Universidad Nacional de Educación a Distancia

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática
Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática

Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas y de Control

Estudio y propuesta de métodos y algoritmos de inteligencia artificial para la optimización de la cobertura de sistemas multi-UAV

Autor: Alfredo Pintado de Santiago

Tutor: Matilde Santos Peñas

Septiembre de 2018

Trabajo Fin de Máster



RESUMEN

El presente trabajo pretende realizar un análisis de las principales líneas de investigación en el campo de la inteligencia artificial en el problema de optimizar los recursos en los sistemas cooperativos que emplean múltiples unidades UAV, y de aportar unas propuestas de resolución a estos problemas de optimización a partir de técnicas del campo de la inteligencia artificial típicamente usadas para otro tipo de aplicaciones, adaptándolas y reorientando para poder resolver el problema de cubrimiento completo de áreas con múltiples UAV.

Se ha partido de documentos de investigación previos en este mismo campo y de teoría general de sistemas inteligentes para dar propuesta a nuevas estrategias. Asimismo, se ha desarrollado un software en lenguaje de programación Java para poder realizar simulaciones que den validez a las propuestas planteadas, dando como resultado soluciones numéricas y visuales que sirvan para comprobar las ventajas e inconvenientes que se dan al aplicar cada una de las propuestas.

.

Índice

1. INTRODUCCIÓN 7

1.1. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO 7

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 8

1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA 9

1.4. ALCANCE 10

1.5. OBJETIVOS 11

1.6. REQUISITOS 14

1.6.1. Requisitos funcionales 14

1.6.2. Requisitos no funcionales 18

2. MARCO TEÓRICO 21

2.1. MÉTODOS 21

2.1.1. Algoritmos de agrupamiento o clustering 21

2.1.2. Algoritmos genéticos en inteligencia de enjambre: Colonia de hormigas 23

2.2. ESTADO DEL ARTE 25

2.2.1. Optimización de la asignación de superficie a explorar en sistemas multi-UAV 25

2.2.2. Optimización en la planificación de rutas para la cobertura de un área 27

3. ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE DIVISIÓN Y RECORRIDO DE LA SUPERFICIE A EXPLORAR 30

3.1. ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA ASIGNACIÓN DE SUPERFICIE A EXPLORAR EN SISTEMAS MULTI-UAV 30

3.1.1. Estrategia basada en la descomposición de polígonos 30

3.1.2. Estrategia basada en la teoría de grupos o clustering 35

3.1.3. Estrategia basada en el algoritmo genético de colonia de hormigas –ACO- 37

3.2. ESTRATEGIAS PARA LA OPTIMIZACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DE RUTAS PARA COBERTURA DE UN ÁREA 55

4. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 59

4.1. VARIANTES ESTUDIADAS 59

4.1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS UAV 60
4.1.2. NÚMERO DE UNIDADES UAV 60
4.1.3. POSICIÓN DE LOS UAV 61
4.1.4. CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE A EXPLORAR 62
4.2. EJECUCIÓN DE SIMULACIONES 63
4.3. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 73
4.3.1. SIMULACIONES 73
4.3.2. PARAMETRIZACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS 73
4.3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS 74
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 78
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80
7. ANEXO: EJECUCIÓN COMPLETA DE SIMULACIONES 83

Tablas de objetivos

OBJ-1. Investigación documental del estado del arte actual 11
OBJ-2. Estudio de técnicas y algoritmos en el campo de la inteligencia artificial que puedan ser adaptados para dar una solución 11
OBJ-3. Estudio de las principales características de los sistemas UAV 12
OBJ-4. Propuesta de estrategias para la asignación de superficie a explorar en sistemas multi-UAV 12
OBJ-5. Propuesta de estrategias para la planificación de la ruta a llevar por cada UAV 12
OBJ-6. Propuesta de estrategias de posicionamiento previo de los UAV 13
OBJ-7. Presentación de resultados representativos 13
OBJ-8. Visualización gráfica de resultados 13

Tablas de requisitos funcionales

RF-1. El área a cubrir tendrá un tamaño que permita encontrar una solución 14
RF-2. Los modelos se probarán con un sistema de navegación simplificado para UAV de ala rotatoria de tipo multirrotor 15
RF-3. Navegación libre en el escenario 16
RF-4. Altura y velocidad de vuelo preestablecida por el usuario 16
RF-5. Solución con caminos no hamiltoniano 17

Tablas de requisitos no funcionales

NRF-1. Establecer diferentes escenarios 18
NRF-2. Establecer diferentes composiciones de UAV 19
NRF-3. Permitir configurar características físicas de los UAV 19
NRF-4. Requisitos de la visualización 20

Índice de figuras

Figura 1: Procedimiento de clustering 22
Figura 2: Polígono no convexo en el que el lado más largo no representa la mejor solución de recorrido 27
Figura 3: Estrategia basada en patrones de movimiento que minimicen el número de giros 28

FIGURA 4: ESTRATEGIA BASADA EN CUADRÍCULA O MALLA 29
FIGURA 5: DESCOMPOSICIÓN DE UN ÁREA EN POLÍGONOS RECTANGULARES 30
FIGURA 6: ANCHURA MÍNIMA DE UN POLÍGONO REGULAR CONVEXO 31
FIGURA 7: DESCOMPOSICIÓN DE UN POLÍGONO REGULAR CONVEXO 31
FIGURA 8: POLÍGONO REGULAR NO CONVEXO 32
FIGURA 9: POLÍGONO REGULAR NO CONVEXO CON ORIENTACIÓN VERTICAL Y DESCOMPOSICIÓN VERTICAL PARA EL CASO DE 3 UAV 33
FIGURA 10: POLÍGONO REGULAR NO CONVEXO CON ORIENTACIÓN HORIZONTAL Y DESCOMPOSICIÓN VERTICAL PARA EL CASO DE 3 UAV 33
FIGURA 11: RESULTADO DESCOMPOSICIÓN DEL MISMO POLÍGONO CON ORIENTACIÓN EN HORIZONTAL Y EN VERTICAL EN POLÍGONOS VERTICALES Y POSTERIOR SUAVIZADO 34
FIGURA 12: PROBLEMA DE REALIZAR SUAVIZADOS EN POLÍGONOS ALTAMENTE IRREGULARES Y SUAVIZADO CON AJUSTE. 35
FIGURA 13: SECUENCIA ESTRATEGIA DE CLUSTERING PARA 3 UAV 36
FIGURA 14: GRAFO TIPO PARA APLICAR ALGORITMO DE RESOLUCIÓN ACO 38
FIGURA 15: RELACIÓN ITERACIÓN-HORMIGAS-ACTUALIZACIÓN EN EL ALGORITMO ACO ESTÁNDAR 41
FIGURA 16: RELACIÓN ITERACIÓN-HORMIGAS-ACTUALIZACIÓN EN EL ALGORITMO ACO ADAPTADO PARA PROBLEMA DE COBERTURA DE ÁREAS EN SISTEMAS MULTI-UAV 41
FIGURA 17: RESULTADO DESCOMPOSICIÓN DEL MISMO POLÍGONO CON ORIENTACIÓN EN HORIZONTAL Y EN VERTICAL EN POLÍGONOS VERTICALES Y POSTERIOR SUAVIZADO 42
FIGURA 18: POSIBILIDAD DE MOVIMIENTO SEGÚN LAS DISTINTAS VARIANTES 44
FIGURA 19: TABLA DE COSTE PARA CADA NODO DEL GRAFO 45
FIGURA 20: ACTUALIZACIÓN POTENCIA DE LA FEROMONA PARA LOS CAMINOS DISPONIBLES PARA CADA UNO DE LOS UAV 53
FIGURA 21: RESULTADO FINAL EJEMPLO COLONIA DE HORMIGAS ADAPTADO 53
FIGURA 22: SECUENCIA RESUMEN ITERACIÓN 1, HORMIGA 1-EJEMPLO 54
FIGURA 23: CAMPO DE VISIÓN DE UAV SOBRE EL PLANO DE VUELO RELATIVO A LA ALTURA Y ÓPTICA DE LA CÁMARA EMBARCADA 56
FIGURA 24: VECTORES DE NAVEGACIÓN Y POSIBILIDAD DE GIROS COMPLETOS DE K A 57
FIGURA 25: TABLA DE COMBINACIONES SIMULADAS 59
FIGURA 26: PROPUESTA DE ESTRATEGIAS ATENDIENDO AL NÚMERO DE UAV 61
FIGURA 27: POSICIÓN INICIAL DE LOS UAV: ALEATORIA VS ESTACIÓN BASE 62
FIGURA 28: SUPERFICIE REGULAR CÓNCAVA, REGULAR CONVEXA Y "COMPACTA" E IRREGULAR 63
FIGURA 29: ALGORITMO DE CLUSTERING CON UN NÚMERO INSUFICIENTE DE PUNTOS (300) 74

1. Introducción

1.1. Justificación y motivación del trabajo

El empleo de sistemas UAV puede dar solución a una gran variedad de disciplinas profesionales que, hasta ahora, debido a la estricta legislación que limitaba su uso ha estado enfocado más al ámbito investigador o usos militares. La regularización y definición de normativas prevé que en pocos años el uso de estos sistemas se encuentren operando y dando apoyo a muchos servicios de toda índole. En particular, en España, gracias al nuevo Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre que regulará la nueva normativa para la utilización de aeronaves tripuladas se espera un importante desarrollo de soluciones en el ámbito profesional empleando estos dispositivos.

