receptor está de acuerdo o se niega; si el receptor está de acuerdo, se debe hacer un informe como respuesta. Una alerta puede generar un riesgo clasificado como bajo, medio o alto. El receptor reenvía a los vecinos y la alerta salta a los responsables de la toma de decisiones. En la Figura 24 se muestra un ejemplo de interacción.

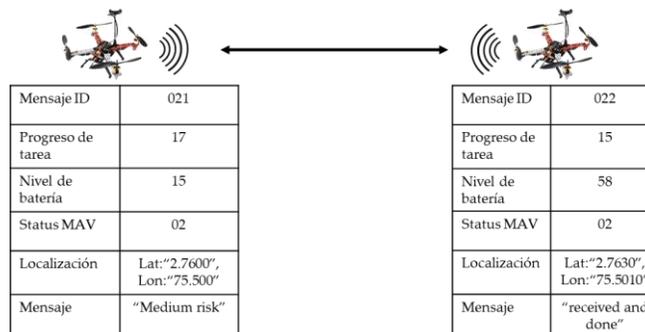


Figura 24. Ejemplo de mensajes FIPA-Request

- **Mensaje FIPA-Risk**

Este paquete es como el mensaje FIPA-Request pero sólo se envía de Coordinador a Maestro o de Maestro a GCS (no es esperado) para informar de un nivel de riesgo y solicitar una resolución. El método de resolución no se detalla en este capítulo, pero este paquete se propone para verificar la alerta de misión. El paquete resume el estado de uno o más agentes MAV con alerta. El coordinador establece un

mensaje con el nivel de riesgo, el ID del agente, el número de mensajes reportados y el tipo de alerta. En la Figura 25 se muestra una interacción a modo de ejemplo.

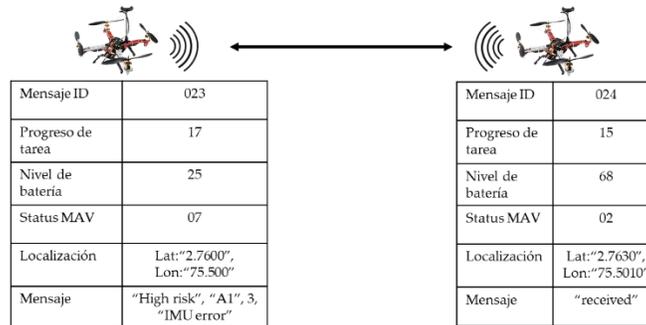


Figura 25. Ejemplo de mensajes FIPA-Risk

Aunque el GCS tiene un papel de monitor de los agentes MAV, puede eventualmente recibir mensajes FIPA-Risk para casos de Master o Coordinadores cercanos con alerta identificada. En este apartado no se detalla la resolución de alertas, pero el diseño actual va a soportar la resolución utilizando los mismos criterios de intercambio de datos, luego de implementar un proceso de consenso para completar una misión en riesgo de cobertura incompleta.

#### 4.2.2 Enrutamiento de Alertas

De acuerdo con lo diseñado en la jerarquía del plan MCO, cada rol está restringido para la conexión con los vecinos y en procesamiento de datos, tal y como se describe la Tabla 19. Cada agente MAV puede interactuar con uno y hasta cuatro vecinos para evitar la sobrecarga durante las comunicaciones. Los vecinos se seleccionan utilizando la distancia calculada desde las posiciones geográficas y se compara con  $d$  en la ecuación (3) para que corresponda con el canal de comunicación. Cuando se alcanza un enlace, se produce el intercambio de datos y cada rol puede almacenar un máximo de cuatro paquetes de datos. Todos pueden enrutar paquetes de datos, pero el rol de coordinador procesa para verificar el nivel de riesgo y este reporta al Master. En el caso de no haya coordinadores, un Master puede verificar el nivel de riesgo, y además puede ayudar a resolver una misión de colaboración. En la propuesta actual, Master y Coordinadores son roles denominados decisores.

La figura 26 muestra un ejemplo para describir el mecanismo de enrutamiento de mensajes Query y Request según el protocolo FIPA considerando una alerta detectada. En el ejemplo, cinco agentes cubren un espacio de trabajo mientras siguen rutas asignadas. Las tareas de cobertura y comunicación están integradas en la arquitectura BDI, y el intercambio de datos inicia con mensajes FIPA-Query (mensajes amarillos en el ejemplo) durante un tiempo de transmisión  $t_0$  segundos

mientras los vecinos están cerca a una distancia  $d_1$ , como la interacción de  $M_0$  y  $C_0$  en la Figura 26(a). La distancia  $d_1$  es fijada  $0.6d$  y solo dos mensajes FIPA-Query se almacenan en la memoria MAV para reducir el consumo de energía en cuanto a procesamiento. Este intercambio de paquetes se denomina interacción pasiva.

Tabla 19. Capacidades de Agentes MAV definidas en el plan MCO

Rol	Vecinos	Procesamiento
Master	Coordinadores y otros Master	Puede manejar y resolver alertas
Coordinador	Master, Operadores y otros Coordinadores	Enruta alertas y puede suplir al Master
Operador	Coordinadores y otros Operadores	Enruta alertas

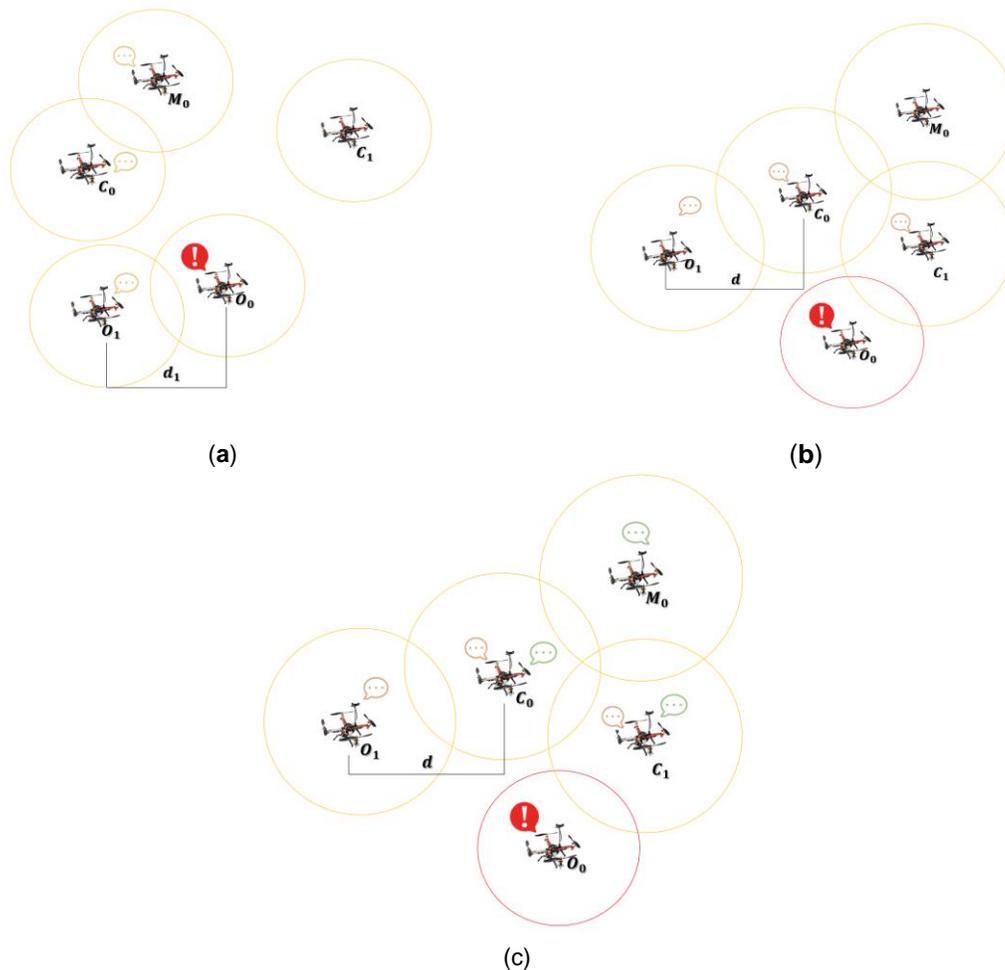


Figura 26. Ejemplo de enrutamiento de alertas usando jerarquía MCO

Cuando un MAV procesa una alerta propia según la Tabla 3 durante la interacción pasiva, este envía un mensaje FIPA-Request (mensajes naranjas en el ejemplo)

que se transmite a los vecinos para iniciar el enrutamiento con un alcance máximo  $d$  en caso de riesgo alto como en la Figura 26(b). Si el riesgo es medio, el alcance se fija en  $0.8d$  y si es bajo, el alcance sigue siendo  $0.6d$ . Para cualquier caso, se almacena un o hasta 4 mensajes FIPA-Request para que cada agente reenvíe a los responsables de la toma de decisiones. Si un Coordinador o Master recibe un mensaje FIPA-Request, entonces se construye un mensaje FIPA-Risk (mensajes verdes en el ejemplo) para verificar el nivel de riesgo. El nuevo mensaje se crea contando al menos dos mensajes de tipo FIPA-Request del mismo MAV y luego se comparte con el Master y otros Coordinadores como en la Figura 26(c). Consecuentemente, cualquier agente puede ejecutar el algoritmo 1 para decidir un modo de interacción y sólo los agentes coordinadores envían mensajes FIPA-Risk siguen el algoritmo 2.

Para denotar, los rangos en el enrutamiento se incrementan de acuerdo con el nivel de riesgo para garantizar que el mensaje de riesgo sea entregado a los tomadores de decisiones en el momento justo. Además, se fija el tiempo de transmisión  $t_0$  para limitar las comunicaciones en caso de que vecinos recurrentes interactúen, y si un enlace no tiene mensajes FIPA-Request después de  $5t_0$ , vuelve a la interacción pasiva para guardar energía.

#### Algoritmo 1

---

```

Switch_to_active_interaction (fipa_msg, d)
1 message_ID  $\leftarrow$  decode(fipa_msg)
2 message_data  $\leftarrow$  extract_msg(fipa_msg)
3 if message_ID == 021 and message_data = "High risk"
4     message_to_send  $\leftarrow$  format_request_msg (fipa_msg)
5     mybelief  $\leftarrow$  socialization (message_to_send)
6     r  $\leftarrow$  d
7 elif message_ID == 021 and message_data = "Medium risk"
8     message_to_send  $\leftarrow$  format_request_msg (fipa_msg)
9     mybelief  $\leftarrow$  socialization (message_to_send)
10    r  $\leftarrow$   $0.6d$ 
11 else
12    message_to_send  $\leftarrow$  format_query_msg (fipa_msg)
13    mybelief  $\leftarrow$  coverage_task()
14    r  $\leftarrow$   $0.6d$ 
15 myneighbors  $\leftarrow$  search_neighbors (r)
16 send_to_neighbors (message_to_send)
17 return mybelief

```

#### Algoritmo 2

---

```

Send_risk_message (fipa_request_msg[], d)
1 message_data, node, n, error  $\leftarrow$  extract_msg(fipa_request_msg[])
2 myneighbors  $\leftarrow$  search_neighbors (d)
3 if message_data == "high risk"
4     message_to_send  $\leftarrow$  format_risk_msg (message_data, node, n,
5     error)
6     mybelief  $\leftarrow$  socialization (message_to_send)
7     send_to_master (message_to_send)

```

```
7 else
8     message_to_send ← format_request_msg (fipa_request_msg[])
9     mybelief ← socialization (message_to_send)
10    send_to_neighbors (message_to_send)
11 return mybelief
```

### 4.3 Herramienta para Simulación de Red de MAVs

Los resultados anteriores dan paso a la etapa de integración del plan MCO con el componente de comunicación explícita para determinar el alcance cercano a condiciones realistas. El software seleccionado fue implementado en Ubuntu 20.04 y se compone de creación de instancias de software en el lazo (Software In The Loop- SITL) para representar MAVs con autopiloto PX4. Tales instancias son conectadas con el middleware que ofrece ROS, llamado “mavros”, el cual gestiona las características de sensores y controladores de los MAV. La simulación del entorno de cobertura es realizada mediante GAZEBO y la visualización de la estación GCS se realiza mediante QGroundControl. Este marco de trabajo se sincroniza con el simulador NS-3<sup>1</sup> (Network Simulator 3) bajo la capa MAC IEEE 802.15.4.

Las pruebas del sistema se llevaron a cabo en un marco que combina PX4 SITL y NS-3. El simulador de red representa los módulos de comunicación en una pila de protocolos para ad-hoc (capa física, de acceso y de red) como la Figura 27. La pila está sincronizada con el simulador Gazebo, con instancias PX4 SITL que representan a cada agente MAV. Cada instancia recibe una ruta de cobertura, la almacena y ejecuta comandos para navegar; además procesa datos y transmite paquetes a los vecinos o al GCS para colaborar. Por último, utiliza protocolos FIPA implementados para intercambio de mensajes.

---

<sup>1</sup> <https://www.nsnam.org/>

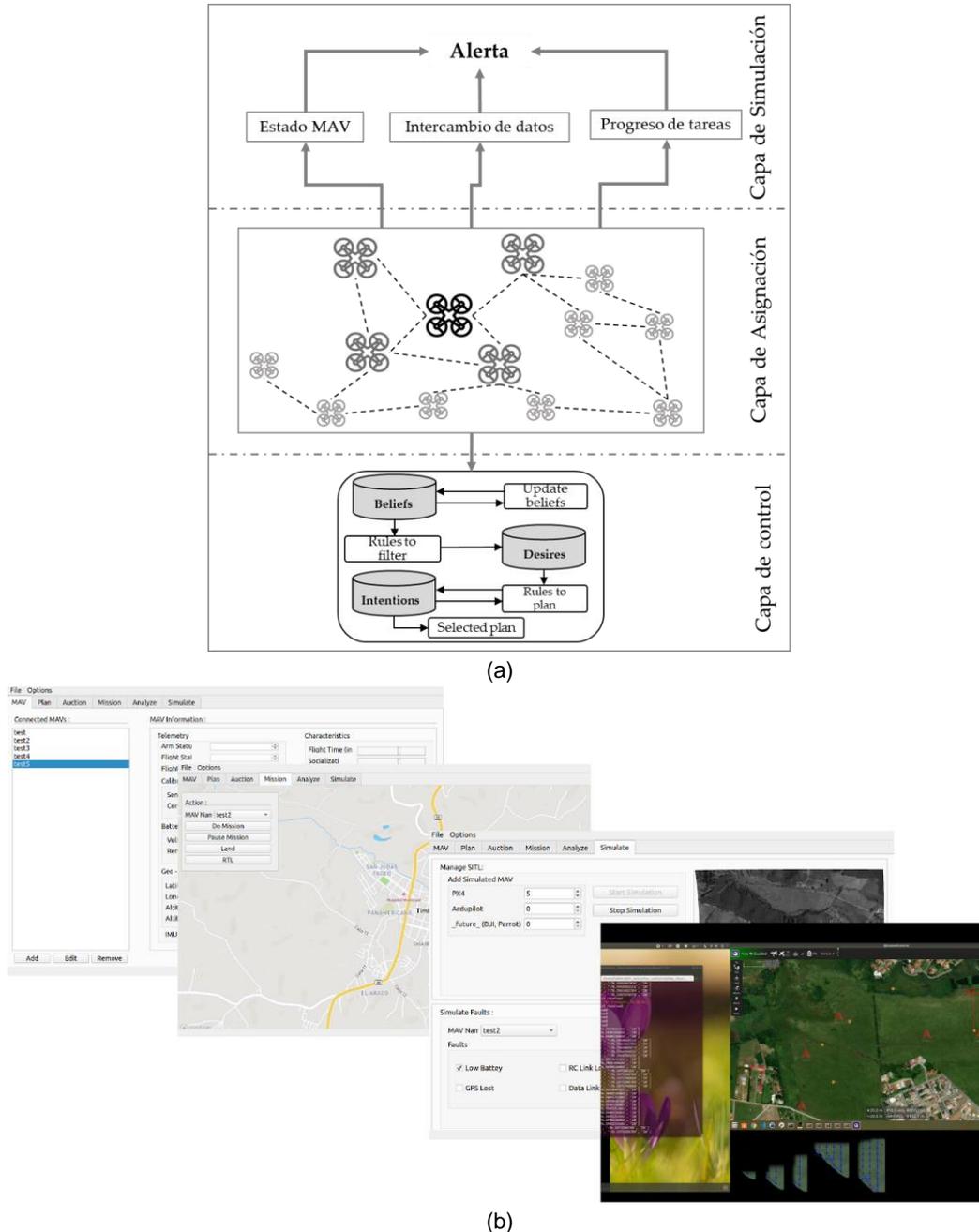


Figura 27. Interfaz para despliegue de misión de cobertura con fallas (a) Estructura de capas de herramienta de simulación y (b) Interfaces de la herramienta diseñada para simulación de alertas

Los componentes anteriores, confluyen en herramienta diseñada para simular misiones y alertas, como se muestra en la Figura 27; la cual se basó en el código de [84]. La herramienta fue desarrollada usando Qt5 para Python 3.8 en Ubuntu 20.04 y maneja tres capas conectadas para mostrar los movimientos del MAV y simular alertas durante una misión. Mientras que las instancias SITL usan el protocolo UDP para comunicarse, los nodos correspondientes en el entorno NS-3 usan scripts basados en el protocolo IEEE 802.15.4 para sincronizarse.