La tecnología de estos sistemas aún presenta grandes retos tecnológicos que deben ser resueltos: seguridad, fiabilidad, robustez, etc. Son aspectos que deben ser garantizados antes de poder seguir liberando el uso de estos sistemas, pero también hay muchos otros condicionantes que es necesario mejorar para que su uso termine siendo una apuesta real. Mejora de la autonomía, disponibilidad de vuelo ante inclemencias meteorológicas, control de vuelo para usuarios estándar, mejora de las comunicaciones y transmisión de datos, etc. son problemas que aún están lejos de estar resueltos para el despegue de este uso profesional que se espera de estos sistemas.

Aunque existen UAV que emplean otras tecnologías de alimentación eléctrica, la gran mayoría de UAV -sobre todo los de ala rotatoria de tipo multirrotor- emplean baterías de polímero de Litio que, si bien tienen muchas ventajas en otros aspectos, limita mucho la autonomía que presta a estos equipos. Hasta que se desarrollen otras alternativas o se mejore la autonomía media que ofrecen, es sustancial optimizar los recursos disponibles y minimizar el tiempo de vuelo necesario para poder cumplir las misiones que se propongan.

Actualmente el mercado ya ofrece muchas oportunidades para emplear estos sistemas; los vuelos para supervisar líneas eléctricas, grandes conducciones, apoyo en las inspecciones visuales en los mantenimientos de generadores eólicos y grandes huertos solares, inspección del estado de edificios, presas de agua, control de incendios

forestales, apoyo en la búsqueda en zonas catastróficas, control de fronteras, etc. Todos los usos que se mencionan están condicionados por el limitado tiempo de vuelo posible.

1.2. Descripción del problema

El objeto del presente Trabajo Fin de Máster es analizar y proponer estrategias de optimización de recursos en el problema de cobertura completa de áreas cuando se emplean sistemas multi-UAV y estos se coordinan para agilizar la inspección. Para ello, se hará un profundo estudio de las investigaciones y trabajos actuales en la resolución este tipo de misiones y, asimismo, se realizará un estudio de diferentes filosofías y disciplinas en el campo de la inteligencia artificial que, si bien no son típicamente usadas en este ámbito, puedan aportar soluciones transversales a este campo específico de investigación.

El trabajo se ha centrado en dos fases a resolver, las cuales a su vez son dependientes entre ellas:

Fase 1. División y asignación: Dado un número de unidades de UAV, dividir el espacio que deberá cubrir cada una.

Fase 2. Navegación: Una vez establecido el espacio que debe cubrir cada UAV en la primera fase, establecer el recorrido -ruta- a seguir por cada unidad UAV para cubrir completamente su espacio asignado.

Para la primera fase se han probado estrategias que buscan optimizar el reparto y carga del mapa para cada UAV, introduciendo aspectos de diferentes técnicas dentro del campo de la inteligencia artificial: algoritmos de agrupamiento o clustering, teoría de grafos, algoritmos genéticos bio-inspirados, etc.

La segunda fase busca metodologías para minimizar el tiempo necesario para completar la cobertura completa del área. Se considerará una función de coste dependiente de este tiempo empleado por el UAV.

1.3. Estructura de la memoria

Este apartado da una breve explicación de la estructura y contenido por capítulo del presente documento.

Capítulo 1. Introducción

Presentación general, descripción del problema, justificación y motivación del trabajo, etc.

También recoge: alcance, objetivos y requisitos que han sido considerados.

Capítulo 2. Marco teórico

Tiene como objetivo describir -de manera somera- algunas de las teorías y métodos en el campo de la inteligencia artificial que se han empleado directa o indirectamente en el proyecto desarrollando una perspectiva teórica.

También se incluye el estado del arte actual con parte de la investigación documental más relevante realizada junto a las publicaciones más extendidas como solución óptima para el problema de cobertura de superficies con sistemas UAV.

Capítulo 3. Estrategias para la optimización de división y recorrido de la superficie a explorar

Este capítulo describe las diferentes estrategias que se proponen para dar solución al problema global de optimización de cobertura de superficies en sistemas multi-UAV.

Las diferentes estrategias propuestas se han dividido en dos conjuntos: estrategias para optimizar la asignación de superficie a explorar en sistemas multi-UAV para cada unidad, y conjunto de estrategias para optimizar la planificación de la ruta a realizar para cubrir el área asignada a cada unidad UAV.

Capítulo 4. Presentación, análisis e interpretación de resultados

Describe las diferentes combinaciones de características que se han tomado en consideración para el desarrollo de bancadas de pruebas.

También incluye el desglose de los resultados de simulación con las diferentes configuraciones propuestas para la obtención de resultados justificativos, adjuntando para cada una: figuras, tablas y análisis.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo enumera y desarrolla brevemente posibles vías de desarrollo futuro que se abren, bien a la vista de los resultados obtenidos en este proyecto, o bien gracias a la extensa fase de estudio llevada para elaborar este trabajo pero que, debido a la dimensión de las propuestas, no se hayan investigado.

Capítulo 6. Referencias bibliográficas

Recopila los principales trabajos de investigación y documentos de consulta en los que se ha apoyado el presente trabajo.

1.4. Alcance

El problema de cobertura completa de áreas empleando sistemas robóticos terrestres o aéreos no es un problema nuevo; existen muchos trabajos de investigación que buscan estrategias que optimicen este problema.

Así, en este proyecto se propone alcanzar los siguientes hitos.

- Estudio de metodologías de sistemas inteligentes.
- Estudio de modelos de optimización.
- Estudio de trabajos actuales sobre el problema de cobertura.
- Propuesta de alternativas más allá de las soluciones comúnmente aceptadas como válidas.
- Desarrollo de un software que permita comprobar las estrategias planteadas.
- Valorar los resultados obtenidos.

1.5. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es, a partir de los trabajos existentes ya publicados, analizar, estudiar y proponer estrategias para optimizar y resolver el problema de cobertura de superficies con sistemas multi-UAV que, de forma cooperativa, tratan de optimizar los recursos –principalmente minimizando el tiempo de vuelo empleado- para completar la misión.

Con la idea de este objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos a resolver:

OBJ-1. Investigación documental del estado del arte actual	
Descripción	Recopilación de trabajos y publicaciones previos en el campo de la optimización de cobertura de áreas y la planificación de rutas en sistemas de navegación, así como la cooperación y distribución de trabajos en sistemas multi-UAV
Comentarios	El problema de la cobertura de áreas, ya sea para sistemas de navegación individuales o para sistemas cooperativos, es un problema ampliamente estudiado en varias disciplinas del ámbito de la robótica y la inteligencia artificial. Es por ello importante dedicar esfuerzos en estudiar las diferentes filosofías e investigaciones previas para poder explorar posibles vías diferentes de desarrollo pero siempre apoyándose en las experiencias y problemas ya recorridos

OBJ-2. Estudio de técnicas y algoritmos en el campo de la inteligencia artificial que puedan ser adaptados para dar una solución	
Descripción	Estudio de diferentes filosofías y disciplinas en el campo de la inteligencia artificial que puedan aportar soluciones transversales a problemas que emplean estas técnicas no típicamente enfocados a la resolución de este problema
Comentarios	Se estudiarán sistemas bio-inspirados, algoritmos genéticos, teoría de grafos, teoría de agrupamientos o clustering, sistemas de navegación, sistemas de planificación, redes neuronales, etc.