Tabla 20. Alertas simuladas con nivel de riesgo para la misión

Alerta	Nivel de Riesgo	Acción del MAV
Fallo en un motor	Alto riesgo	Aterrizar
Batería baja	Alto riesgo	Retornar a punto de partida y aterrizar
Error de IMU	Mediano riesgo	Sostener posición y altura por 15 segundos
Insuficientes satélites	Mediano riesgo	Sostener posición y altura por 15 segundos
Sin vecinos cercanos	Bajo riesgo	Retornar a punto de partida

La Figura 27(a) muestra la estructura de alto nivel de la herramienta, donde cada agente MAV está programado con una capa de control basada en arquitectura BDI. A continuación, sigue la capa para asignar rutas a agentes MAV heterogéneos en función de su rol en una sociedad jerárquica, la cual será explicada en el siguiente capítulo. En consecuencia, se despliega una misión y los agentes MAV ejecutan tareas de cobertura e interactúan en la capa de simulación. Los sensores, actuadores y receptores se controlan en esta capa para generar alertas en los MAVs, además se realiza el monitoreo del estado MAV, los datos del mensaje, la ubicación y el progreso de la tarea.

Las alertas definidas para la investigación actual se basan en las observaciones realizadas durante misiones realistas con un solo MAV desplegado en un espacio de trabajo al aire libre. Para cada alerta, hay un nivel de riesgo correspondiente, como se muestra en la Tabla 20. El riesgo alto conduce con frecuencia a MAV rotos y se genera por un error del motor o batería baja. El riesgo medio provoca la deriva del MAV debido a un error del sensor o pérdida de la posición global, que puede corregirse internamente con el tiempo o convertirse en un riesgo alto. Finalmente, si un MAV recibe pocos o ningún paquete de datos de los vecinos durante un período prolongado, esto podría conducir a un MAV defectuoso, aunque se esperan grandes distancias o enlaces inestables durante la misión. El nivel de riesgo se define para adaptar el intercambio y el enrutamiento, como se describe en las siguientes secciones.

## 4.4 Resultados y Discusión

Para la simulación de una misión de cobertura con un sistema multi-MAV se utilizó la herramienta descrita en sección 2.3.4, los ajustes para el entorno de simulación se presentan en la Tabla 21. El alcance máximo de transmisión sigue la ecuación (3) basada en el módulo XBee PRO 900HP S3B como opción posible en escenarios realistas. En consecuencia, se consideró el modelo de enrutamiento denominado Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) para comparar, ya que el estándar Zigbee lo utiliza en redes malladas. Para precisar, el modelo de consumo de energía se tomó de las instancias SITL de PX4 más el modelo de radio de NS-3.

La misión seleccionada fue el cultivo de la Figura 28(a) ubicado en Cauca-Colombia, que simula el escenario como se definió en el planteamiento del problema. Luego, el plan MCO fue ejecutado para obtener rutas de cobertura para flotas de 4, 6, 8, 10, y 12 agentes MAV basados en el Algoritmo Firefly como en la Figura 28(b), y la ejecución de la misión fue visualizada en QGroundcontrol como en la Figura 28(c).

Tabla 21. Configuración de simulación para pruebas del modelo de comunicación

<b>Prámetros de Misión</b>	<b>Valores</b>
Número de MAVs	4 -12
Número de puntos a visitar	630
Tiempo de misión estimado	64 min aprox.
Velocidad del MAV	18 km/h
Distancia total por viajar	19.2 km aprox.
Altura de vuelo	43 m
<b>Parámetros de Red</b>	<b>Valores</b>
Modelo de movilidad	Coverage path
Modelo de antena	Omni-directional
Capa de acceso	IEEE 802.15.4
Capa de red	AODV and Proposal
Máximo rango de transmisión, d	290 m
Velocidad de transmisión	200 kbps
Tiempo de transmisión	1 s
Tamaños de paquetes de datos	75 – 100 Bytes

El objetivo de las pruebas es enviar una alerta desde el operador 4 a los responsables de la toma de decisiones mientras la conectividad está restringida por el alcance de transmisión, tanto para la propuesta como para el protocolo AODV. Los resultados muestran casos de interacción pasiva, el caso de un MAV en alerta durante la misión y el de dos MAV en alerta como escenario extremo. Para cada flota se estudió la respuesta según el nivel de riesgo y las siguientes métricas de rendimiento apoyaron el análisis.

- Throughput: número de mensajes FIPA-Risk entregados a un agente decisor por tiempo. Se midió en bits por segundo.
- Packet Delivered Ratio (PDR): relación entre el número total de mensajes FIPA recibidos en los agentes MAV y el número total de paquetes de datos generados en toda la red.
- Latencia: tiempo medio que tarda en enviarse un mensaje FIPA-Risk desde un agente MAV hasta que el paquete se entrega a un agente tomador de decisión.
- Vida restante: batería media por agente al final de la misión. Se mide en porcentaje.

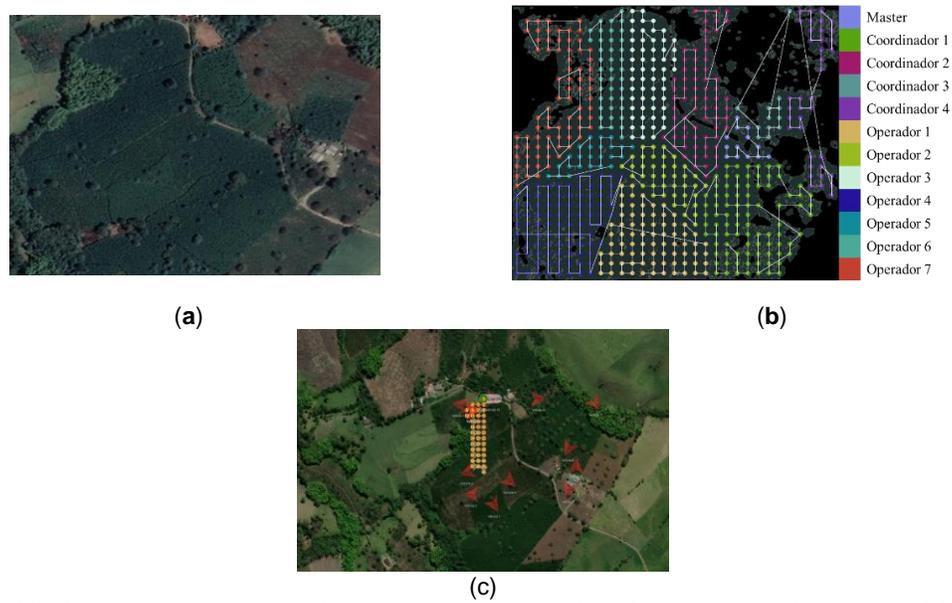


Figura 28. Misión de cobertura para probar el modelo de comunicación (a) cultivo seleccionado, (b) plan MCO calculado y (c) vista de la misión en ejecución

#### 4.4.1 Experimento con interacción pasiva

Este experimento se realizó para conocer el comportamiento del modelo de comunicación durante una cobertura completa del espacio de trabajo de estudio, es decir, sin alertas. Para este caso, el Delay fue medido para medir el tiempo que toma enviar un mensaje FIPA-Query desde un agente MAV hasta que se entrega a un vecino. La figura 29(a) muestra los delays para cada flota del modelo propuesto en comparación con el modelo basado en AODV para actualizar los nodos conectados en una red. Los resultados fueron similares, entre 40 y 50 milisegundos, aunque la propuesta (columnas verdes) minimizó este tiempo cuando interactuaron más agentes MAV. La diferencia media fue de al menos 8 milisegundos como resultado de las restricciones del modelo propuesto según el rol, mientras que AODV busca vecinos en el rango sin restricción por tanto la media del delay es mayor.

La figura 29(b) muestra la gestión energética del modelo utilizando pocos recursos computacionales y un rango limitado a  $d_1=174$  metros para interactuar (definido anteriormente como  $0.6d$ ). La propuesta obtuvo un porcentaje superior al 30% como energía restante al final de la misión con 12 agentes MAV. Las columnas verdes superan al método AODV para todas las flotas con una diferencia de aproximadamente 10%. La ganancia es resultado de las restricciones del modelo para comunicarse, pero un factor importante es que el número de enlaces del mecanismo base (AODV) es mayor por lo que se gasta más energía del radio. Además, el método propuesto tiene una ganancia de energía proporcional al número de agentes, mientras que el modelo basado en AODV es aleatorio porque

son posibles diferentes interacciones entre roles durante una misión. Finalmente, la Figura 29(c) muestra valores de PDR superiores al método AODV, sin embargo, se denota la existencia de paquetes de datos perdidos durante la interacción pasiva. De nuevo, el valor máximo de PDR se alcanzó con 12 MAV, aunque los mensajes no entregados durante la misión podrían explicarse porque el intervalo de tiempo fijo para la comunicación afecta a la integridad de los paquetes.

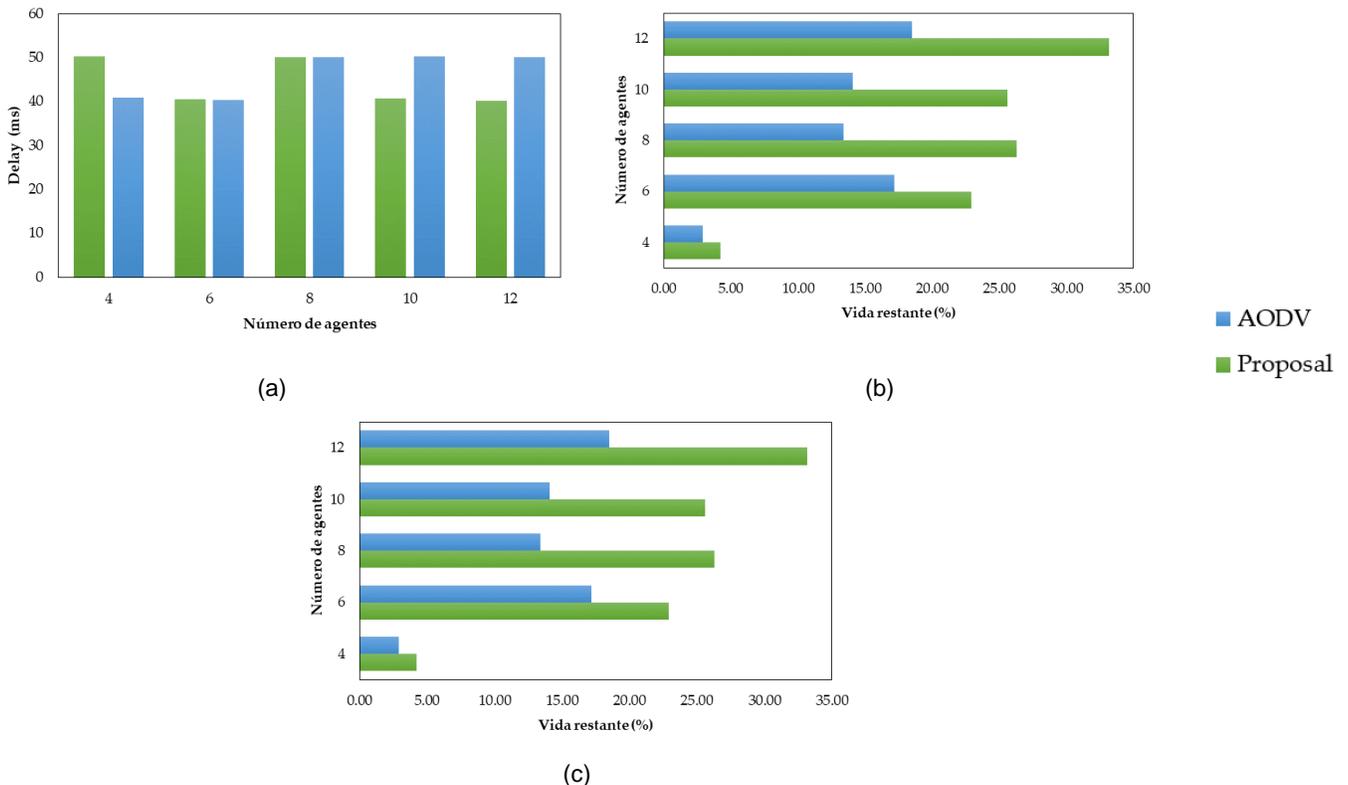


Figura 29. Métricas de rendimiento durante interacción pasiva de agentes (a) retardo, (b) vida restante y (c) PDR

#### 4.4.2 Experimento con interacción activa para una alerta

Para este experimento se midieron las cuatro métricas mencionadas anteriormente para saltar una alerta hasta Coordinadores o Master. El rendimiento y la latencia se consideraron un destino alcanzado cuando el mensaje FIPA-Request se entrega a cualquier responsable de la toma de decisiones. Todas las métricas de las figuras 30, 31 y 32 se calcularon cuando se lanzó una alerta en 160 ciclos de simulación (1 ciclo corresponde aproximadamente a 10 segundos) para probar la respuesta a un riesgo bajo, medio y alto, respectivamente.

El rendimiento en el escenario de bajo riesgo alcanzó los 3,8 kbps de throughput para el caso de 4 agentes MAV con el modelo propuesto, mientras que el protocolo común (columnas azules) se aproximó a los 3,0 kbps para cualquier número de

agentes MAV, como muestra la figura 30(a). Respecto a la vida restante fue similar a la interacción pasiva, que está relacionada con el mismo rango de comunicación fijado en 174 metros. La propuesta de la Figura 30(b) obtuvo aproximadamente un 10% más de vida al final de la misión respecto al modelo basado en AODV y ambos aumentaron en función del número de agentes MAV. Los resultados de PDR para la propuesta también fueron como la interacción pasiva, pero fueron diferentes para el modelo basado en AODV con un PDR medio de 0,59 mostrado en la Figura 30(c). Las flotas de 4 y 6 agentes obtuvieron valores inferiores a la media, lo que podría corresponder a enlaces intermitentes y cortos entre los MAV, que abrieron la diferencia con el total de mensajes FIPA entregados. En orden, las latencias del modelo propuesto en la Figura 30(d) fueron mejores que el protocolo AODV, aunque los promedios fueron como interacción pasiva entre 350 y 430 milisegundos. Para denotar, la latencia mínima se alcanzó con flota de 4 agentes, lo que era coherente con el número de saltos necesarios para llegar al destino, pero los valores de flota de 12 MAVs estaban cerca de esto, lo que apuntó a que la latencia de la propuesta podría mejorar con un mayor número de MAVs.

Se realizó una observación común para todas las métricas de la propuesta. Los valores fueron superiores a los resultados de AODV excepto para 6 agentes MAV, lo que podría explicarse por la distribución de subáreas del plan MCO. Áreas grandes con formas diferentes facilitan la existencia de enlaces rotos o sin enlaces, lo que provoca un aumento de las latencias que empeora el rendimiento.

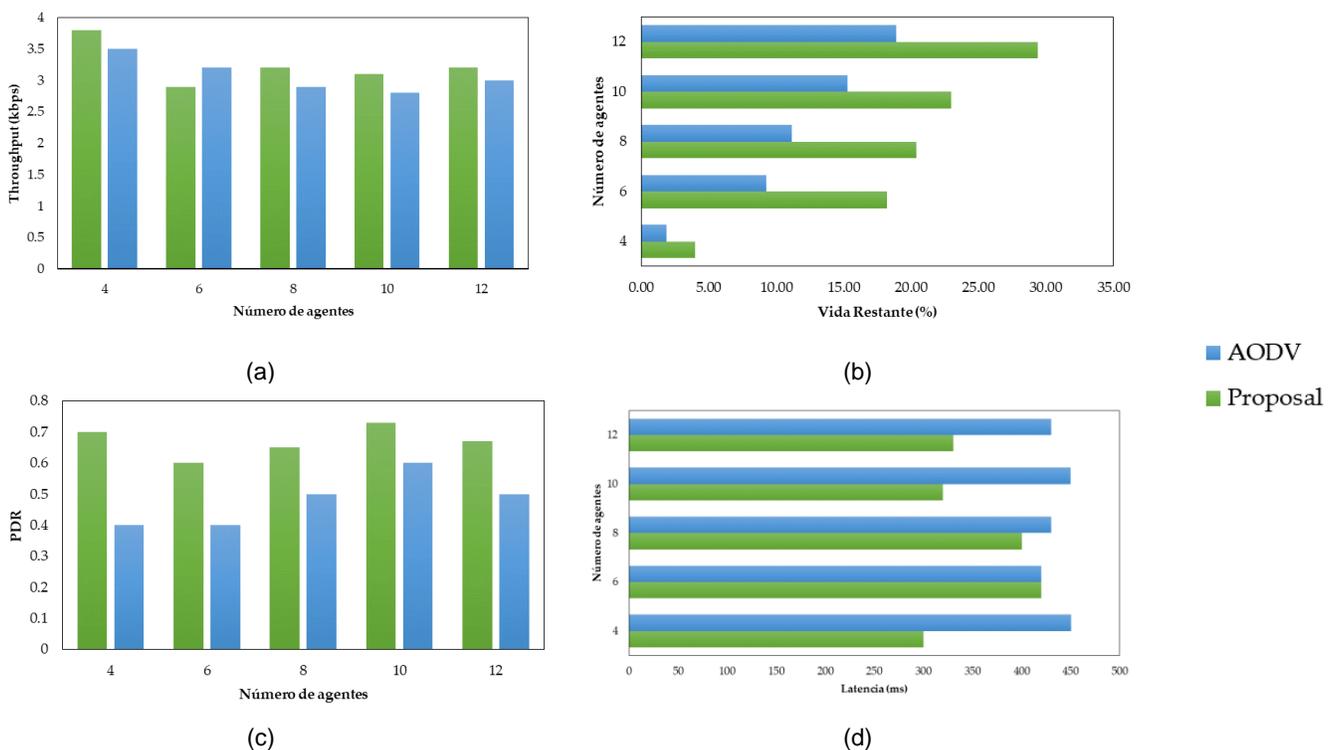


Figura 30. Métricas de rendimiento durante interacción activa de bajo riesgo (a) Throughput, (b) vida restante y (c) PDR y (d) Latencia

En el caso de riesgo medio fue definido un rango de transmisión de 232 metros según (0.8d) en la Sección 4.2.2, las métricas cambiaron, pero la tendencia fue similar a los resultados del nivel bajo de la Figura 30. En cuanto a los valores de throughput, el protocolo AODV obtuvo el máximo con 4 agentes MAV, aunque la media se aproxima a 2.78 kbps para todas las flotas, como se muestra en la Figura 31(a) y el modelo propuesto obtuvo valores similares para cada flota cercanos a 3.3 kbps. Ambos modelos presentaron valores inferiores a los resultados de bajo riesgo. Respecto a las métricas de vida restante y PDR (Figura 31(b) y (c)) para la propuesta fueron superiores al modelo común considerando que con más agentes se puede gestionar aún mejor el consumo de energía y los paquetes de datos perdidos. Además, los valores de latencia para el mecanismo AODV fueron superiores a 400 milisegundos, mientras que la propuesta obtuvo alrededor de 100 milisegundos para todas las pruebas (Figura 31(d)). Con riesgo medio, el rendimiento general fue inferior al de la interacción pasiva y el escenario de riesgo bajo, aunque la alerta se gestionó mejor según los datos de throughput, latencia y PDR. Esto indica que el aumento del alcance de transmisión requiere más energía, pero la latencia mejoró con una media de 322.4 milisegundos y se entregaron más mensajes de tipo FIPA-Request.

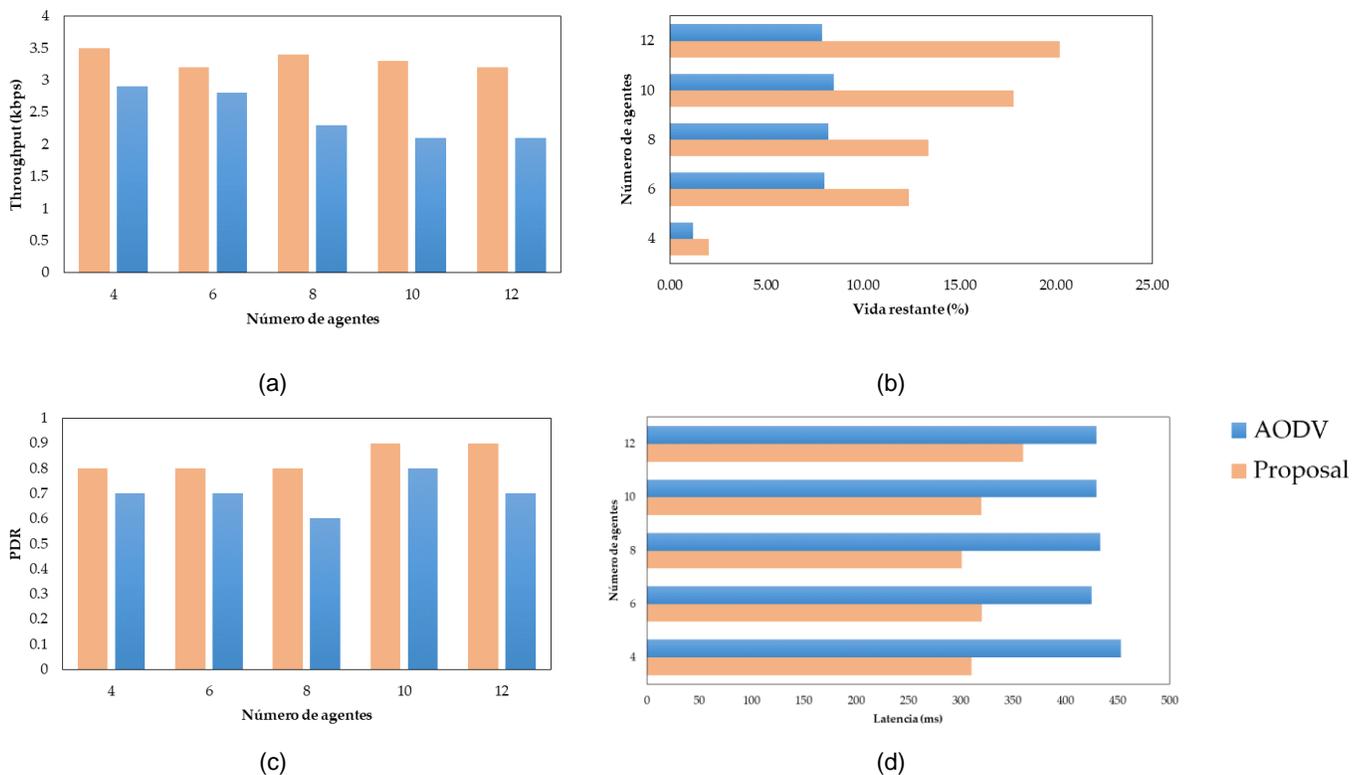


Figura 31. Métricas de rendimiento durante interacción activa de medio riesgo (a) Throughput, (b) vida restante y (c) PDR y (d) Latencia

En el último experimento, la distancia para interactuar fue máxima, 290 metros, con el objetivo de saltar una alerta de alto riesgo hasta los responsables de la toma de decisiones. Los resultados fueron como los de la figura 31, pero cabe mencionar algunas especificaciones. El throughput, PDR y la latencia (Figura 32(a), (c) y(d)) tuvieron una tendencia constante a 3.32 kbps, 0.88 y 292.4 milisegundos respectivamente. Los resultados indican estabilidad para esta condición de transmisión, lo que coincide con el modelo del canal de comunicación del método propuesto. Además, el modelo propuesto fue mejor que el basado en AODV para gestionar la vida restante con un 8.6% más (Figura 32(b)).

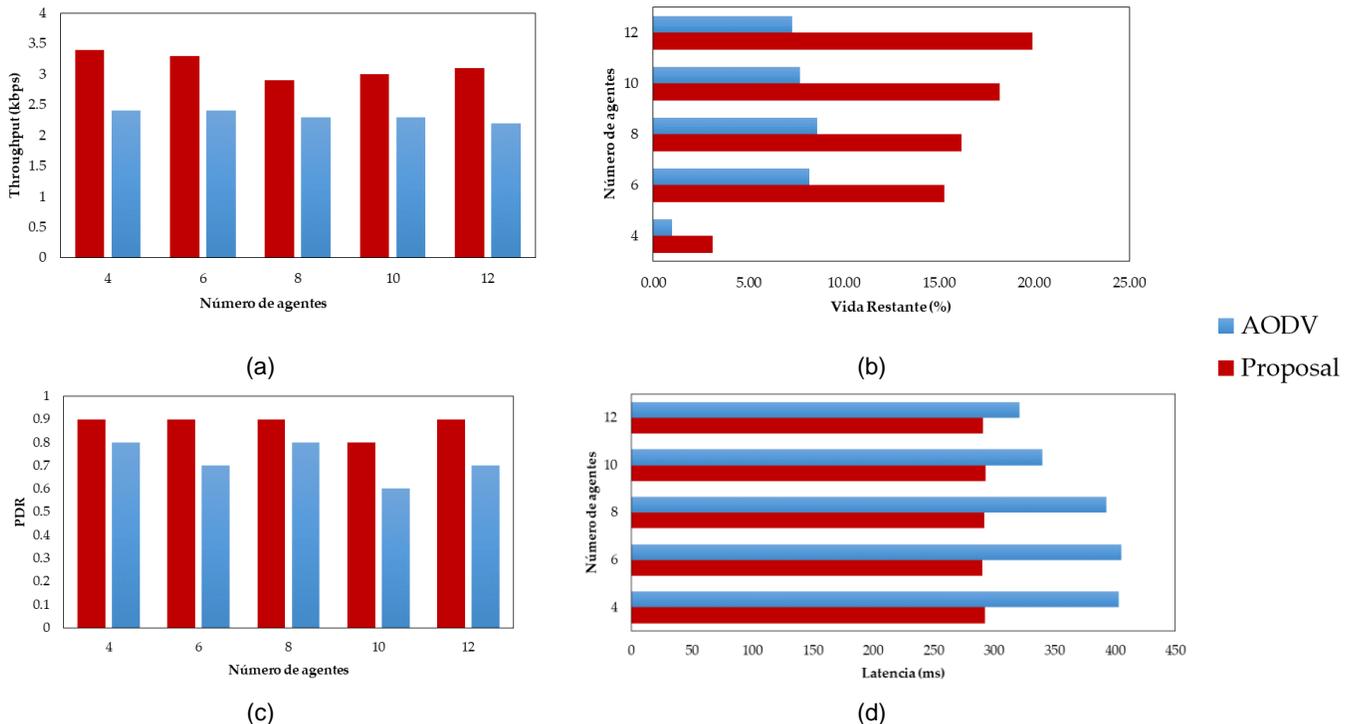


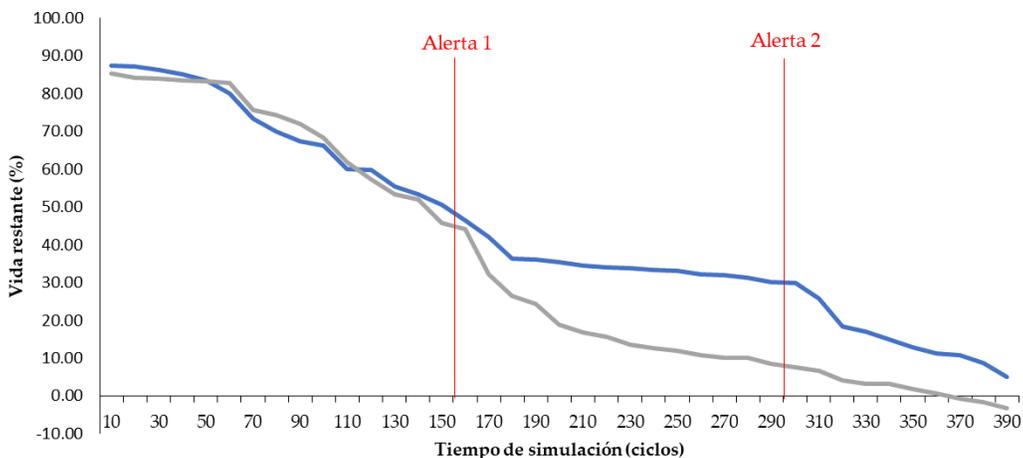
Figura 32. Métricas de rendimiento durante interacción activa de alto riesgo (a) Throughput, (b) vida restante y (c) PDR y (d) Latencia

En resumen, los resultados anteriores muestran un mejor rendimiento del modelo propuesto, con una ganancia de energía superior al 8% en comparación con el modelo basado en AODV en todos los casos. Por lo tanto, es posible que al menos un MAV reciba instrucciones para resolver una ruta de cobertura incompleta. Por otro lado, la relación entre el rendimiento y la latencia mostró ser mayor con el rango de transmisión máximo y con mayor número de MAVs. Aunque podría mejorar, el modelo demostró que puede evitar la pérdida de paquetes y las entregas tardías.

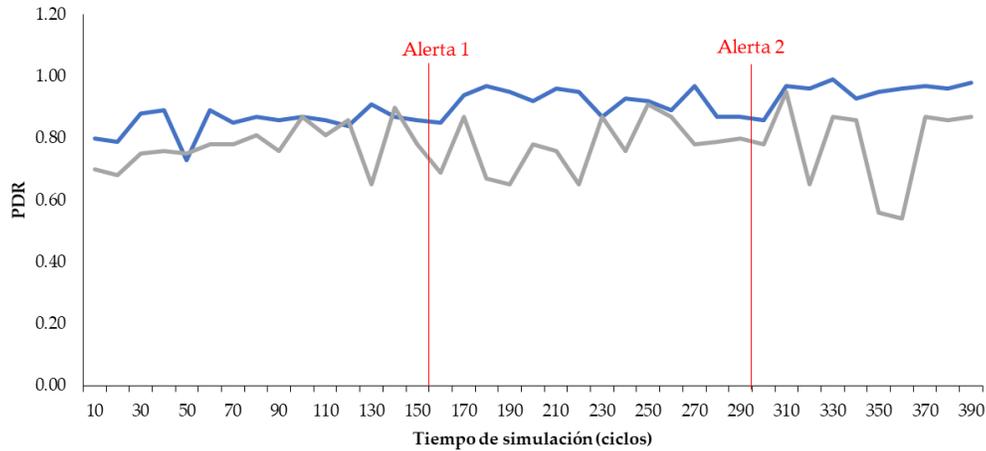
#### 4.4.3 Experimento con interacción activa para dos alertas

Se propuso un experimento final para probar el modelo en un escenario extremo cuando dos MAV en alerta realizan una misión con 12 agentes MAV. Las alertas se lanzaron a 160 y 300 ciclos de simulación (1 ciclo corresponde aproximadamente a 10 segundos) para estudiar el impacto en el modelo. La prueba consideró la alerta 1 de nivel alto y la alerta 2 de nivel medio. Para denotar, este trabajo detalló el alcance del número de alertas a resolver por una red basada en MAV, pero para el caso de estudio se denota un límite de dos. La Figura 38 muestra el comportamiento en el tiempo para la vida restante y la PDR, porque ambos describen la contribución por agente al rendimiento. El rendimiento y la latencia se trataron anteriormente como promedios, para abordar la discusión sobre el trabajo en equipo para gestionar las alertas.