OBJ-3. Estudio de las principales características de los sistemas UAV	
Descripción	El estudio se centrará en las capacidades de los sistemas UAV de ala rotatoria del tipo multirrotor
Comentarios	El estudio de estos sistemas condicionará el modelo de la dinámica de movimiento, las necesidades a la hora de establecer límites, el modelo de optimización de coste y el enfoque de las variantes analizadas en el análisis de los resultados; así como la valoración de las ventajas o desventajas de cada estrategia atendiendo a estas características

OBJ-4. Propuesta de estrategias para la asignación de superficie a explorar en sistemas multi-UAV	
Descripción	Se propondrán y compararán diferentes estrategias para la resolución del problema de cobertura en sistemas multi-UAV
Comentarios	Este objetivo busca innovar en las soluciones que se propongan a raíz del estudio hecho en el OBJ-1 y OBJ-2

OBJ-5. Propuesta de estrategias para la planificación de la ruta a llevar por cada UAV	
Descripción	Análisis de estrategias de navegación de vuelo para la consecución de la completa misión de cobertura de un área en un tiempo mínimo
Comentarios	Existe mucha documentación relativa a la planificación de rutas para cobertura de áreas. Se buscará la solución que más se adapte a los sistemas UAV de ala rotatoria del tipo multirrotor estudiados para la consecución del OBJ-3

OBJ-6. Propuesta de estrategias de posicionamiento previo de los UAV	
Descripción	Propuesta de diferentes alternativas de posición inicial de los UAV
Comentarios	Debido a la infinita variedad de situaciones que se podría llegar a plantear, se estudiará –en los casos que sea procedente- la opción de pre-posicionar los UAV antes de realizar la asignación del área a cubrir

OBJ-7. Presentación de resultados representativos	
Descripción	Recopilar datos que sean representativos para poder sacar conclusiones acerca del objetivo general del proyecto
Comentarios	Se establecerán distintos escenarios y configuraciones para sacar comparativas entre las distintas estrategias planteadas basadas en el tiempo de vuelo para cada UAV

OBJ-8. Visualización gráfica de resultados	
Descripción	Mostrar resultados gráficos que permitan visualmente sacar conclusiones de las diferentes estrategias de solución propuestas
Comentarios	Mostrará el reparto de área para cada UAV disponible y la trayectoria empleada para completar la misión de cobertura

1.6. Requisitos

En este apartado se especifican los requisitos planteados en el proyecto y establece asimismo ciertas restricciones o limitaciones. Se distingue entre requisitos funcionales y requisitos no funcionales.

1.6.1. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales especifican requerimientos que afectan a la funcionalidad del sistema.

RF-1. El área a cubrir tendrá un tamaño que permita encontrar una solución		
Objetivos asociados	**OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-5** **OBJ-7**	
Requisitos asociados	**RF-2** **RF-3** **RF-4** **RF-5**	**NRF-1** **NRF-2** **NRF-3** **NRF-4**
Hipótesis	Siempre existirá una solución factible para que los UAV puedan completar con éxito la misión	
Comentarios	Queda fuera del objeto del proyecto analizar la posibilidad de que los UAV no sean capaces de completar el escenario propuesto por ser estos demasiado grandes. El objeto es analizar la distribución y optimización que se obtendría empleando diferentes estrategias. Queda para trabajos futuros la posibilidad de incluir cláusulas que incluyan estas variantes	

RF-2. Los modelos se probarán con un sistema de navegación simplificado para UAV de ala rotatoria de tipo multirrotor		
Objetivos asociados	**OBJ-1** **OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-5** **OBJ-6** **OBJ-7** **OBJ-8**	
Requisitos asociados	**RF-1** **RF-3** **RF-4** **RF-5**	**NRF-1** **NRF-2** **NRF-3** **NRF-4**
Hipótesis	Se usará un modelo que simplifique el complejo sistema de navegación real de un UAV	
Comentarios	No es el objeto del proyecto profundizar en el movimiento y control de un UAV	

RF-3. Navegación libre en el escenario		
Objetivos asociados	**OBJ-1** **OBJ-2** **OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-5** **OBJ-6** **OBJ-7** **OBJ-8**	
Requisitos asociados	**RF-1** **RF-2** **RF-4** **RF-5**	**NRF-1** **NRF-2** **NRF-3** **NRF-4**
Hipótesis	Los UAV navegarán sin áreas segregadas de vuelo	
Comentarios	Podrán atravesar el área asignada a otros UAV, así como recorrer zonas fuera del límite asignado si con ello optimizan su tiempo de vuelo. Queda para trabajos futuros la posibilidad de incluir cláusulas que incluyan estas variantes	

RF-4. Altura y velocidad de vuelo preestablecida por el usuario		
Objetivos asociados	**OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-5** **OBJ-6** **OBJ-7** **OBJ-8**	
Requisitos asociados	**RF-1** **RF-2** **RF-3**	**NRF-1** **NRF-2** **NRF-3** **NRF-4**
Descripción	El usuario establecerá previamente la altura y velocidad de cada unidad UAV con la que quiere que realice la misión de vuelo	
Comentarios	No se contemplará la posibilidad de modificaciones en la altura y velocidad de las unidades UAV una vez empezada la simulación. Tampoco se contempla la posibilidad de realizar un gradiente de altura o velocidades a lo largo del escenario. Queda para trabajos futuros la posibilidad de incluir cláusulas que incluyan estas variantes	

RF-5. Solución con caminos no hamiltoniano		
Objetivos asociados	**OBJ-1** **OBJ-2** **OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-5** **OBJ-6** **OBJ-7** **OBJ-8**	
Requisitos asociados	**RF-1** **RF-2** **RF-3**	
Descripción	En su navegación el UAV podrá recorrer una zona en más de una ocasión si con ello minimiza el tiempo de vuelo necesario	
Comentarios	Se evita incluir restricciones a la solución ya que el objeto del proyecto es optimizar el tiempo necesario para cubrir escenarios	

1.6.2. Requisitos no funcionales

Los requisitos no funcionales especifican requerimientos del trabajo que no tienen relación directa con el funcionamiento del sistema.

NRF-1. Establecer diferentes escenarios		
Objetivos asociados	**OBJ-1** **OBJ-2** **OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-5** **OBJ-6** **OBJ-7** **OBJ-8**	
Requisitos asociados	**RF-1** **RF-3** **RF-4** **RF-5**	**NRF-4**
Descripción	Se probará con escenarios de distintas características	
Comentarios	Escenarios convexos, regulares, irregulares o amorfos, etc.	

NRF-2. Establecer diferentes composiciones de UAV		
Objetivos asociados	**OBJ-1** **OBJ-2** **OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-6** **OBJ-7** **OBJ-8**	
Requisitos asociados	**RF-1** **RF-2** **RF-3** **RF-4**	**NRF-3** **NRF-4**
Descripción	Se probará cada estrategia propuesta con diferente número de unidades de UAV	
Comentarios	Se harán pruebas con 3, 5 y 8 unidades UAV	

NRF-3. Permitir configurar características físicas de los UAV		
Objetivos asociados	**OBJ-3** **OBJ-4** **OBJ-5** **OBJ-6** **OBJ-7**	
Requisitos asociados	**RF-1** **RF-2** **RF-3** **RF-4** **RF-5**	**NRF-2**
Descripción	Los UAV serán configurables por el usuario	
Comentarios	Configuraciones como la velocidad de navegación, velocidad de despegue y aterrizaje, altura de vuelo de operación, etc.	

NRF-4. Requisitos de la visualización		
Objetivos asociados	**OBJ-7** **OBJ-8**	
Requisitos asociados	**RF-2** **RF-3**	
Descripción	El sistema debe permitir visualizar el estado final del proceso objeto del proyecto	
Comentarios	Se visualizará el reparto de áreas para cada UAV y la ruta que tiene que recorrer para optimizar su tiempo de vuelo	

2. Marco teórico

2.1. Métodos

2.1.1. Algoritmos de agrupamiento o clustering

La teoría del clustering busca el agrupamiento de clases u objetos con características similares entre sí en grupos (clusters) y que sean diferentes de otras agrupaciones o clusters. El objetivo principal es poder reducir sistemas con gran cantidad de datos en base a unos criterios y categorizar los datos en grupos.

El clustering no sólo define un algoritmo o unas pautas concretas de cómo realizar los clusters, aunque existen una gran cantidad de algoritmos y métodos específicos ya definidos, es más una filosofía de resolución en categorización de datos de entrada. El clustering se encuentra entre los modelos de clasificación no supervisada, esto es, no se conocen a priori los tipos ni forma de las clases que se van a generar.

Los métodos de agrupamiento buscan formar los grupos de objetos similares entre sí y diferentes de los objetos del resto, minimizando las distancias intra-cluster y maximizando la inter-cluster.

Estas medidas se basan en términos de distancias [13]

$$(1) \quad d(i,j) > d(i,k)$$

indicando que el objeto *i* es más parecido a *k* que el objeto *j*.

Los principales y más utilizados enfoques en los algoritmos de clustering atienden a las siguientes características:

- Agrupamientos con número de clases desconocidos:
    - Método adaptativo.
    - Algoritmo de máxima distancia: Algoritmo de Batchelor & Wilkins.
- Agrupamientos con número de clases conocidos:
    - Algoritmo de k-Means.

- Algoritmo de GRASP.
- Algoritmo de agrupamiento secuencial.

- Agrupamientos basados en grafos:
  - Algoritmo basado en la matriz de similitud.

- Algoritmos basados en densidad.

Las características principales de estos algoritmos es que permiten la resolución de problemas con un alto grado de desconocimiento de cómo puede ser la solución del mismo (en el caso de los métodos con número de clases no definido se desconoce a priori incluso el número de clases), aunque normalmente los resultados vienen sesgados por el valor de las constantes que utilizan como criterio para aglutinar objetos en una clase y por los valores elegidos en la inicialización de los centros [13].

Su secuencia típica general común a todos los métodos de clustering es [13] (Figura 1)

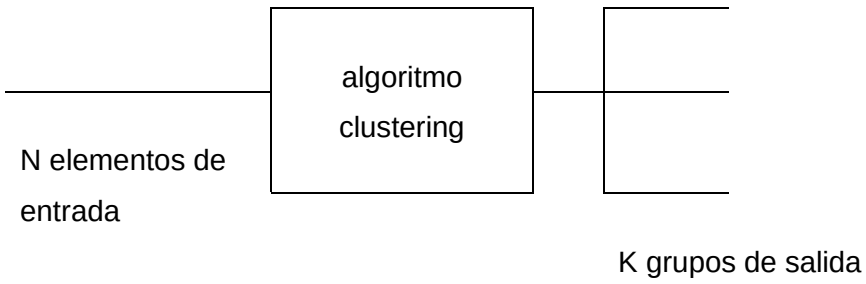


Figura 1: Procedimiento de clustering

Para realizar los agrupamientos existen diferentes criterios que buscan minimizar y maximizar estas distancias, que representan la similitud entre los objetos. Las formas más extendidas de medir estas distancias es el empleo de distancia euclídea y distancia euclídea normalizada.

Las fases del algoritmo (una vez que se tiene una selección de variables y con algún criterio de categorización representativo) se pasa a clasificar los objetos identificando dichas similitudes o divergencias.

Es muy importante la correcta elección de los parámetros del algoritmo, ya que, de no ser así, pueden darse soluciones completamente dispares ante un mismo problema de análisis, y afectará a la calidad del resultado.

La mayor dificultad a la hora de emplear estas técnicas radica en la elección de las adecuadas características, que sean representativas y singulares para cada conjunto de objetos agrupados en un mismo cluster, y la elección de los umbrales inherentes que hay que definir en todos los algoritmos de clustering, ya que son los que establecen los criterios de partición.

Está fuera del objeto de esta memoria entrar en detalle en todos los modelos y algoritmos de clustering anteriormente expuestos, sólo se van a describir y justificar las principales características que pueden aportar cada uno de los diferentes métodos con la perspectiva de emplear cada una de sus “bondades” en el presente proyecto.

2.1.2. Algoritmos genéticos en inteligencia de enjambre: Colonia de hormigas

Los algoritmos bio-inspirados son aquellos basados en modelos que tratan reproducir conceptualmente –normalmente modelando simplificaciones- los comportamientos vistos en sistemas biológicos reales: Redes neuronales, algoritmos genéticos, algoritmos de enjambres, etc.

Esta línea de investigación que actualmente está en constante desarrollo también se puede observar en otros campos de la “robótica, visión por computador y de la inteligencia artificial”: Sistemas de eco-localización de murciélagos o ballenas, sistemas de visión multipunto reproduciendo los sistemas de visión de ciertos arácnidos, sistemas de locomoción de aves y animales, etc.

En este trabajo se ha intentado implementar una variación del algoritmo de enjambres de optimización de colonia de hormigas (OCH) adaptándolo al problema de cobertura de terreno a sobrevolar entre las unidades UAV disponibles.

Algoritmo de colonia de hormigas (Ant Colony Optimization -ACO-):

Es un método que normalmente se emplea para encontrar caminos con un punto de inicio y un punto objetivo, problemas como el problema del viajante. Como la mayoría de estos algoritmos, da como resultado soluciones óptimas no deterministas.

Conceptualmente el método se basa en el principio que emplean las hormigas dentro de una colonia para buscar fuentes satisfactorias de alimento. Inicialmente las hormigas desconocen dónde se encuentran las fuentes de alimento y no saben a dónde dirigirse. Así, las primeras exploradoras salen con rumbo aleatorio en búsqueda de la fuente de alimento. Las hormigas tienen un sistema de visión muy limitado y en algunas subespecies llegan a ser completamente ciegas, por lo que para "orientarse" y poder regresar al hormiguero a medida que avanzan van depositando feromonas que marcan el camino. Estas feromonas con el tiempo se van degradando hasta que son completamente imperceptibles.

Son sistemas descentralizados, en los que todos los individuos tienen el mismo rango y trabajan de forma cooperativa en búsqueda de satisfacer un objetivo global.

Las siguientes ecuaciones modelan este comportamiento [4]:

$$(2)\quad P_{ij}^{k} = \begin{cases} \dfrac{[t_{ij}]^{a} \cdot [h_{ij}]^{b}}{\sum_{u \in N_i^k} [t_{ij}]^{a} \cdot [h_{ij}]^{b}}, & Si\ s \in N_i^k(r) \\ 0, & en\ \ otro\ caso \end{cases}$$

Siendo P_{ij}^{k} la probabilidad

$$(3)\quad t_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot t_{ij}(t) + \Delta t_{ij}^{best}$$

$$(4)\quad \Delta t_{ij}^{best} = \begin{cases} {}^{1}/_{L}, & si\ el\ arco\ (i,j) pertenece\ a\ T^{best} \\ 0, & en\ caso\ contrario \end{cases}$$

Estas ecuaciones explican cómo el conjunto de hormigas va recorriendo un grafo tomando decisiones bajo un árbol probabilístico. Esta probabilidad de tomar un camino

u otro en cada nodo viene influenciada por un parámetro de idoneidad, representado como el valor de las feromonas que emplean las hormigas.

Inicialmente, el valor de idoneidad de todos los caminos es el mismo, ya que se desconoce cuál es el camino óptimo.

En una primera iteración, un número determinado de hormigas recorren el grafo obteniendo un resultado con el coste necesario para resolverlo. Cuando todas las hormigas han terminado y obtenido un coste, según dicho resultado se intensifica más el valor de los caminos recorridos por las hormigas con mejor resultado, y menos los que han obtenido peor resultado, mientras que para los caminos que nadie ha recorrido se difumina dicha feromona.

Finalizada esta primera iteración, y actualizada la “esencia” de las feromonas, da comienzo una nueva iteración. El algoritmo finalizará cuando todas las hormigas sigan ya el mismo camino.

Es importante el ajuste de “potenciación” y “difuminado” de las feromonas en cada iteración, así como el número de hormigas que se emplean, ya que un mal ajuste puede provocar que se descarten rápidamente caminos que, por el factor de probabilidad, no se cogieron al principio.

2.2. Estado del arte

2.2.1. Optimización de la asignación de superficie a explorar en sistemas multi-UAV

Debido al auge que se está produciendo en el uso de sistemas UAV de tipo multimotor, cada vez se encuentran más trabajos enfocados a resolver las peculiaridades que ofrecen estos sistemas.

Dentro de la resolución del problema de cobertura de áreas empleando múltiples unidades UAV, la gran mayoría de publicaciones académicas actuales hacen simplificaciones del conjunto a resolver –modelo de vuelo, características físicas de los

UAV, escenarios de trabajo, condiciones meteorológicas, cargas, etc.– centrándose más en la resolución de aspectos básicos.

Hay un alto porcentaje de estos estudios que buscan la resolución de la cobertura desde un enfoque de “puntos objetivo” [6] obligando a pasar por puntos concretos (de interés), eliminando la necesidad de tener que sobrevolar toda la superficie del área y recorriendo, como si un grafo de puntos se tratase, este número finito de puntos.

La simplificación más generalizada es la de realizar el estudio con polígonos regulares convexos [1]. Esto facilita enormemente la posterior fase de navegación ya que, como se ve en el siguiente apartado, limita a buscar el lado más largo del polígono para buscar la orientación de vuelo.

Las características físicas de los UAV se limitan a la velocidad y altura de vuelo, eliminando características más realistas (peso y aceleración) y limitando en algunos casos hasta la capacidad de giro a movilidad de a 4 (cada 90º) o a 8 (giro de 45º).

Otro factor eliminado es el de las condiciones meteorológicas (viento, principio de sustentación relacionado a la temperatura, lluvia, etc.) dejando esos factores a otras líneas de investigación.

Los modelos de navegación también están muy simplificados. Analizan el movimiento con trayectorias lineales y ponderan los giros a partir de alguna constante [3] que, para validar estas simplificaciones, son calibradas en vuelos reales.

Otra propuesta es la descomposición poligonal basada en descomposición trapezoidal [15], el cual divide el polígono que representa el área a cubrir en polígonos trapezoidales para luego pasar a una fase de unión de los trapecios formados siguiendo criterios discrecionales según distintos supuestos.

Los modelos basados en descomposición en celdas suelen ser empleados cuando en el área a cubrir se encuentran obstáculos o zonas prohibidas, ya que permite dividir los polígonos teniendo como referencia estos mismos obstáculos [14, 17].