La Figura 33(a) evidencia cómo las comunicaciones basadas en AODV y la actual propuesta fueron similares durante la interacción pasiva con una vida restante superior al 40%. En la interacción activa para la primera alerta, el consumo de energía aumentó, y el mecanismo AODV disminuyó la vida más rápido que la propuesta hasta casi el 10%. Con una alerta adicional, la propuesta disminuyó hasta el 4.96%, pero el oponente terminó sin energía 20 ciclos antes. Por tanto, el resultado de la propuesta acerca de la primera alerta conduce a valores de energía restante superiores a los del modelo basado en AODV y una tasa de disminución más lenta. Esto podría garantizar energía para resolver cooperativamente una alerta con dos o tres agentes MAV. Después de la segunda alerta, ambos modelos disminuyeron la energía media. En particular, la propuesta podría ahorrar energía para que al menos un MAV pueda resolver una ruta de cobertura incompleta.



(a)



(b)

Figura 33. Métricas de rendimiento para el escenario de dos alertas durante una misión de cobertura (a) Vida restante y (b) PDR

La figura 33(b) describe la eficacia en la transmisión de mensajes FIPA-Risk durante la misión. La PDR de la propuesta fue mejor que la del modelo AODV-base, pero ambas experimentaron un descenso justo después de la generación de la alerta. Podría deberse a una combinación de mensajes FIPA, Query y Request en los agentes que caria el tamaño de los paquetes, y también por la transición de los rangos de comunicación. La tendencia de la PDR de la propuesta y del modelo basado en AODV fue similar, pero la desviación estándar fue de 0.06 para la propuesta y de 0.10 para el modelo de base, lo que demuestra que el modelo actual es más robusto en el intercambio de datos durante la misión. Otra observación es que la PDR de la propuesta mejoró con un mayor rango de transmisión, mientras que el modelo basado en AODV tuvo valores críticos que redujeron el rendimiento medio. Esto podría ser consecuencia del mayor número de intercambios de datos que sostiene el protocolo.

## 4.5 Resumen

En este capítulo se abordó la validación del plan MCO usando una herramienta de simulación para obtener resultados cercanos a los esperados en entornos realistas. El método planteado se descompone en el diseño de las interacciones y sus restricciones durante una misión y la definición el mecanismo de enrutamiento cuando una alerta es detectada. Los resultados no solamente confirman los esperado desde el modelo basado en agentes a través de la medición de la energía al durante y al final de la misión, estos también demuestran la robustez del método ante fallas mediante métricas como la relación entre el número total de mensajes FIPA recibidos en los agentes MAV y el número total de paquetes de datos

generados en toda la red; y la latencia que toma un mensaje de alerta desde un agente MAV hasta que el paquete se entrega a un agente tomador de decisión. En siguiente capítulo se abordará el método para resolver la alerta y alcanzar una misión de cobertura exitosa.

# Capítulo 5. Resolución de Fallos durante una Misión de Cobertura

En este capítulo se aborda el problema de superar el riesgo en misiones de cobertura completa, entendiendo que los agentes MAV generan alertas a causa de fallas internas, perturbaciones del ambiente y enlaces de comunicación rotos. Se denota entonces el método de consenso y enrutamiento de la decisión considerando una negociación centralizada, a pesar de los indicios de descentralización en la literatura, en especial con el uso del algoritmo de burbuja (consensus-based bundle algorithm - CBBA) [85]. Consecuentemente, se describen los resultados respecto a métricas de rendimiento señaladas en la sección 4 y para verificar el cumplimiento de la misión de cobertura se elige un caso de fotogrametría, por lo cual se compara la completitud de cobertura en escenarios de riesgo.

## 5.2 Diseño del método

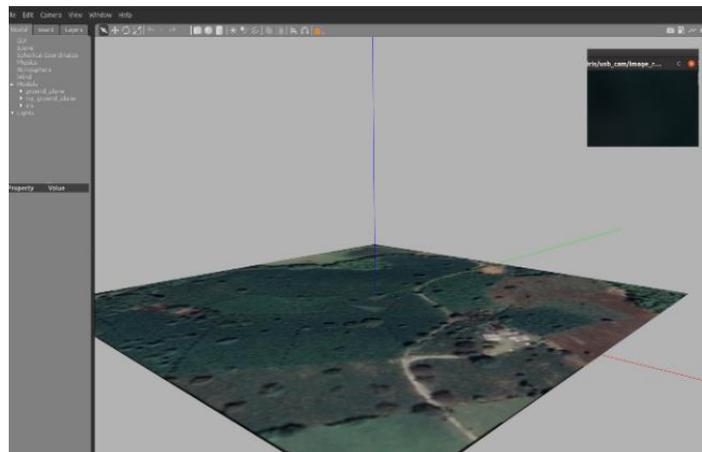


Figura 34. Escenario de simulación con Gazebo y el modelo MAV de IRIS 3DR

Considerando que el proyecto de investigación ha mantenido como enfoque la eficiencia energética y la robustez en el intercambio de paquetes, se propuso gestionar las alertas identificadas en una misión de cobertura a través del intercambio de mensajes FIPA entre la estación de control en tierra, el consenso entre tomadores de decisión y una resolución simple para atender los puntos no cubiertos. La simulación de esta propuesta está acorde con las herramientas usadas en el capítulo anterior, con énfasis en las propiedades de Gazebo para manejar la

cámara portada en MAVs (Figura 34) y complementar con un módulo de viento para dinamizar el entorno (2 m/s).

Las métricas de rendimiento señaladas en el capítulo anterior como Throughput, PDR, latencia y vida restante son evaluadas en escenarios de riesgo bajo y alto, pero desde el momento que la alerta de riesgo es recibida. Además, se define una misión de fotogrametría aérea para validar la resolución del riesgo a través de ortomosaicos, de los cuales se espera una proyección completa del área monitoreada.

- Throughput: número de mensajes FIPA-Propose entregados a un agente colaborador por tiempo. Se midió en bits por segundo.
- Packet Delivered Ratio (PDR): relación entre el número total de mensajes FIPA recibidos en los agentes MAV y el número total de paquetes de datos generados en toda la red.
- Latencia: tiempo medio que tarda en enviarse un mensaje FIPA-Propose hasta que el paquete se entrega a un agente seleccionado para ejecutar la decisión.

De acuerdo con lo anterior, el método parte de que la alerta ya ha sido recibida por un rol tomador de decisión (Máster), por tanto, se debe consensuar la decisión, y con la decisión enrutar hacia los agentes que deben colaborar y finalmente resolver con acciones correspondientes para cumplir la solicitud de colaboración. A continuación, se describe cómo se desarrolló cada punto en esta tesis.

### **5.2.1 Subasta y Consenso para resolver la alerta**

Después de que el Máster recibe el mensaje FIPA-Risk y verifica el o los agentes MAV con alertas que representan riesgo para la misión. El primer procedimiento es solicitar a la GCS mediante un mensaje de solicitud FIPA-Request, cinco (5) puntos geolocalizados representativos de la ruta por cubrir y el centro del área correspondiente, este mensaje es llamado “inform” en la Figura 35. La GCS es quien asigna desde el principio la misión de acuerdo con la distribución del plan MCO, por tanto, es quien procesa la solicitud, además debería estar en el rango de transmisión máximo del Máster, como la ecuación 3.

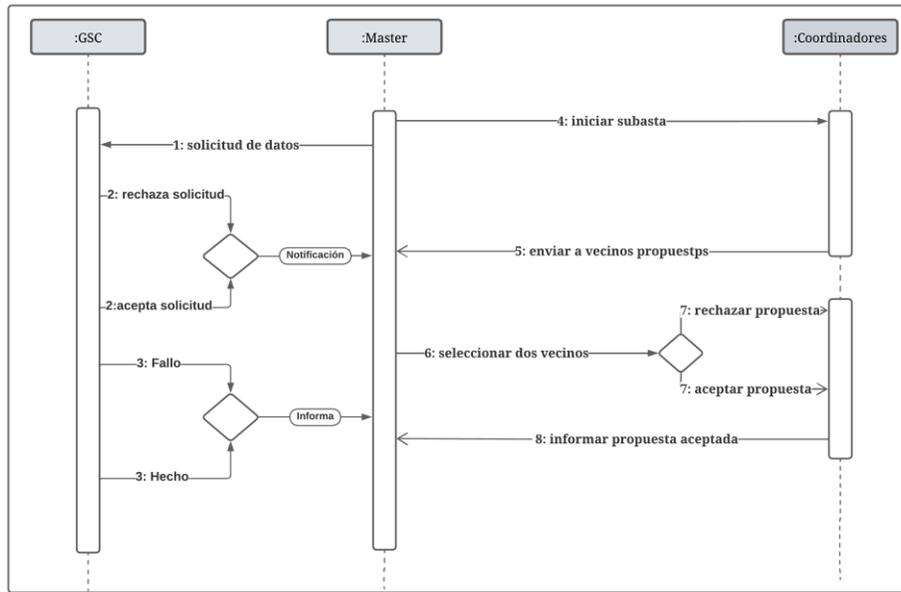


Figura 35. Etapa de consenso para decidir la resolución del riesgo reportado al Máster

Los cinco puntos del área a cubrir son subastados por el Máster, a través del protocolo FIPA Contract Net (desde el paso 4 en Figura 35) hacia los roles de tipo coordinador usando el mensaje tipo FIPA-Cfp como la Figura 36. Ellos verifican en su lista de mensajes almacenados como FIPA-Query o FIPA-Request, la cercanía de los agentes al centro del área en alerta y la disposición de batería mayor al 30%. Entonces, conforme con el diagrama de la Figura 35, cada coordinador en el conceso envía una propuesta de vecino (Figura 35). El Máster ordena por cercanía y batería disponible, para elegir dos propuestas y reparte los 5 puntos a cubrir según la energía de cada cual. Los coordinadores ganadores son notificados usando un mensaje FIPA-Request similar al de la Figura 37 y ellos inician el enrutamiento. Vale la pena denotar que la selección de los puntos a cubrir es resultado de pruebas previas sobre el tamaño del paquete, que de no ser así se afectaría las condiciones del modelo desarrollado y disminuiría la capacidad de los drones para cubrir puntos extras. En ese orden de ideas si los puntos faltantes son más de cinco (5), la GCS procesa la ruta para seleccionar puntos según la cercanía a una recta de puntos entre el centro del área y el punto final de la ruta correspondiente, y elige los cinco primeros como en el algoritmo 3. Se espera que los puntos cercanos al segmento sean los más lejanos de los vecinos para que vuelos de ida y vuelta cubran puntos intermedios considerando la proyección del sensor remoto. El máximo número de puntos para asignar a los agentes será de tres, con la posibilidad que pueda cubrir elementos faltantes y terminar su asignación de cobertura.

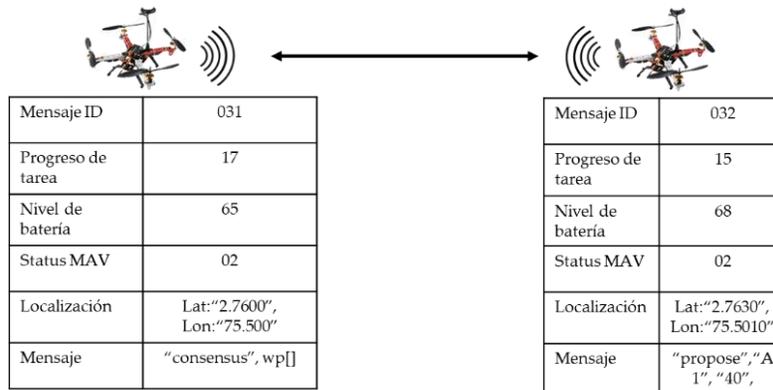


Figura 36. Ejemplo de mensaje FIPA-Cfp

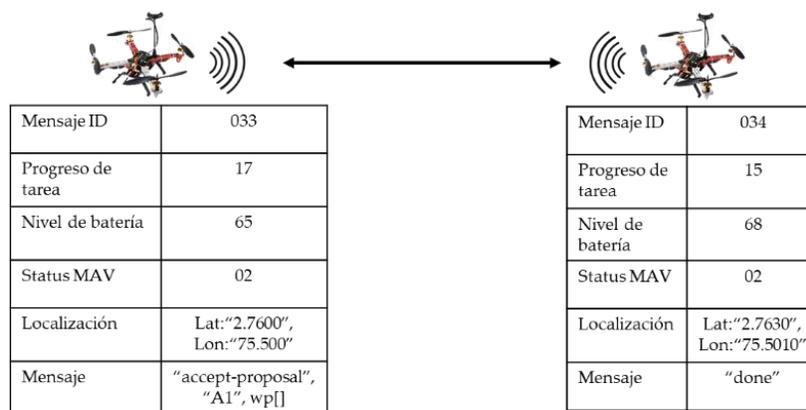


Figura 37. Ejemplo de mensaje FIPA-Request

Por otro lado, cada coordinador toma la localización de los agentes con los que previamente se ha comunicado y la compara con el centro del área a cubrir. Aquel que esté más cerca y con al menos 30% de batería será su candidato para proponer en el consenso iniciado por un tomador de decisión.

Aunque puede darse el caso que no existan candidatos que tengan al menos 30% de vida restante, este umbral es fijado para evitar fallas internas con sensores o posibles derivas del MAV por insuficiente suministro de energía durante la resolución.

### Algoritmo 3

---

```

GCS_decision (ID agent, Task progress)
1 path[] ← search_coveragepath(ID agent)
2 center ← search_coverage_subarea(ID agent)
3 n_points ← length (path[ Task progress: ])
4 if n_points <= 5
5     message_to_send ← format_inform_msg (path[ Task progress: ], center)
6 else
7     new_points[] ← sort_select_points(path[ Task progress: ], center)

```

```

8   message_to_send ← format_inform_msg (new_points[], center)
9   return message_to_send

```

## 5.2.2 Enrutamiento de la decisión

El enrutamiento de la decisión concertada se procesa desde los coordinadores mediante un nuevo mensaje FIPA-Propose como el ejemplo de la Figura 38. Este mensaje se enruta siguiendo las mismas restricciones de la sección 4.2.2 del capítulo anterior para limitar el enlace de comunicación. El intercambio de este mensaje FIPA-propose sigue las especificaciones en [71] y es compartido con los agentes cercanos con las restricciones de rango correspondientes.

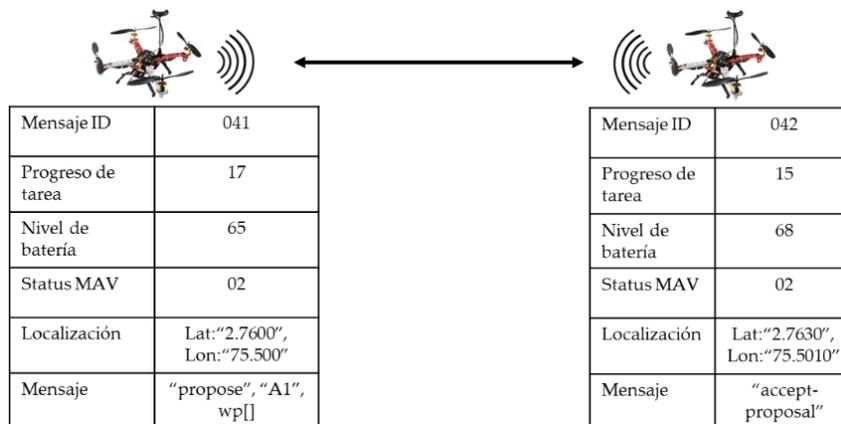


Figura 38. Ejemplo de mensaje FIPA-Propose

Para complementar, es posible que, al llegar el mensaje a los destinatarios, alguno de ellos rechace la propuesta y la parte del área quede sin cobertura. Un agente rechaza una propuesta de cooperación si su batería no es suficiente (mayor a 20%). Esta relación numérica da un margen de confiabilidad que la propuesta de cubrir nuevos puntos será atendida.