2.2.2. Optimización en la planificación de rutas para la cobertura de un área

Estrategias de minimización en el número de giros:

Son las estrategias más empleadas para la resolución de planificación de rutas para cobertura completa de un área. Es una estrategia que está directamente relacionada con la ecuación de movimiento del UAV, ya que dependiendo de la agilidad de giro que tenga la aeronave la minimización del número de giros será más o menos determinante. En general, los sistemas UAV de ala rotatoria son bastante ágiles, y la búsqueda de esta minimización de número de giros es menos crítica que si se emplean sistemas de ala fija u otros sistemas de aeronaves. También existe una relación entre el tiempo que se pierde al realizar un giro y la velocidad de desplazamiento, ya que en cada giro hay que considerar el tiempo de frenado, giro y posterior aceleración hasta recuperar la velocidad de crucero.

Dentro de esta estrategia, existen distintas variedades que tratan de resolver el problema de minimización de número de giros:

- Minimización de número de giros en zigzag
- Minimización de número de giros en espiral

Para hacer el recorrido en la variante de zigzag el criterio es buscar el lado más largo del polígono, y a partir de él, trazar líneas paralelas. Esta solución sólo garantiza que el número de giros es mínimo cuando la superficie a sobrevolar es un polígono regular convexo. Para el resto de polígonos o superficies esto no puede garantizarse.

En la siguiente figura se puede ver una representación del problema de aplicar el criterio de buscar el lado más largo en polígonos irregulares para referenciar el sentido de giro.

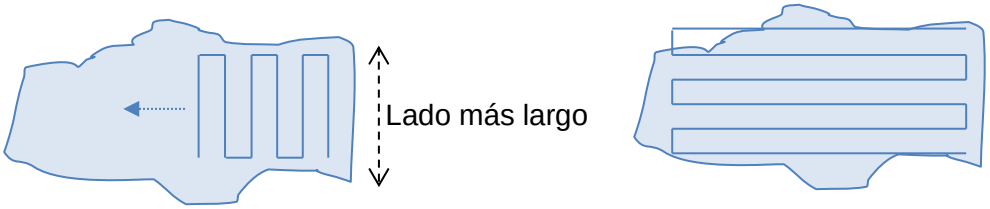


Figura 2: Polígono no convexo en el que el lado más largo no representa la mejor solución de recorrido

En la figura 3 se ha hecho una representación de un mapa repartido con tres unidades UAV y de las dos formas descritas para minimizar el número de giros sobre una de las regiones: zigzag y espiral.

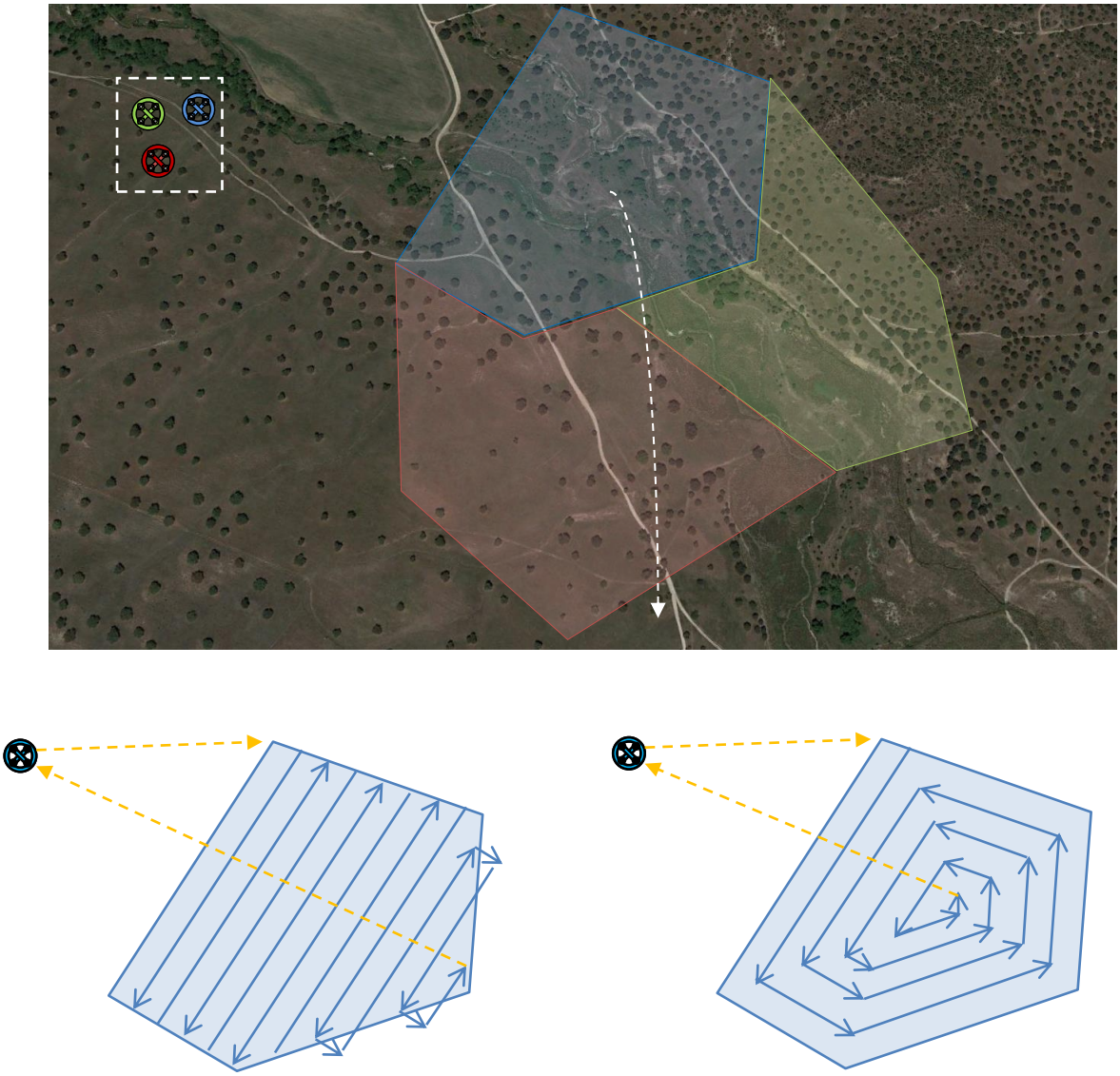


Figura 3: Estrategia basada en patrones de movimiento que minimicen el número de giros

El ancho de los carriles que se generan en cada giro tiene que ser siempre inferior al campo de visión que es capaz de visualizar el UAV para asegurar así cubrir completamente la superficie sin dejar zonas sin recorrer. Siendo importante fijar una altura que obtenga un compromiso de calidad (de la imagen tomada si el objetivo es cartografiar) y eficiencia del espacio que va a ser capaz de recorrer.

Estrategia basada en malla y teoría de grafos:

Este tipo de estrategias divide el mapa en una cuadrícula de celdas iguales. Cada celda debe ocupar el espacio tal que el campo de visión del UAV sea capaz de cubrir toda la superficie de la celda.

La estrategia consiste en utilizar modelos de resolución de grafos completos, esto es, grafos de camino hamiltoniano y euleriano, en el que el UAV debe recorrer todas las celdas. Este tipo de solución es más típica de problemas de navegación en el que el objetivo es recorrer un escenario en busca de un punto concreto, pero puede aplicarse también al problema de cobertura completa si el UAV empleado no está condicionado por la cantidad de giros que realice o bien en escenarios altamente irregulares o que tengan gran cantidad de zonas prohibidas de vuelo.

Otras estrategias típicas empleadas en la resolución de otros objetivos en navegación son los modelos de planificación de mapas de carretera, diagramas de Vononoi, polinomios de interpolación, campos de potencial, etc., más orientados a resolver el problema de recorrer caminos punto a punto.

- Minimización de número de giros en malla. [5, 14]

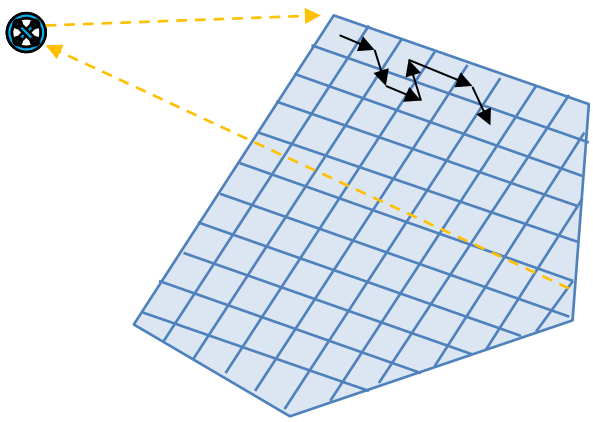


Figura 4: Estrategia basada en cuadrícula o malla

En la figura anterior se ve representado el concepto de movimiento buscando minimizar el movimiento a partir de una función de costo, empleando técnicas de recorrido en mallas.