## 5.2.3 Resolución cooperativa del riesgo

La resolución del riesgo se realiza en el momento que los dos agentes seleccionados en el consenso aceptan la propuesta para cubrir al compañero en alerta. Para este apartado la literatura indica que si se conocen los puntos a visitar los agentes pueden replanificar su ruta para incluir los puntos faltantes pero este proceso es costoso computacionalmente y puede generar más alertas a la misión porque se requiere más consumo de energía. El enfoque en esta investigación está planteado no para replanificar sino para extender la ruta inicial del agente que atenderá la decisión. En un primer momento surge la desconexión de los dos nodos de la red seleccionados para colaborar, es decir que ya interactuarían con más

compañeros. Esta priorización puede ser riesgosa porque se pierde la capacidad de monitorearlos, pero se prefiere extender el recurso de energía para conservar el tiempo de vuelo.

El mecanismo consiste en que cada agente monitorea su posición continuamente respecto de los puntos asignados mientras avanza con la tarea de cobertura asignada, y cuando se encuentra cercano a  $3L_x$  (ecuación 1) de algún punto desatendido y asignado, cambia su modo de vuelo a modo guiado y viaja en línea recta hasta alcanzarlo. Una vez lo ha alcanzado cambia su modo de vuelo a navegación autónoma para regresar al punto de paso de su ruta en el que quedó. Puede darse el caso en que en ese retorno se encuentre con otro punto por cubrir, en este caso se retoma el mismo mecanismo de modo de vuelo descrito anteriormente.

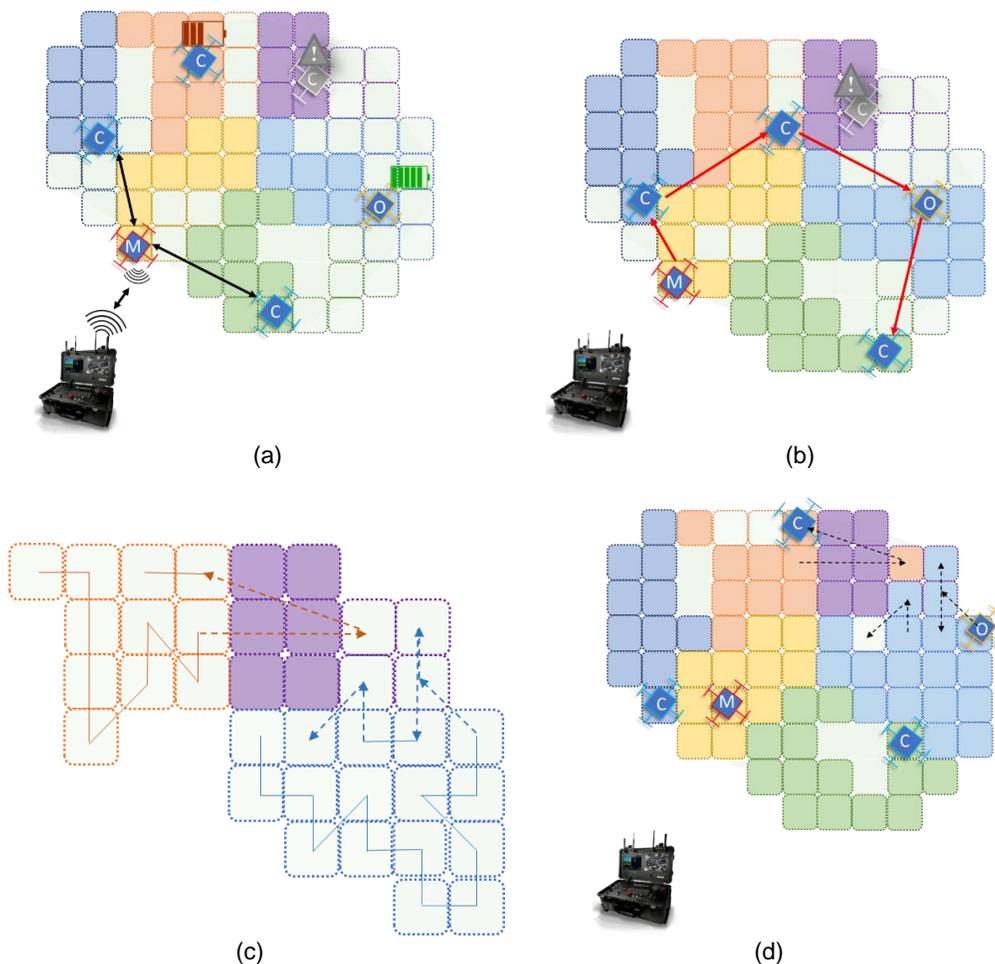


Figura 39. Resolución de alertas (a) Consenso, (b) Enrutamiento, (c) Ruta extendida y (d) Cobertura esperada

Para ilustrar este proceso, la Figura 39 da un ejemplo de una flota con un agente MAV en alerta media. La Figura 39(a) muestra el primer momento en el que

siguiendo el mecanismo de consenso de la sección 5.2.1 el Máster pide datos a la GCS e inicia subasta con los coordinadores más cercanos de los puntos a cubrir cooperativamente. La Figura 39(b) refleja el enrutamiento hacia los nodos vecinos del área objetivo. Hasta ese momento se recibe la propuesta y continúan como nodos activos en la red de MAVs. Entonces cada agente detiene sus interacciones con el resto de la flota, e inicia el proceso de verificación de puntos recibidos, que llegarían a extender su ruta como en la Figura 39(c). Finalmente, en la Figura 39(d) se denota la desconexión de los nodos con la red, y la ejecución de desplazamientos adicionales a la ruta inicial para completar la cobertura de área en alerta.

### **5.3 Herramienta para Generación de Ortofotos**

Una misión de cobertura se puede aplicar a diferentes campos de la agricultura como es la vigilancia, teledetección, el reconocimiento de campo, la aplicación de pesticidas o fertilizante o incluso la búsqueda de animales en el terreno. En este trabajo de investigación la principal aplicación es para mapeo de cultivos a través de fotos, las cuales capturan la respuesta espectral de los árboles del cultivo; con lo cual se puede generar información útil para que un agricultor tome decisiones o más allá se puede predecir el comportamiento de variables como rendimiento. En este sentido, la simulación muestra cómo el sistema responde ante las posibles fallas y posteriormente se verifica el orto mosaico final.

El orto mosaico o la ortofotografía es un cocido de imágenes que es realizado por programas de procesamiento de imágenes aéreas como Open Drone Map<sup>2</sup>(ODM). Este cocido depende de la calidad y la georreferenciación de las imágenes, en el caso de los entornos simulados no se logra alcanzar estas prescripciones porque hay una fuerte dependencia de los recursos computacionales de la estación de trabajo, pero para el estudio que se avanza es una prueba suficiente para demostrar el alcance de los métodos diseñados.

### **5.4 Resultados y Discusión**

El diseño para resolución de fallos presentado anteriormente está inspirado en la revisión bibliográfica que se realizó previamente, de hecho, se asumen las mismas fases (subasta, consenso y resolución) del algoritmo CBBA, extensivamente abordado en las investigaciones sobre asignación descentralizada de tareas. Consecuentemente, se presentan resultados comparativos con este algoritmo ya que es una opción que teóricamente cumple con las restricciones del sistema estudiado. Con el consenso y esquema de enrutamiento de decisión resuelto, se

---

<sup>2</sup> <https://opendronemap.org/>

procede a resolver la cobertura de los nuevos puntos; tarea que no debe sobrepasar la energía restante después de haber entregado el paquete de FIPA-Propose. Las pruebas se plantean bajo un escenario de riesgos bajo y alto, y consideran para la etapa de consenso, métricas de rendimiento desde la llegada del mensaje FIPA-Risk hasta la recepción del mensaje FIPA-Propose por parte del o los agentes que cubrirán la tarea faltante.

Para la resolución de la tarea, se midió el porcentaje de área cubierta de acuerdo con orto-mosaicos generados en la herramienta descrita en la sección 5.3. Esta métrica describe si el método de resolución contribuye a cumplir con la meta de cobertura completa y es calculado usando la diferencia de píxeles entre la imagen esperada y la obtenida por la flota. Los resultados en este caso tienen probabilidad de errar porque la unión de las fotos es dependiente de los métodos disponibles en ODM, pero la comparación con orto mosaico generado en condiciones sin riesgo permite tener apreciación del alcance.

Por otro lado, el espacio de trabajo seleccionado para la prueba y la configuración de la simulación es la misma del capítulo anterior (Sección 4.4). Pero esta vez las alertas se lanzan en el ciclo 200, ya que esto impactaría en la energía disponible de la flota para asumir la resolución del riesgo. En este experimento a diferencia del anterior, las flotas desplegadas para ejecutar el plan MCO sólo llegan hasta 10 MAVs (Figura 40), ya que los recursos computacionales para capturar fotografías durante la simulación no fueron estables para mayor número de MAVs.

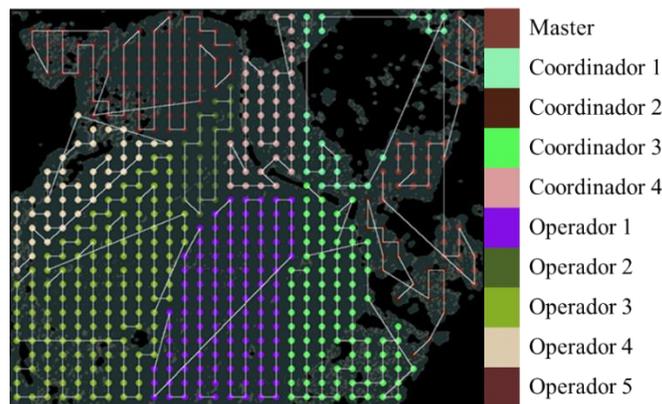


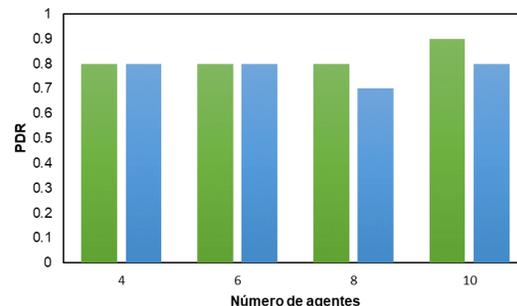
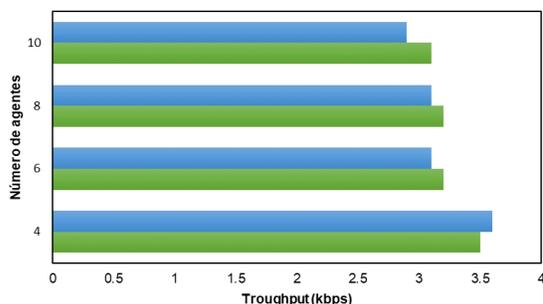
Figura 40. Plan MCO para 10 agentes MAV

### 5.4.1 Etapa de consenso

El tiempo de resolución del riesgo inicia con la solicitud a la estación de tierra del centro del área y los puntos faltantes de la tarea desatendida, este procedimiento tiene sentido desde el plan MCO, ya que los roles tomadores de decisión se ubican cerca de la zona de despegue que para el caso del cultivo de la Figura 40, se

encuentra del lado derecho cerca de las edificaciones. En este caso cuando la solicitud FIPA-Risk (ciclo 202 aproximadamente) llegó al Master, su tarea de cobertura estaba completada y su modo de vuelo se sostiene para mantener altura y posición en el final de la ruta asignada. Una vez los datos son recibidos por el Master inicia el protocolo de consenso con los coordinadores más cercanos usando Contract Net de la Figura 35 y el protocolo CBBA [85]. La comparación de estos mecanismos lleva analizar robustez y eficacia en el proceso de resolución, por tanto, se espera que el consenso sea rápido y que la decisión esté conforme con los recursos disponibles de la flota de MAVs.

En la Figura 41 se encuentran los resultados de rendimiento para un bajo nivel de riesgo, evidenciando el impacto de implementar procesos de negociación durante tiempos prolongados como lo hace CBBA. En particular para el área de estudio, la latencia (Figura 41(c)) se mantuvo sin importar el número de agentes, en un promedio de 203.6 milisegundos, mientras que la resolución con el algoritmo CBBA alcanza 298 milisegundos como promedio. La diferencia de los dos métodos se denota también en la tendencia de CBBA a incrementar la latencia cuando el número de agentes incrementa, esto es coherente puesto que la etapa de consenso requiere la participación síncrona de los negociadores, lo cual puede tomar más tiempo por la dinámica de los MAVs y los posibles enlaces rotos que generan paquetes inconsistentes. Ambos factores incurren en el tiempo para definir la decisión final. Esta situación también puede afectar los resultados de throughput puesto se reduce la efectividad del enrutamiento y aumenta la probabilidad de no resolver la acción. En consecuencia la figura 41(a), demuestra que aunque poco en la mayoría de flotas el throughput es mejor en la propuesta aunque con 4 agentes actuando, el método CBBA muestra un valor superior la diferencia porcentual es cercana al 1%. Con lo anterior se puede decir que aunque haya mayor probabilidad de enlaces rotos por el aumento de interacciones por parte de CBBA, el método desarrollado sostiene una comunicación robusta. De igual forma se observa en la figura 41(b) que el PDR en con cualquiera de los métodos no se ve afectado sin embargo el porcentaje de incertidumbre en el intercambio de información puede verse reflejado en el promedio que para la propuesta es de 0.82 y para el método de CBBA es de 0.77.



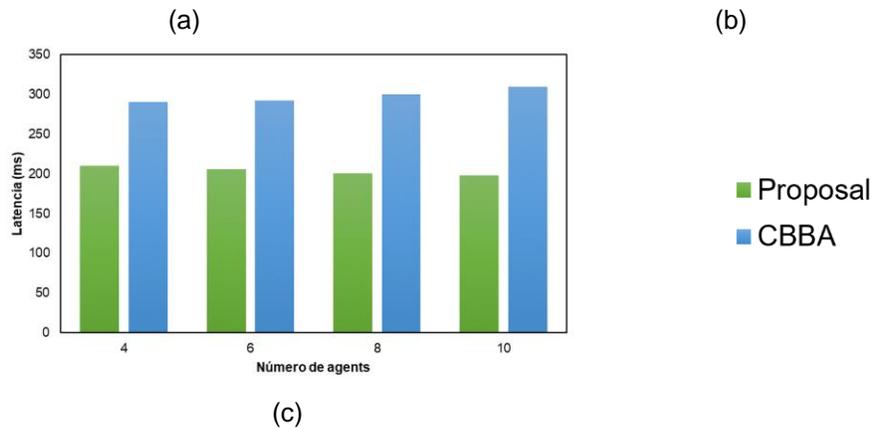
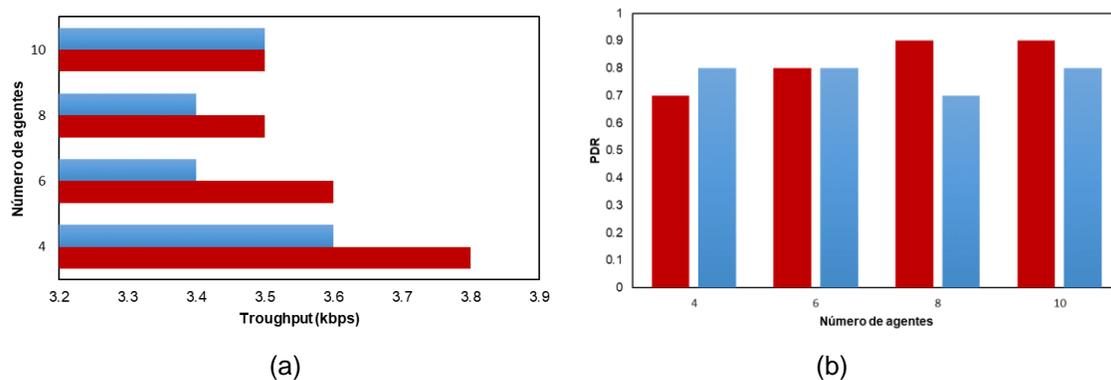
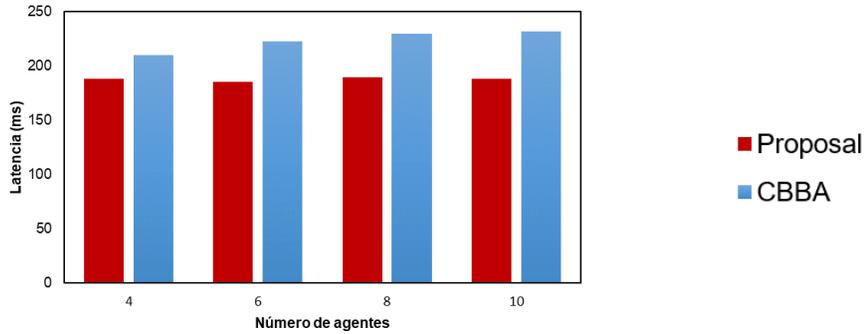


Figura 41. Comparación de mecanismos de consenso en escenario de riesgo bajo (a) throughput, (b) PDR y (c) latencia

Un ejercicio similar, pero lanzando una alerta de alto riesgo, que como se expuso en el capítulo anterior, cambia las condiciones de transmisión para acelerar el proceso de resolución de la tarea. En este caso, se denota que el throughput (Figura 42(a)) fue superior para la propuesta lo cual puede deberse a que la resolución con CBBA refiere el mismo proceso de negociación indiferente del riesgo, por tanto, la adaptación de la propuesta garantiza la entrega de paquetes en un tiempo menor. En cuanto a la métrica de PDR de la figura 42(b) no se denotan cambios significativos respecto del escenario anterior, ya que la razón de paquetes se mantiene en cualquier caso. Sin embargo, se denota que en promedio la propuesta fue superior en 5% respecto a los resultados con el método de CBBA.

Al igual que en el escenario anterior el proceso de negociación afecta significativamente a la medición de latencia que para la propuesta se logra un promedio de 187.8 ms mientras que CBBA resulta con 223.5 ms. Este tiempo infiere en la gestión de la energía durante la misión de cobertura como se observa en la figura 43 y 44.





(c)

Figura 42. Comparación de mecanismos de consenso en escenario de riesgo alto (a) throughput, (b) PDR y (c) latencia

El proceso de negociación de CBBA para tomar una decisión final requiere enlaces de comunicación persistentes entre los agentes, lo cual afecta el tiempo de vida de la flota como se observa en las figuras 43 y 44, necesario para resolver la tarea desatendida. Para resolver esta inferencia se muestran las variaciones de energía para el caso de una flota con 10 MAVs en el mismo espacio de trabajo mencionando. Para el caso del escenario de bajo riesgo la gestión de la energía fue similar con ambos métodos sin embargo después del ciclo 250 se denota la disminución de la batería considerando que la ejecución de la acción correspondiente con el rango asume un gasto adicional que incurres en que la propuesta termine con 19.3% y la resolución con CBBA con 2.45%, esta diferencia en particular es coherente con el mecanismo Contract Net, puesto que el proceso no espera que la decisión del Master sea aceptada por los miembros, simplemente, los coordinadores son portadores de información para que se defina una decisión, es decir se procesa la información distribuidamente pero se asume una decisión de manera centralizada. Este factor hace que el proceso de consenso propuesto mantenga tiempos similares sin importar el tamaño de la flota y con enlaces de comunicación controlados. De esta manera se contribuye a guardar energía más energía.

En el escenario de riesgo alto (Figura 44) se denotan que en tiempos más cercanos al lanzamiento de la alerta (210 ciclos) ambos métodos decaen energía para ejecutar las acciones definidas por la flota, debido a que se aumenta el rango de transmisión al máximo. En el caso de CBBA una razón de decremento mayor a la propuesta alcanzando porcentajes de hasta 6.9% de energía restante comparada con la propuesta que retiene hasta 20.9%. En general se observa que la gestión de energía se supera con el método seleccionado en la tesis y que sin importar el riesgo generado la flota puede contar con un promedio cercano al 8% de energía en tiempo de ejecución para completar la misión de cobertura

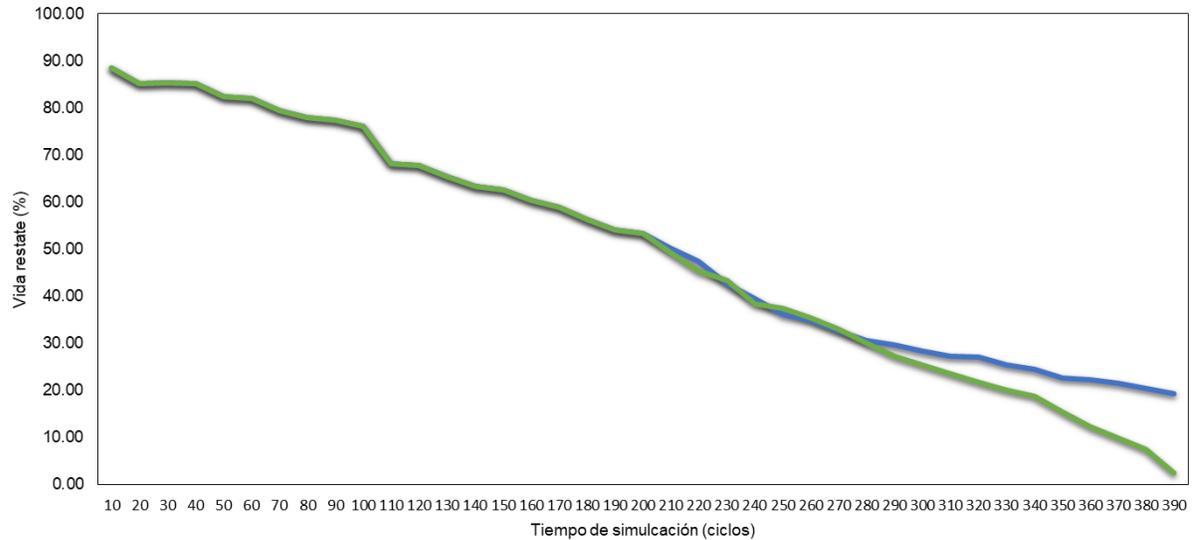


Figura 43. Batería promedio restante durante la misión con alto riesgo de cobertura incompleta

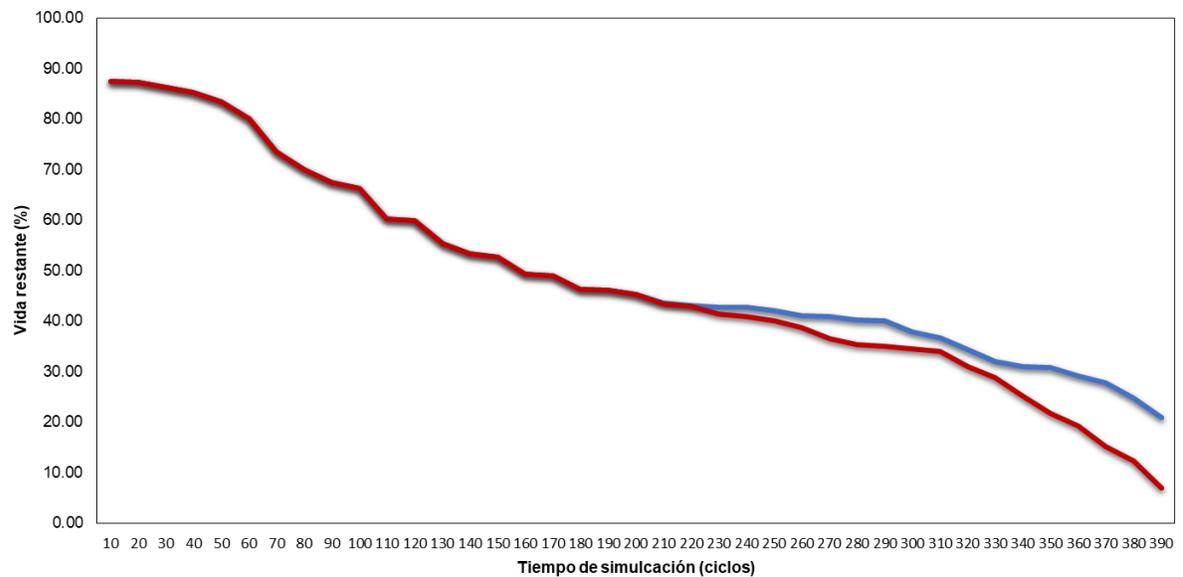


Figura 44. Batería promedio restante durante la misión con alto riesgo de cobertura incompleta

### 5.4.2 Etapa de resolución

La resolución cooperativa de la tarea desatendida está orientada a que los agentes seleccionados para cubrir la labor del compañero en alerta incluyan en su tarea de cobertura los nuevos puntos. En la literatura encontrada se describen diferentes métodos de replanificación de tareas que evidencia eficiencia energética basada en heurísticas; sin embargo, estas alternativas infieren un procesamiento y

almacenamiento en cada agente; por lo cual es necesario un recurso computacional adicional. Es por esto, que la presente propuesta no opta por esta alternativa, sino que aprovecha la dinámica de los agentes dado por su autopiloto para cambiar de modo de vuelo cada vez que está cercano a un punto desatendido. Esta táctica dió como resultado que los agentes puedan cooperar con los puntos desatendidos y terminar la ruta asignada.

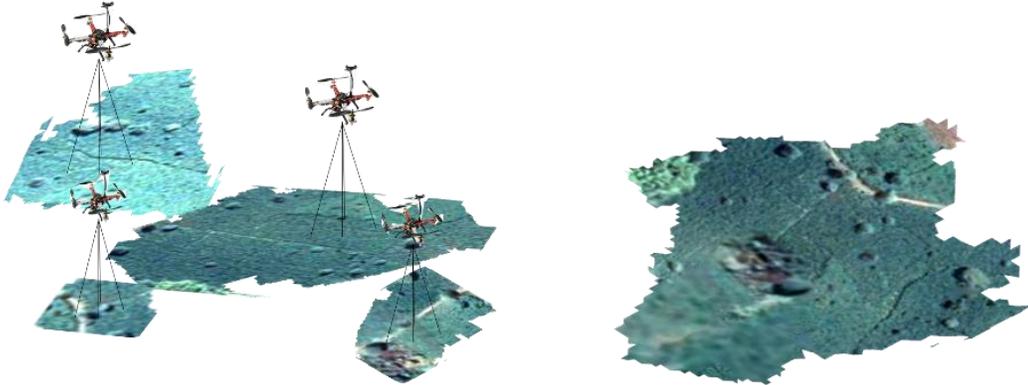


Figura 45. Construcción de orto-mosaico del cultivo de espacio de prueba con 4 agentes

En la Figura 45 denota un ejemplo del proceso de construcción de orto-mosaicos para una flota de cuatro agentes. En un principio se tomó el conjunto de fotos por cada agente para unir luego en un orto-mosaico y de esta manera optimizar procesamiento en la herramienta para formar la ortofoto de todo el espacio de trabajo. Sin embargo, al simular las alertas y avanzar a la resolución, los agentes deben cubrir espacios no planeados en su ruta original, que no necesariamente se encuentran conectados con la tarea de cobertura inicial, por lo cual se optó por realizar el orto-mosaico con el total de las fotos recolectadas como lo muestra el lado derecho de la Figura 45.

Los puntos para atender por cada flota se denotan en la Figura 46 (puntos blancos), los cuales corresponden con el área que un agente no va a visitar desde que reportó una alerta de riesgo de cobertura incompleta. De esos puntos son seleccionados 5 cercanos a una línea recta entre el centro y el final de la ruta desatendida (puntos rojos en la figura 46).

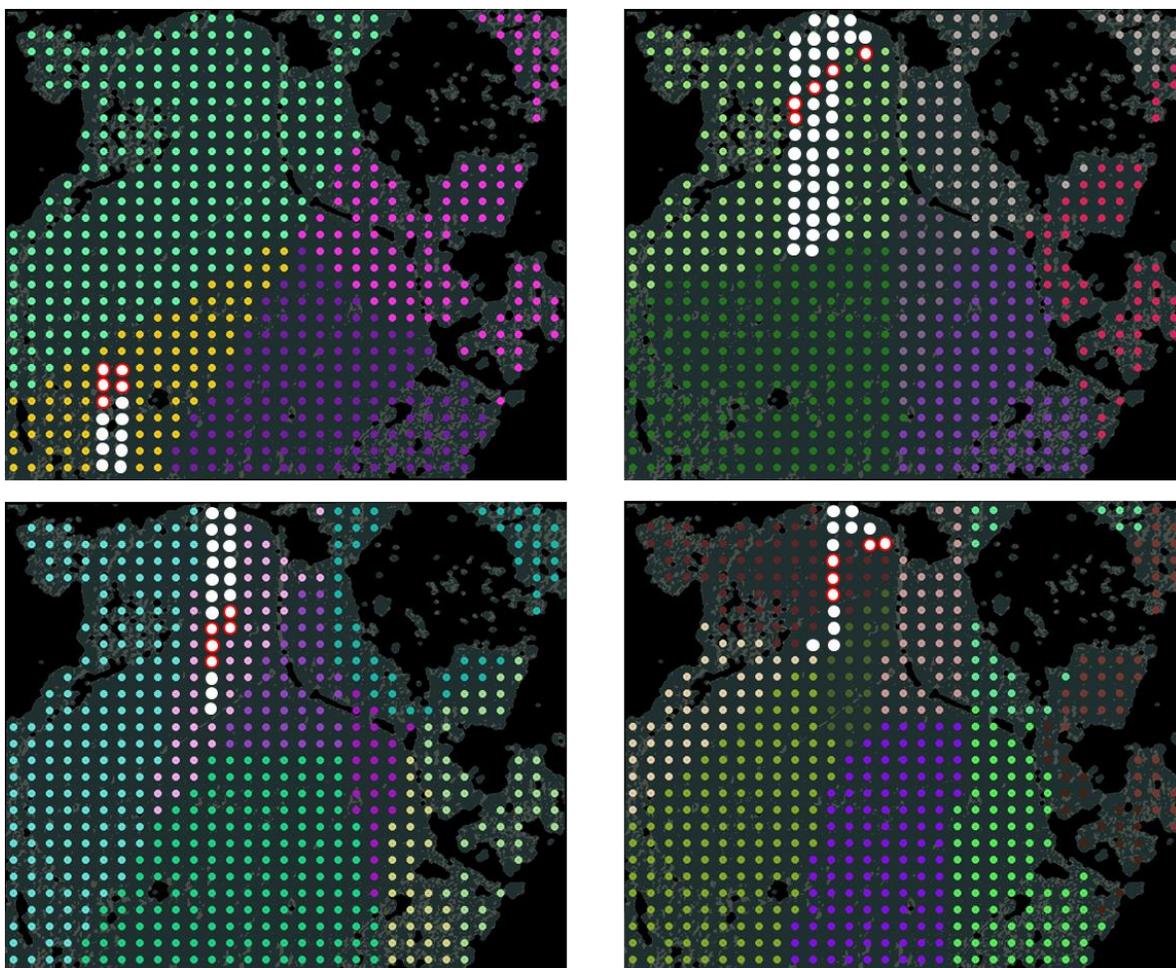


Figura 46. Puntos desatendidos en misiones con riesgo para 4, 6, 8 y 10 agentes MAV.

El resultado de comparar el porcentaje de área cubierta en una misión sin riesgo y en una misión con necesidad de resolución de puntos para bajo y alto riesgo se muestra en la Figura 47. Del diagrama de barras se puede denotar el porcentaje de cobertura aumenta conforme aumenta el número de agentes para cualquier caso. Es notorio también, que la cobertura no es completa incluso sin alerta, porque la construcción de la ortofoto depende del mecanismo de ODM para el proceso de cocido, lo cual depende de la georreferenciación de cada foto, iluminación y otros parámetros que en el simulador no fue posible implementar.

En particular la Figura 46 muestra que para el escenario de bajo riesgo el promedio de cobertura se mantiene en 73.8%, 7 puntos por debajo aproximadamente del resultado en escenario sin riesgo, y para el riesgo alto se mantiene un promedio de 72.1% con 9 puntos del valor esperado. Las diferencias de cobertura en cada flota tienen origen en los puntos que el colaborador deja de visitar a pesar de resolver aquellos asignados por la decisión de la flota, ya que subáreas resultantes para pocos agentes, son grandes en comparación con los 5 puntos distribuidos en línea recta. Contrariamente sucede para equipo de un número mayor de agentes que hay

mayor probabilidad de cobertura puesto que las subáreas suelen no solo estar conectadas, sino que resultan con tamaños más pequeños facilitando la visita por parte de los colaboradores asignados para resolver el riesgo.

En general el sistema es capaz de garantizar hasta el 72% de cobertura en un escenario con un MAV en alerta.