3. Estrategias para la optimización de división y recorrido de la superficie a explorar

3.1. Estrategias para la optimización de la asignación de superficie a explorar en sistemas multi-UAV

3.1.1. Estrategia basada en la descomposición de polígonos

Se basa en descomponer el área objetivo en polígonos más pequeños y su posterior reasignación. Debido a la simplicidad aparente de este concepto y sus buenos resultados en una gran mayoría de los escenarios que se presentan, es uno de los modelos más empleados en sistemas multi-UAV -cuando el objetivo es el cubrimiento completo del área-. En la siguiente figura se representa este concepto.

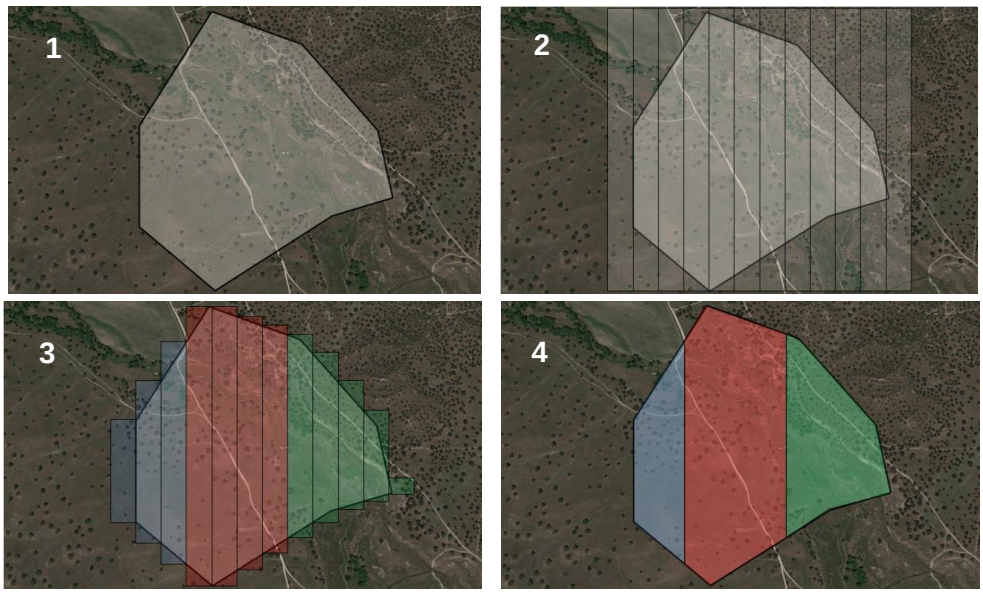


Figura 5: Descomposición de un área en polígonos rectangulares

Existen diferentes técnicas; en los casos particulares en los que el área a cubrir presenta la forma de un polígono regular convexo (Son propuestas simplificadas del problema en el que todos los ángulos interiores del polígono son igual o menor a 180°), es posible descomponer el polígono usando la referencia del lado más largo, asegurando con ello el mínimo número de giros durante la navegación del UAV. Esto es así porque en los polígonos regulares convexos el lado más largo coincide siempre con la anchura mínima del polígono, tal y como se representa en las figuras 6 y 7.

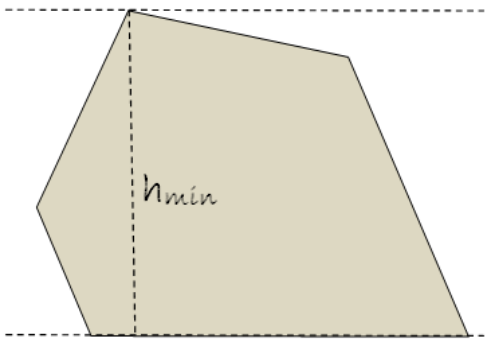


Figura 6: Anchura mínima de un polígono regular convexo

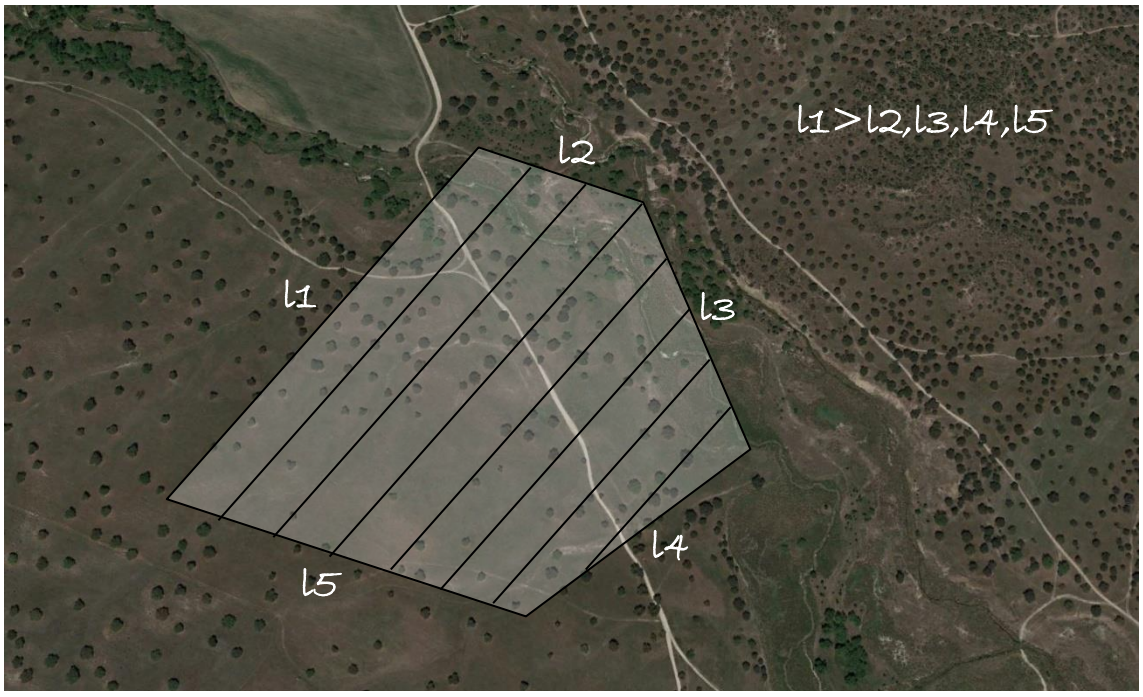


Figura 7: Descomposición de un polígono regular convexo

En la figura 7 se ha representado un ejemplo de posible polígono regular convexo y, en las figuras 8, 9, 10 y 11, las distintas posibilidades y consecuencias a la hora de elegir el sentido de descomposición en franjas rectangulares.

Para los escenarios en los que el área a descomponer es no convexa (incluimos aquí áreas regulares cóncavas o áreas irregulares) no siempre se puede obtener de una forma directa la solución de descomposición óptima, por lo que no es posible garantizar que el criterio de descomposición sea el óptimo.

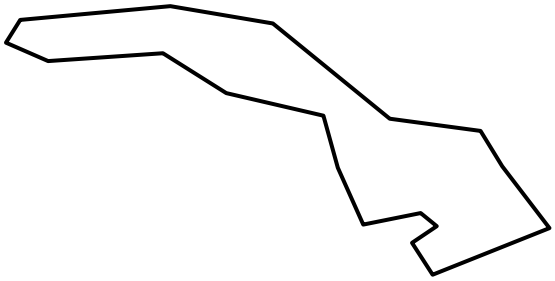


Figura 8: Polígono regular no convexo

En la figura 8 se ha representado un ejemplo de posible polígono regular no convexo y, en las figuras 8, 9, 10 y 11, las distintas posibilidades a la hora de elegir el sentido de descomposición en franjas rectangulares.

Tal y como se aprecia en la figura anterior, no es posible asegurar el mejor criterio para descomponer el polígono, por lo que se determina realizar una descomposición preestablecida: descomposición en rectángulos verticales y/o horizontales.

Hay que considerar que –para el desarrollo del software- la orientación del polígono que se presente puede marcar grandes diferencias a la hora de elegir el sentido de descomposición preestablecido.