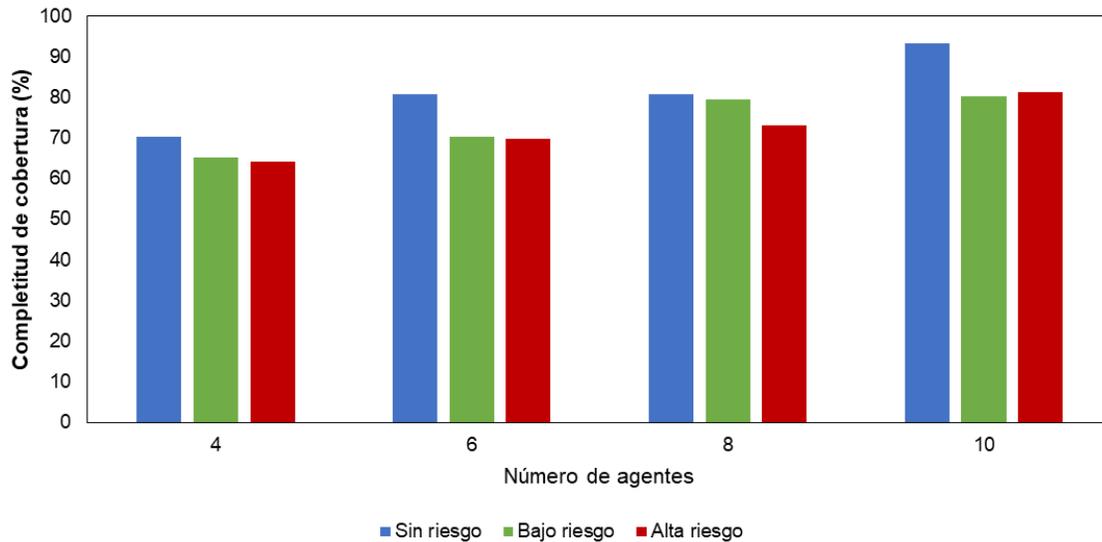


Figura 47. Porcentaje de cobertura cubierto durante una cobertura completa (barras azules) y cobertura con riesgo de alerta de alto nivel (barras naranjas)

En este apartado no se reportan resultados con el método CBBA porque la energía restante en los drones no permitió validar acciones de replanificación que es lo que en la mayoría de literatura relacionada se sugiere implementar.

## 5.5 Resumen

Este capítulo describió el método para que la sociedad MCO aborde las alertas generadas durante una misión de cobertura. El método realiza un consenso centralizado entre Máster y Coordinadores, para luego asignar dos agentes en operación y en condiciones para visitar cinco nuevos puntos que el agente en alerta haya dejado de atender. Este planteamiento resulta de validaciones comparadas con el método CBBA indicado por la literatura para resolución de tareas cooperativas; exponiendo que la robustez y la energía se puede gestionar efectivamente para garantizar hasta un 72% de cobertura del área según el análisis de orto-mosaicos.

## Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se plantean los logros y retos que se tuvieron en la investigación y se dejan expectativas para continuar con la investigación sobre la factibilidad de apropiar tecnologías multi-MAV en ámbitos como la agricultura de precisión considerando entornos y limitaciones de los agricultores pequeños y medianos.

### 6.1 Conclusiones

En este estudio se propuso un sistema multi-UAV eficiente energéticamente y robusto ante fallos durante misiones de cobertura de cultivos. El desarrollo estuvo limitado por requisitos para ser desplegado en ambientes dinámicos y para ser apropiado para labores de agricultura de precisión. Desde ese punto de vista se lograron consolidar tres contribuciones; la primer y más relevante es un método de bajo costo computacional para asignación de tarea de cobertura a una flota de MAVs con capacidades limitadas de energía, comunicación y cognición. El segundo aporte es un modelo de comunicación eficiente para interacciones limitadas y enrutamiento planeado, el cual fue consecuente con el planteamiento de conectividad del método llamado MCO para asignación de tareas. Finalmente, la tercera contribución es refiere a la resolución de misiones de cobertura para el caso de MAVs inhabilitados para completar la tarea asignada. El método fue pensado en aprovechar los recursos de dos agentes de la flota para solucionar el riesgo de misión incompleta bajo un proceso centralizado de decisión que evita inversión adicional de energía y comunicaciones. Todas las contribuciones en conjunto forman parte de un sistema multi-UAV para misiones de cobertura aplicadas no solo para adquisición de información sino también para otros procesos en la agricultura de precisión como riego y distribución de pesticidas.

Desde arista de sofisticación tecnológica se puede decir que el sistema desarrollado está basado en métodos con requerimientos computacionales mínimos. Esta conclusión se argumenta desde la selección de línea temática para cada una de las contribuciones, ya que en la inmensidad de publicaciones para asignación de tareas, enrutamiento y resolución de fallos se decidió por aquellas alternativas que evitará al máximo el consumo de energía de cada dron. Es así como la asignación de rutas sigue protocolos FIPA simples y el algoritmo Firefly que mostró ser ágil para encontrar la ruta óptima. Este proceso además es realizado por una estación de tierra, lo cual no involucra la participación de agentes, ni tampoco implica tener

una capacidad computacional alta y un software para visualización y monitoreo de misiones, tales como QGroundControl y Mission Planner. Si fijamos la mirada en el método de comunicación, se puede denotar que la solución no sigue mecanismos que impliquen almacenamiento como es el caso de los enrutamientos proactivos que se basan en tablas de vecinos para conducir los paquetes a un destinatario. En este caso el enrutamiento reactivo propuesto y además adaptativo sólo se atribuye a monitoreo de variables individuales implantados por defecto en los autopilotos. Finalmente, en relación con la resolución de fallos en la misión dados por uno o dos MAV de baja, se consideró la distribución de la información que se da como consecuencia del modelo de comunicación y se simplificaron las acciones para cubrir áreas no visitadas mediante una gestión de modos de vuelo. Este método centralizado no implica negociación para tomar la decisión, superando a CBBA como mecanismo descentralizado en cuanto a gestión energética, ya que se evita las interacciones prolongadas para llevar a consenso. El impacto del método seleccionado en la cobertura del espacio de trabajo es relevante porque es posible que puntos desatendidos no se resuelvan, pero los resultados observados a través de la comparación de los orto mosaicos indican una confianza en la completitud de la cobertura aceptable que incrementa con un mayor número de agentes cooperando.

Por otro lado, desde la perspectiva del dominio de aplicación la tecnología desarrollada establece un aporte para satisfacer una necesidad actual de las labores en campo, como es la adquisición de información de manera ágil, para aumentar la efectividad de las acciones. En estas labores no solo esta la agricultura, que para el caso de países como Colombia son relevantes, también están la atención a desastres dados por deslizamientos, inundaciones e incendios, la arqueología, entre otras; que requieren información completa de manera rápida desde ambientes agrestes o extensos en los cuales el acceso de personal debe ser restringido. El sistema multi-MAV fue pensado para este tipo de requerimientos, ya que actualmente la tecnología disponible, incluidos drones, no logra ser apropiada para la capacidad de adquisición y manejo de todos los usuarios en las diferentes aplicaciones. Con este sistema no solo se supera la autonomía de vuelo de un solo UAV, sino que también se corre la brecha para que usuarios con poco conocimiento de la tecnología de drones comerciales, logren aprovechar los resultados sofisticados para una necesidad dada sin inversiones desbordadas.

El reto con el uso masivo de este tipo de tecnología no solo se encuentra en simplificar la sofisticación tecnológica, se debe trabajar también en la integración con los procesos ya sea de agricultura de precisión, investigación en campo o atención a desastres. En este sentido el sistema multi-MAV propuesto fue pensado para usar herramientas comerciales como drones basados en autopilotos con

suficiente divulgación (DJI, Ardupilot y Pixhawk) para no causar impacto en el adiestramiento de usuarios y también para no requerir inversión en infraestructura que soporte la misión. Esto fue posible mediante un modelo de comunicación de red ad-hoc que garantizó evitar pérdidas de agentes durante la misión y controlar el consumo energético de toda la flota para cooperar y completar las tareas de cobertura. Además, el sistema no restringe la inversión en MAVs, por lo que un usuario puede realizar una misión con al menos dos UAVs heterogéneos u homogéneos que sigan un protocolo abierto de comunicación (para este caso fue elegido MAVLink), considerando desde luego que el área a visitar no puede ser mayor que 3 veces la capacidad del vehículo con mejores recursos.

Finalmente, el sistema multi-MAV propuesto es la base para avanzar a la transferencia tecnológica y contemplar una ruta comercial. Esta concepción es posible porque el sistema no involucra acciones deliberadas o aprendizaje automático en cada agente, las cuales están restringidas en la mayoría de las regulaciones de los países, además que los agentes no tienen la capacidad de carga útil para efectuar operaciones militares, transporte animales/humanos o reparto de mercancía. Esto quiere decir, que el sistema está clasificado para misiones programadas remotamente monitoreadas, evitando la afectación descontrolada a infraestructura civil y seres vivos en tierra. Más allá, el sistema contempla mitigación de fallos de los agentes por situaciones de averías internas, deriva o colisiones mediante la programación de modo de vuelo como sostenido o retorno a casa según sea el caso.

## 6.2 Trabajos futuros

Respecto a la asignación de tareas de cobertura que resulta en el plan MCO se propone mejorar su eficiencia considerando la optimización de las rutas calculadas considerando la dirección del viento para modificar las líneas de vuelo. Con esta modificación se esperaría una disminución contundente en el gasto de la energía durante la tarea de cobertura, sin embargo se debe diseñar una estrategia para que la proporción de interacciones concebida por la disposición de la área se mantenga sin afectar a su vez el modelo de comunicación. Esta alternativa es ampliamente conocida en conjunto con la consideración de planificar rutas suavizadas con la técnica de Dubins sobre todo si se desea incluir MAV de ala fija [87].

El trabajo en el modelo de comunicaciones debe continuar refinándose con la experimentación real de módulos de comunicación para retroalimentar el modelo y mejorar las métricas de throughput y latencia que evidencian la robustez del sistema. En específico se debe discriminar los efectos del canal seleccionado para

la transmisión de paquetes y la gestión de frecuencias asignadas a cada MAV para no entorpecer el monitoreo en tiempo cercano a lo real. Además, se puede restringir las interacciones de los agentes contemplando la predicción de la localización del vecino al que se compartirá el paquete de datos para evitar inundación de la red, sin dejar de lado el requerimiento de eficiencia energética y de PDR.

Respecto de la última fase para resolver el riesgo de cobertura incompleta de manera cooperativa, es necesario mejorar las propiedades de los simuladores que permitan añadir georreferenciación a las fotos capturadas para evitar incertidumbres en los orto mosaicos generado para probar la capacidad de resolución del sistema y de la misma añadir la capacidad para controlar la gestión de energía por la dinámica del MAV durante los cambios de modo de vuelo, lo cual impacta en el tiempo de misión y el consumo de energía. Gazebo al ser un software libre permite la gestión de esta propuesta, sin embargo, se esperaría que el despliegue de agentes robóticos reales en entornos agrícolas pueda dar cuenta de las capacidades del sistema diseñado.

Finalmente, se plantea la posibilidad de extender la heterogeneidad de la flota, para incluir UAVs de ala fija o híbridos, los cuales conllevan a nuevas restricciones de planificación de ruta sobre todo para espacios de trabajo sin zonas planas o campo abierto amplio. Esta propuesta es concebida para aquellos usuarios que se enmarcan en aplicaciones de cobertura con cartografía y/o topografía que regularmente despliegan este tipo de drones. Además, de la variación en la estructura de aéreo-navegación, el sistema diseñado se puede ampliar para todo tipo de vehículos no tripulados como sub-marinos y robots móviles.

## Referencias

- [1] FAA, “Certificated Remote Pilots including Commercial Operators | Federal Aviation Administration”, 2021. [https://www.faa.gov/uas/commercial\\_operators](https://www.faa.gov/uas/commercial_operators) (consultado el 13 de diciembre de 2022).
- [2] R. Almadhoun, T. Taha, L. Seneviratne, y Y. Zweiri, “A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping”, *SN Appl. Sci.*, vol. 1, núm. 8, p. 847, jul. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0872-y.
- [3] P. Daponte *et al.*, “A review on the use of drones for precision agriculture”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 275, núm. 1, p. 012022, may 2019, doi: 10.1088/1755-1315/275/1/012022.
- [4] L. Campo, A. Ledezma Espino, y J. Corrales, “Optimization of coverage mission for lightweight unmanned aerial vehicles applied in crop data acquisition”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 149, p. 113227, jul. 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113227.
- [5] M. N. Boukoberine, Z. Zhou, y M. Benbouzid, “Power Supply Architectures for Drones - A Review”, en *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, oct. 2019, vol. 1, pp. 5826–5831. doi: 10.1109/IECON.2019.8927702.
- [6] B. Kada, M. Khalid, y M. S. Shaikh, “Distributed cooperative control of autonomous multi-agent UAV systems using smooth control”, *J. Syst. Eng. Electron.*, vol. 31, núm. 6, pp. 1297–1307, dic. 2020, doi: 10.23919/JSEE.2020.000100.
- [7] DARPA, “Gremlins”, 2019. <https://www.darpa.mil/program/gremlins> (consultado el 13 de diciembre de 2022).
- [8] TNN, “Light and sound: 1,000 drones to fly in sync during beating retreat in Delhi”, *The Times of India*, el 24 de enero de 2022. Consultado: el 13 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/delhi/light-and-sound-1000-drones-to-fly-in-sync-during-beating-retreat/articleshow/88982331.cms>
- [9] M. Aljehani y M. Inoue, “Communication and Autonomous Control of Multi-UAV System in Disaster Response Tasks”, en *Agent and Multi-Agent Systems: Technology and Applications*, 2017, pp. 123–132.
- [10] W. Jing, D. Deng, Y. Wu, y K. Shimada, “Multi-UAV Coverage Path Planning for the Inspection of Large and Complex Structures”, en *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, oct. 2020, pp. 1480–1486. doi: 10.1109/IROS45743.2020.9341089.
- [11] M. Asim, M. ELAffendi, y A. A. A. El-Latif, “Multi-IRS and Multi-UAV-Assisted MEC System for 5G/6G Networks: Efficient Joint Trajectory Optimization and Passive Beamforming Framework”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3178896.
- [12] L. V. Campo, A. Ledezma, y J. C. Corrales, “MCO Plan: Efficient Coverage Mission for Multiple Micro Aerial Vehicles Modeled as Agents”, *Drones*, vol. 6, núm. 7, 2022, doi: 10.3390/drones6070181.
- [13] Q. Zhang, Ed., *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. Taylor & Francis, 2015. doi: 10.1201/b19336.