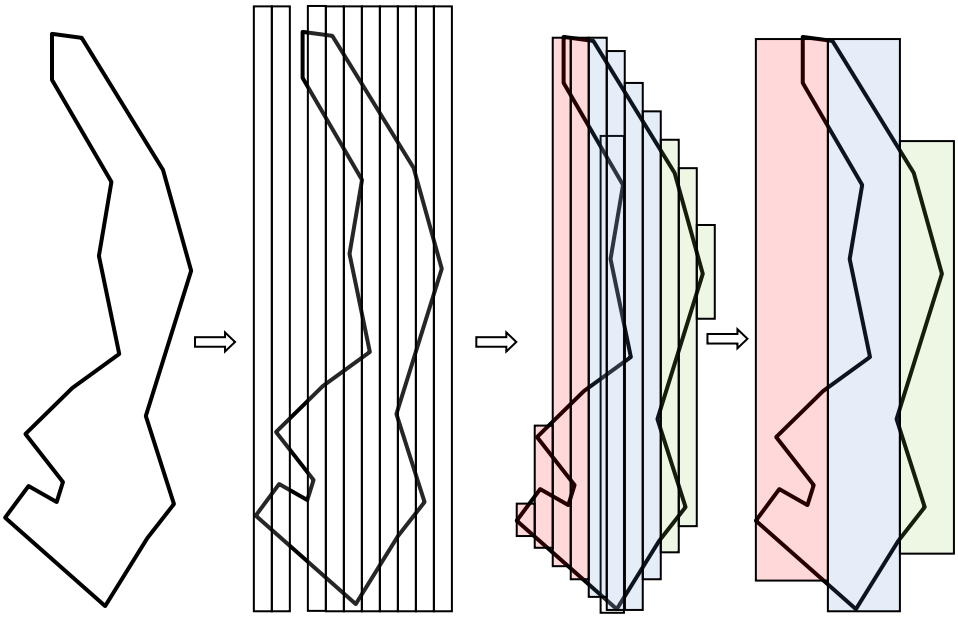


Figura 9: Polígono regular no convexo con orientación vertical y descomposición vertical para el caso de 3 UAV

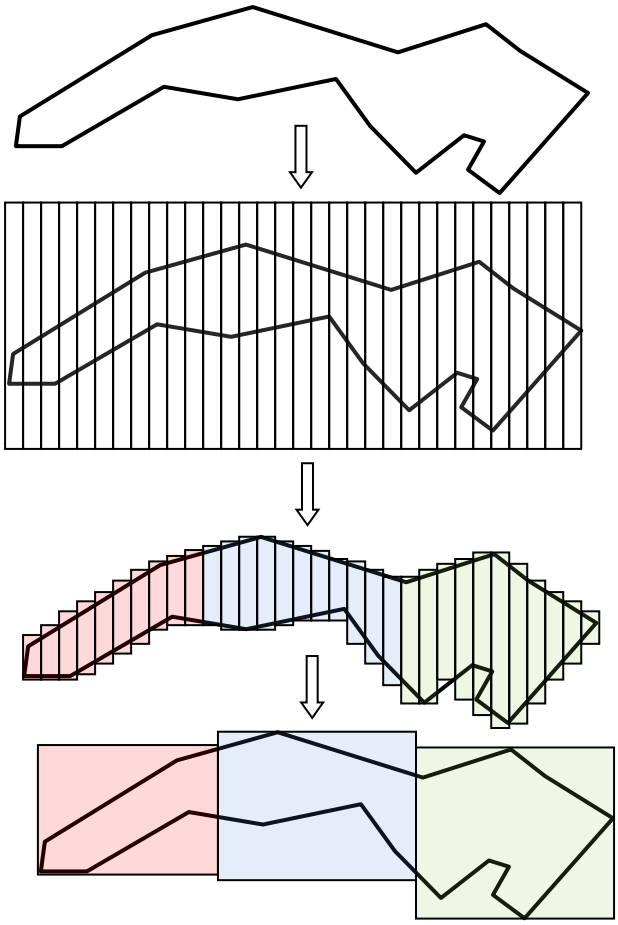


Figura 10: Polígono regular no convexo con orientación horizontal y descomposición vertical para el caso de 3 UAV

Las figuras anteriores tratan de representar la importancia a la hora de seleccionar el criterio de partición de los polígonos. Siendo en ambos casos el mismo polígono, pero presentado en distintas orientaciones, se observa que al aplicar un criterio de partición en vertical para ambos escenarios la solución es completamente diferente.

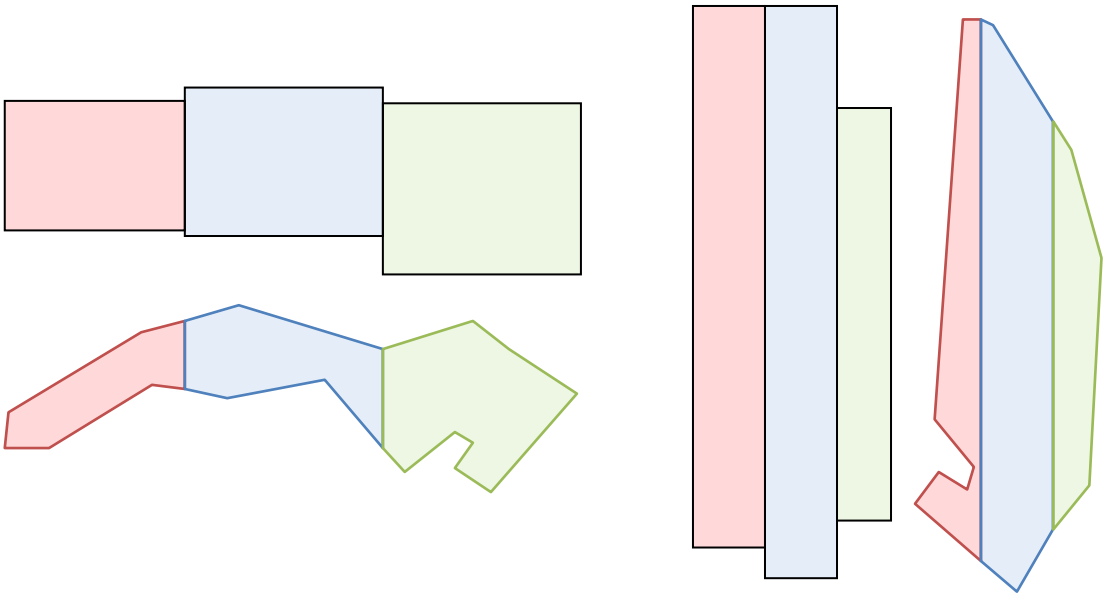


Figura 11: Resultado descomposición del mismo polígono con orientación en horizontal y en vertical en polígonos verticales y posterior suavizado

También se ha considerado la posibilidad de realizar un suavizado al área asignada, intentando minimizar la superficie total a sobrevolar por cada UAV. Esto como se verá en el capítulo de resultados no siempre presenta una solución optimizada de la versión sin suavizar, y en escenarios altamente irregulares o con regiones aisladas provocará que el UAV necesite más tiempo para cubrir el área al necesitar mayor número de giros.

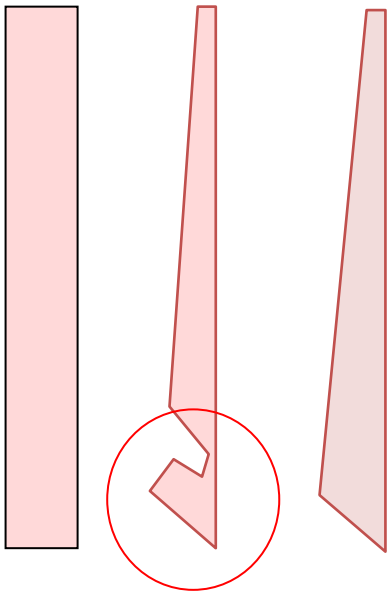


Figura 12: Problema de realizar suavizados en polígonos altamente irregulares y suavizado con ajuste.

Una vez establecido el criterio de descomposición hay que realizar el de asignación para cada UAV. Existen diferentes estrategias para hacerlo: desde el UAV por el que se empieza (esto es significativo en los supuestos de tener una flota de UAV con diferentes prestaciones), hasta el criterio de cuántos y cómo hacer este reparto (reparto equitativo de polígonos generados basándose en unidades, reparto basado en el tamaño de mapa que cubre cada polígono, distancia a la estación base a la que se encuentra el primer polígono asignado, etc.)

3.1.2. Estrategia basada en la teoría de grupos o clustering

Esta estrategia es en realidad una variación del concepto para el que está pensada la teoría de agrupamientos o de clustering. La teoría de clustering busca, a partir de una serie de características (tal y como se ha introducido en el capítulo 2) agrupar y clasificar objetos que sean similares entre sí. Las características significativas con las que se pretende crear los distintos clusters pueden venir definidas por dos o más parámetros (en el caso de que sean dos parámetros se puede hacer una representación gráfica en un plano 2D).

Para la adaptación de este modelo teórico que se pretende utilizar para resolver el problema de optimización en la cobertura de áreas se plantea generar una nube de puntos aleatorios dentro del área a recorrer, tal que, aplicando algoritmos de clustering, se puedan asignar dichos puntos a cada UAV. El objeto de los agrupamientos es una modificación del objeto para el que se emplea habitualmente esta metodología, y lo que se busca es aprovechar las herramientas que ofrece esta teoría para realizar la separación de áreas.

Hay que tener en consideración algunas consideraciones como, por ejemplo, que la densidad de puntos debe ser suficientemente alta para conseguir fronteras uniformes y bien establecidas.

Otra consideración importante es que se deben usar los métodos de clustering con *número de clases conocidas*, siendo cada clase o cluster representada por un UAV. Ejemplos de estos métodos son el método de k-means, k-medoids, agrupamiento secuencial, etc. Los métodos con número de clases desconocida podrían dar soluciones con más número de clusters que de UAV disponibles.

En la figura 13 se representan las fases por las que pasa la estrategia de aplicar clustering para el reparto de áreas en un ejemplo de tres UAV.