- [14] S. P. de Martí, “AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y PROTECCIÓN DE CULTIVOS”, *Rev. Ing.*, núm. 47, Art. núm. 47, ene. 2019, doi: 10.16924/riua.v0i47.985.
- [15] A. Comparetti, *Precision Agriculture: Past, Present and Future*. 2011.
- [16] C. Di Franco y G. Buttazzo, “Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints”, *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 83, núm. 3, pp. 445–462, sep. 2016, doi: 10.1007/s10846-016-0348-x.
- [17] A. Ch. Kapoutsis, S. A. Chatzichristofis, y E. B. Kosmatopoulos, “DARP: Divide Areas Algorithm for Optimal Multi-Robot Coverage Path Planning”, *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 86, núm. 3, pp. 663–680, jun. 2017, doi: 10.1007/s10846-016-0461-x.
- [18] A. Khan, I. Noreen, y Z. Habib, “On complete coverage path planning algorithms for non-holonomic mobile robots: Survey and challenges”, *J. Inf. Sci. Eng.*, vol. 33, pp. 101–121, ene. 2017, doi: 10.6688/JISE.2017.33.1.7.
- [19] Y. Rizk, M. Awad, y E. W. Tunstel, “Cooperative Heterogeneous Multi-Robot Systems: A Survey”, *ACM Comput. Surv.*, vol. 52, núm. 2, p. 29:1-29:31, abr. 2019, doi: 10.1145/3303848.
- [20] S. A. H. Mohsan, M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, y M. H. Alsharif, “Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review”, *Drones*, vol. 6, núm. 6, Art. núm. 6, jun. 2022, doi: 10.3390/drones6060147.
- [21] E. Bone y C. Bolkcom, “Unmanned Aerial Vehicles: Background and Issues for Congress”, *UNT Digital Library*, el 25 de abril de 2003. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metacrs5693/> (consultado el 13 de diciembre de 2022).
- [22] X. Chen, J. Tang, y S. Lao, “Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols”, *Appl. Sci.*, vol. 10, núm. 10, Art. núm. 10, ene. 2020, doi: 10.3390/app10103661.
- [23] S. N., K. C. R.M., R. M.M., y M. N. Janardhanan, “Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems”, *Ind. Robot Int. J. Robot. Res. Appl.*, vol. 47, núm. 6, pp. 929–942, ene. 2020, doi: 10.1108/IR-04-2020-0073.
- [24] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, y Ş. Temel, “Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey”, *Ad Hoc Netw.*, vol. 11, núm. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [25] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, y M. Mattsson, “Systematic Mapping Studies in Software Engineering”, jun. 2008, doi: 10.14236/ewic/EASE2008.8.
- [26] A. Rejeb, A. Abdollahi, K. Rejeb, y H. Treiblmaier, “Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis”, *Comput. Electron. Agric.*, vol. 198, 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.107017.
- [27] Clarivate, “Web of Science”, *Web of Science Group*, 2022. <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/> (consultado el 4 de octubre de 2022).
- [28] Centre for Science and Technology Studies, “VOSviewer - Visualizing scientific landscapes”, *VOSviewer*, 2022. <https://www.vosviewer.com/> (consultado el 4 de octubre de 2022).
- [29] I. Maza y A. Ollero, “Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms”, en *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, Springer, 2007, pp. 221–230.

- 
- [30] J. Valente *et al.*, *Multi-robot Visual Coverage Path Planning: Geometrical Metamorphosis of the Workspace through Raster Graphics Based Approaches*. 2011, p. 73. doi: 10.1007/978-3-642-21931-3\_5.
- [31] J. Araujo, P. Sujit, y J. B. Sousa, “Multiple UAV area decomposition and coverage”, en *Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA), 2013 IEEE Symposium on*, 2013, pp. 30–37.
- [32] J. J. Acevedo, B. C. Arrue, J. M. Diaz-Bañez, I. Ventura, I. Maza, y A. Ollero, “One-to-One Coordination Algorithm for Decentralized Area Partition in Surveillance Missions with a Team of Aerial Robots”, *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 74, núm. 1, pp. 269–285, abr. 2014, doi: 10.1007/s10846-013-9938-z.
- [33] F. Balampanis, I. Maza, y A. Ollero, “Area Partition for Coastal Regions with Multiple UAS”, *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 88, núm. 2, pp. 751–766, dic. 2017, doi: 10.1007/s10846-017-0559-9.
- [34] S. Xing, R. Wang, y G. Huang, “Area Decomposition Algorithm for Large Region Maritime Search”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 205788–205797, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3037679.
- [35] G. Skorobogatov, C. Barrado, E. Salamí, y E. Pastor, “Flight planning in multi-unmanned aerial vehicle systems: Nonconvex polygon area decomposition and trajectory assignment”, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 18, núm. 1, p. 1729881421989551, ene. 2021, doi: 10.1177/1729881421989551.
- [36] G. Skorobogatov, C. Barrado, y E. Salamí, “Multi-Robot Workspace Division Based on Compact Polygon Decomposition”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 165795–165805, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3134760.
- [37] E. Yanmaz, R. Kuschig, M. Quaritsch, C. Bettstetter, y B. Rinner, “On path planning strategies for networked unmanned aerial vehicles”, en *2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, abr. 2011, pp. 212–216. doi: 10.1109/INFCOMW.2011.5928811.
- [38] G. Q. Long y X. P. Zhu, “Cooperative Area Coverage Reconnaissance Method for Multi-UAV System”, *Adv. Mater. Res.*, vol. 383–390, pp. 4141–4146, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.4141.
- [39] G. Leng, Z. Qian, y V. Govindaraju, “Multi-UAV Surveillance over Forested Regions”, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 80, núm. 12, pp. 1129–1137, dic. 2014, doi: 10.14358/PERS.80.12.1129.
- [40] S. Ann, Y. Kim, y J. Ahn, “Area allocation algorithm for multiple UAVs area coverage based on clustering and graph method”, *IFAC-Pap.*, vol. 48, núm. 9, pp. 204–209, 2015.
- [41] J. Chen, C. Du, Y. Zhang, P. Han, y W. Wei, “A Clustering-Based Coverage Path Planning Method for Autonomous Heterogeneous UAVs”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1109/TITS.2021.3066240.
- [42] G. Sanna, S. Godio, y G. Guglieri, “Neural Network Based Algorithm for Multi-UAV Coverage Path Planning”, en *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, jun. 2021, pp. 1210–1217. doi: 10.1109/ICUAS51884.2021.9476864.
- [43] M. A. Khan, A. Safi, I. M. Qureshi, y I. U. Khan, “Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols”, en *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering*

- and Computing Technologies (INTELLECT)*, nov. 2017, pp. 1–9. doi: 10.1109/INTELLECT.2017.8277614.
- [44] L. Ruan *et al.*, “Energy-efficient multi-UAV coverage deployment in UAV networks: A game-theoretic framework”, *China Commun.*, vol. 15, núm. 10, pp. 194–209, oct. 2018, doi: 10.1109/CC.2018.8485481.
- [45] Q. Guo, J. Yan, y W. Xu, “Localized Fault Tolerant Algorithm Based on Node Movement Freedom Degree in Flying Ad Hoc Networks”, *Symmetry*, vol. 11, núm. 1, Art. núm. 1, ene. 2019, doi: 10.3390/sym11010106.
- [46] M. Tropea, A. F. Santamaria, F. D. Rango, y G. Potrino, “Reactive Flooding versus Link State Routing for FANET in Precision Agriculture”, en *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, ene. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/CCNC.2019.8651744.
- [47] W. You, C. Dong, X. Cheng, X. Zhu, Q. Wu, y G. Chen, “Joint Optimization of Area Coverage and Mobile-Edge Computing With Clustering for FANETs”, *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, núm. 2, pp. 695–707, ene. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3006891.
- [48] G. Raja, S. Anbalagan, A. Ganapathisubramaniyan, M. S. Selvakumar, A. K. Bashir, y S. Mumtaz, “Efficient and Secured Swarm Pattern Multi-UAV Communication”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, núm. 7, pp. 7050–7058, jul. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3082308.
- [49] S. S. Sefati, S. Halunga, y R. Z. Farkhady, “Cluster selection for load balancing in flying ad hoc networks using an optimal low-energy adaptive clustering hierarchy based on optimization approach”, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 94, núm. 8, pp. 1344–1356, ene. 2022, doi: 10.1108/AEAT-08-2021-0264.
- [50] Q. Usman, O. Chughtai, N. Nawaz, Z. Kaleem, K. A. Khaliq, y L. D. Nguyen, “A Reliable Link-adaptive Position-based Routing Protocol for Flying Ad hoc Network”. arXiv, el 12 de octubre de 2020. doi: 10.48550/arXiv.2010.06005.
- [51] Y. Cheriguene *et al.*, “COCOMA: a resource-optimized cooperative UAVs communication protocol for surveillance and monitoring applications”, *Wirel. Netw.*, 2022, doi: 10.1007/s11276-022-03031-8.
- [52] B. Z. Hilyatur Rozaliya, I.-L. Wang, y A. Muklason, “Multi-UAV routing for maximum surveillance data collection with idleness and latency constraints”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 197, pp. 264–272, ene. 2022, doi: 10.1016/j.procs.2021.12.140.
- [53] R. Zahínos, H. Abaunza, J. I. Murillo, M. A. Trujillo, y A. Viguria, “Cooperative Multi-UAV System for Surveillance and Search&Rescue Operations Over a Mobile 5G Node”, en *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, jun. 2022, pp. 1016–1024. doi: 10.1109/ICUAS54217.2022.9836167.
- [54] Q. Zhu, R. Zhou, y J. Zhang, “Connectivity Maintenance Based on Multiple Relay UAVs Selection Scheme in Cooperative Surveillance”, *Appl. Sci.*, vol. 7, núm. 1, Art. núm. 1, ene. 2017, doi: 10.3390/app7010008.
- [55] J. Sánchez García, “Mission-based mobility models for UAV networks”, jun. 2019, Consultado: el 19 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/88172>

- 
- [56] E. Vlasceanu, D. Popescu, y L. Ichim, “Aerial Robotic Team for Complex Monitoring in Precision Agriculture”, en *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, may 2019, pp. 167–169. doi: 10.1109/DCOSS.2019.00044.
- [57] A. G. Orozco-Lugo *et al.*, “Monitoring of water quality in a shrimp farm using a FANET”, *Internet Things*, vol. 18, p. 100170, may 2022, doi: 10.1016/j.iot.2020.100170.
- [58] D.-Y. Kim y J.-W. Lee, “Joint Mission Assignment and Topology Management in the Mission-Critical FANET”, *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, núm. 3, pp. 2368–2385, mar. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2958130.
- [59] F. De Rango, G. Potrino, M. Tropea, A. F. Santamaria, y P. Fazio, “Scalable and lighthway bio-inspired coordination protocol for FANET in precision agriculture applications”, *Comput. Electr. Eng.*, vol. 74, pp. 305–318, mar. 2019, doi: 10.1016/j.compeleceng.2019.01.018.
- [60] K.-S. Kim, H.-Y. Kim, y H.-L. Choi, “A Bid-Based Grouping Method for Communication-Efficient Decentralized Multi-UAV Task Allocation”, *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 21, núm. 1, pp. 290–302, mar. 2020, doi: 10.1007/s42405-019-00205-1.
- [61] J. Scherer y B. Rinner, “Multi-UAV Surveillance With Minimum Information Idleness and Latency Constraints”, *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, núm. 3, pp. 4812–4819, jul. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3003884.
- [62] Q. Sang, H. Wu, L. Xing, H. Ma, y P. Xie, “An Energy-Efficient Opportunistic Routing Protocol Based on Trajectory Prediction for FANETs”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 192009–192020, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032956.
- [63] N. Nigam, “Dynamic Replanning for Multi-UAV Persistent Surveillance”, en *AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi: 10.2514/6.2013-4887.
- [64] W. Zhao y B. Bonakdarpour, “Decentralized Multi-UAV Routing in the Presence of Disturbances”. arXiv, el 12 de julio de 2018. doi: 10.48550/arXiv.1807.04823.
- [65] H.-X. Chen, Y. Nan, y Y. Yang, “Real-time Conflict Resolution Algorithm for Multi-UAV Based on Model Predict Control”, *Algorithms*, vol. 12, núm. 2, p. 47, feb. 2019, doi: 10.3390/a12020047.
- [66] J. Chen, X. Qing, F. Ye, K. Xiao, K. You, y Q. Sun, “Consensus-based bundle algorithm with local replanning for heterogeneous multi-UAV system in the time-sensitive and dynamic environment”, *J. Supercomput.*, vol. 78, feb. 2022, doi: 10.1007/s11227-021-03940-z.
- [67] Y. Zhang, W. Feng, G. Shi, F. Jiang, M. Chowdhury, y S. H. Ling, “UAV Swarm Mission Planning in Dynamic Environment Using Consensus-Based Bundle Algorithm”, *Sensors*, vol. 20, núm. 8, Art. núm. 8, ene. 2020, doi: 10.3390/s20082307.
- [68] F. Ye, J. Chen, Q. Sun, Y. Tian, y T. Jiang, “Decentralized task allocation for heterogeneous multi-UAV system with task coupling constraints”, *J. Supercomput.*, vol. 77, núm. 1, pp. 111–132, ene. 2021, doi: 10.1007/s11227-020-03264-4.

- [69] B. Sabetghadam, R. Cunha, y A. Pascoal, “A Distributed Algorithm for Real-Time Multi-Drone Collision-Free Trajectory Replanning”, *Sensors*, vol. 22, núm. 5, Art. núm. 5, ene. 2022, doi: 10.3390/s22051855.
- [70] M. H. Dominguez, J.-I. Hernández-Vega, D.-G. Palomares-Gorham, C. Hernández-Santos, y J. S. Cuevas, “A BDI Agent System for the Collaboration of the Unmanned Aerial Vehicle”, *Res Comput Sci*, 2016, doi: 10.13053/RCS-121-1-10.
- [71] D. Juneja, “A Review of FIPA Standardized Agent Communication Language and Interaction Protocols”, 2016. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-of-FIPA-Standardized-Agent-Communication-Juneja/c0a8120520bda9b4470dfcea01dedfa862f826bf> (consultado el 4 de mayo de 2022).
- [72] H. Choset y P. Pignon, “Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition”, en *Field and service robotics*, 1998, pp. 203–209.
- [73] Q. Du, V. Faber, y M. Gunzburger, “Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms”, *SIAM Rev.*, vol. 41, núm. 4, pp. 637–676, ene. 1999, doi: 10.1137/S0036144599352836.
- [74] R. He, W. Xu, J. Sun, y B. Zu, “Balanced K-Means Algorithm for Partitioning Areas in Large-Scale Vehicle Routing Problem”, en *2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, nov. 2009, vol. 3, pp. 87–90. doi: 10.1109/IITA.2009.307.
- [75] X.-S. Yang y X. He, “Firefly algorithm: recent advances and applications”, *Int. J. Swarm Intell.*, vol. 1, núm. 1, pp. 36–50, ene. 2013, doi: 10.1504/IJSI.2013.055801.
- [76] B. P. Gerkey y M. J. Mataric, “A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems”, *Int. J. Robot. Res.*, vol. 23, núm. 9, pp. 939–954, sep. 2004, doi: 10.1177/027836490404045564.
- [77] Z. Alarabiat, A. Alarabeyyat, y O. AlHeyasat, “Development of FIPA english auction interaction protocol for multi-agent systems”, 2014, doi: 10.12988/CES.2014.411237.
- [78] S. Tisue y U. Wilensky, “Netlogo: A simple environment for modeling complexity”, en *International conference on complex systems*, 2004, vol. 21, pp. 16–21.
- [79] M. North, T. Howe, N. Collier, y J. Vos, “Repast Symphony runtime system”, *Proc. Agent 2005 Conf. Gener. Soc. Process. Models Mech.*, vol. 1, ene. 2005.
- [80] M. Pujol-Gonzalez, J. Cerquides, y P. Meseguer, “MAS-planes: A multi-agent simulation environment to investigate decentralized coordination for teams of UAVs”, *13th Int. Conf. Auton. Agents Multiagent Syst. AAMAS 2014*, vol. 2, pp. 1695–1696, ene. 2014.
- [81] A. Drogoul *et al.*, “GAMA: A Spatially Explicit, Multi-level, Agent-Based Modeling and Simulation Platform”, en *Advances on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 271–274. doi: 10.1007/978-3-642-38073-0\_25.
- [82] J. Chen, F. Ling, Y. Zhang, T. You, Y. Liu, y X. Du, “Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system”, *Swarm Evol. Comput.*, vol. 69, p. 101005, mar. 2022, doi: 10.1016/j.swevo.2021.101005.

- 
- [83] D. S. Pereira *et al.*, “Zigbee Protocol-Based Communication Network for Multi-Unmanned Aerial Vehicle Networks”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57762–57771, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2982402.
- [84] S. Acharya, A. Bharadwaj, Y. Simmhan, A. Gopalan, P. Parag, y H. Tyagi, “CORNET: A Co-Simulation Middleware for Robot Networks”, en *2020 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, ene. 2020, pp. 245–251. doi: 10.1109/COMSNETS48256.2020.9027459.
- [85] H.-L. Choi, L. Brunet, y J. P. How, “Consensus-Based Decentralized Auctions for Robust Task Allocation”, *IEEE Trans. Robot.*, vol. 25, núm. 4, pp. 912–926, ago. 2009, doi: 10.1109/TRO.2009.2022423.
- [86] H. M. P. C. Jayaweera y S. Hanoun, “Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Windy Environments”, *Drones*, vol. 6, núm. 5, Art. núm. 5, may 2022, doi: 10.3390/drones6050101.
- [87] T. Phillips *et al.*, “Learn to Path: Using neural networks to predict Dubins path characteristics for aerial vehicles in wind”, en *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, may 2021, pp. 1073–1079. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9560879.