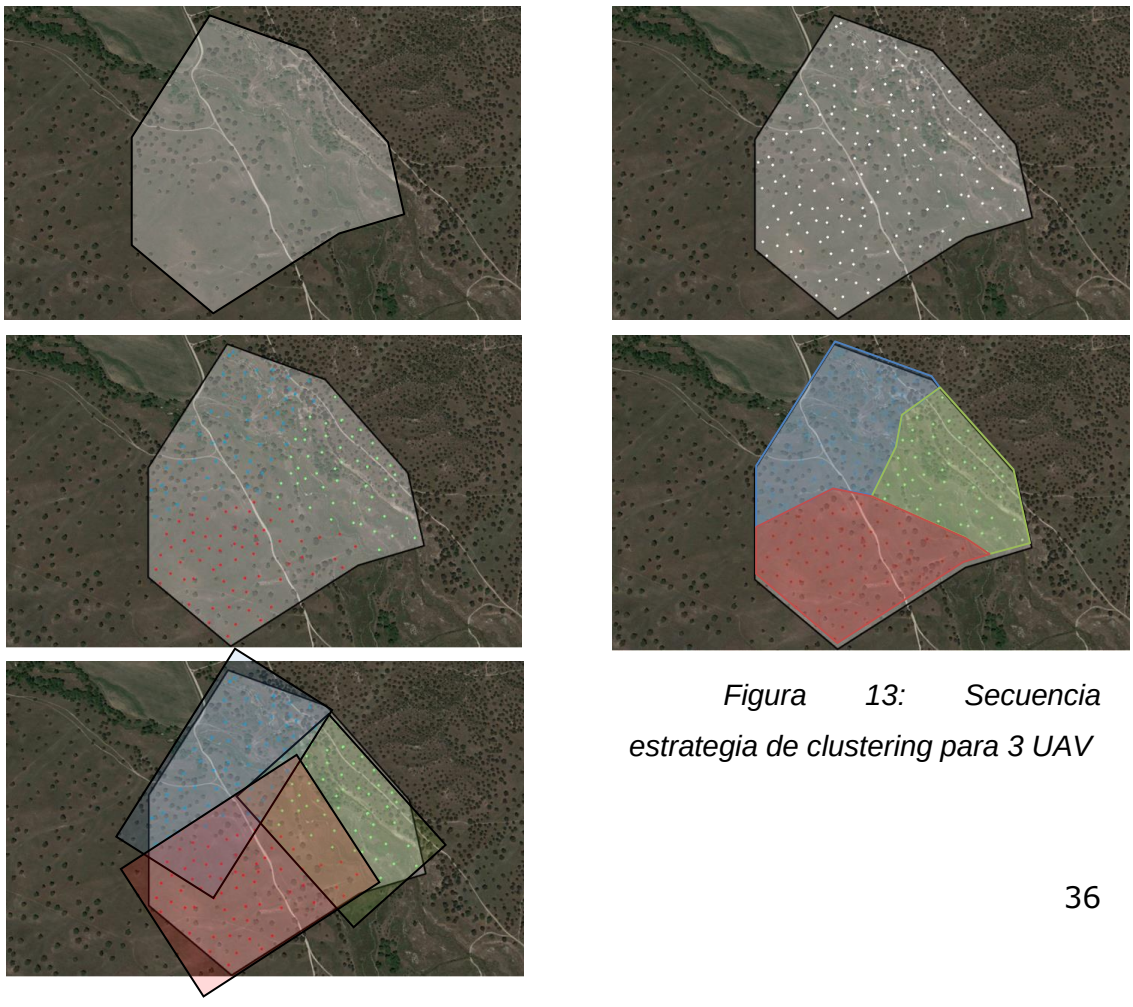


Figura 13: Secuencia estrategia de clustering para 3 UAV

Al igual que en la estrategia basada en descomposición de polígonos, una vez establecido los puntos de cada cluster se plantea la posibilidad de realizar un agrupamiento englobando todos los puntos del cluster dentro de un polígono rectangular (Paso 5) o hacer un suavizado de las fronteras (Paso 4) ya que dependiendo del tipo de mapa o del número de UAV a utilizar se pueden obtener diferencias significativas.

Una limitación importante al emplear esta estrategia se da en el supuesto de emplear una flota de UAV con diferentes prestaciones. Por la propia idiosincrasia de la forma de resolver el agrupamiento de puntos en clusters –en la filosofía de clustering en realidad no son puntos cardinales puestos al azar en un plano 2D, sino que son características bien definidas- no es posible ponderar la asignación de cada punto en su cluster, no pudiéndose sobrecargar la asignación de puntos según las diferentes características de cada UAV. Por lo que se recomienda su uso en los supuestos de emplear flotas de UAV con características similares (la gran mayoría de casos de aplicación real son así).

En cambio, sí resuelve de forma eficiente las diferentes casuísticas en la ubicación de partida de los UAV: Partiendo todos desde una estación base, partiendo de posiciones aleatorias, o partiendo de posiciones separadas.

También se caracteriza por dar una buena solución con diferentes unidades de UAV, en mapas regulares convexos o irregulares.

3.1.3. Estrategia basada en el algoritmo genético de colonia de hormigas –ACO-

Los algoritmos basados en el modelo de comportamiento que presentan las colonias de hormigas en la naturaleza buscan la resolución de problemas de optimización de caminos en grandes grafos. Estos problemas se caracterizan por tener, normalmente, un nodo de inicio y uno o varios nodos objetivo.

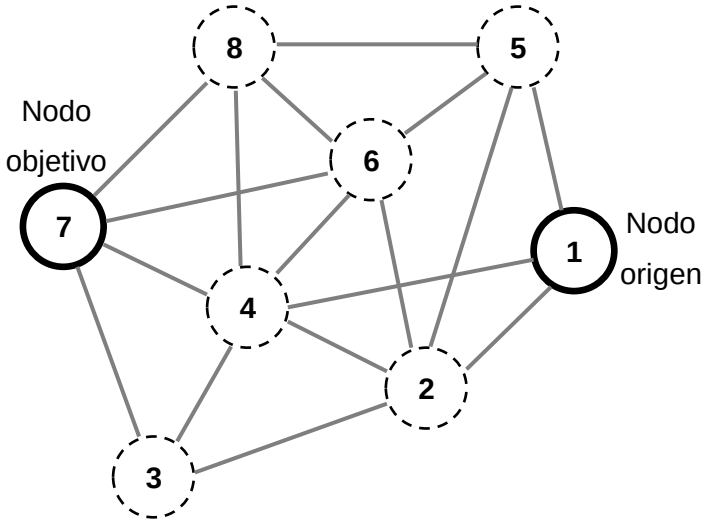


Figura 14: Grafo Tipo para aplicar algoritmo de resolución ACO

Una de las estrategias propuestas en este trabajo fin de máster para dar solución al problema de optimización de cobertura en áreas empleando sistemas multi-UAV es, al igual que se hizo en la propuesta de aplicación de la metodología de clustering, hacer una adaptación de este concepto y obtener soluciones óptimas en este escenario de trabajo.

Tal y como se describió en el Capítulo 2 (apartado 2.1.2), el algoritmo ACO tiene las siguientes características estructurales:

- Conjunto de nodos con un coste intrínseco asociado y un coste de desplazamiento entre nodos.
- Nodo origen (Hormiguero) y un nodo objetivo (Fuente de alimento).
- Iteraciones y hormigas:
    - En cada iteración un número determinado de hormigas salen del nodo origen en busca del nodo objetivo obteniendo un resultado. El camino del nodo origen al nodo objetivo realizado por la hormiga tiene un coste, y cuanto menor haya sido este coste, mejor se considerará el camino.

- Después de cada iteración y con el resultado obtenido por todas las hormigas, se actualizarán los valores del algoritmo y se iniciará una nueva iteración con un nuevo despliegue de hormigas.

Mientras que para el algoritmo ACO propuesto las características estructurales son:

- Conjunto de nodos con un coste intrínseco asociado y un coste de desplazamiento entre nodos.

- Cada UAV se posiciona en un nodo del grafo y se le asigna como espacio a recorrer.

- Iteraciones y hormigas:

  - Cada hormiga deja de ser un agente “único” y pasa a ser todos los UAV disponibles para cubrir el área. Cambiando el objetivo de hallar un camino entre dos nodos concretos a un objetivo de cubrir todos los nodos empleando todos los UAV.

  - En cada iteración y con el resultado obtenido por todas las hormigas, se actualizan los valores del algoritmo con la peculiaridad de que para cada UAV se actualiza su propia tabla de feromonas según el coste de los resultados obtenidos. Esto es así, ya que para un UAV no tiene porqué ser igual de ventajoso desplazarse siguiendo cierto camino que para otro UAV.

En las figuras 15 y 16 se representan las dos versiones de relación de iteración-hormiga de un ACO estándar y del ACO-Modificado propuesto.

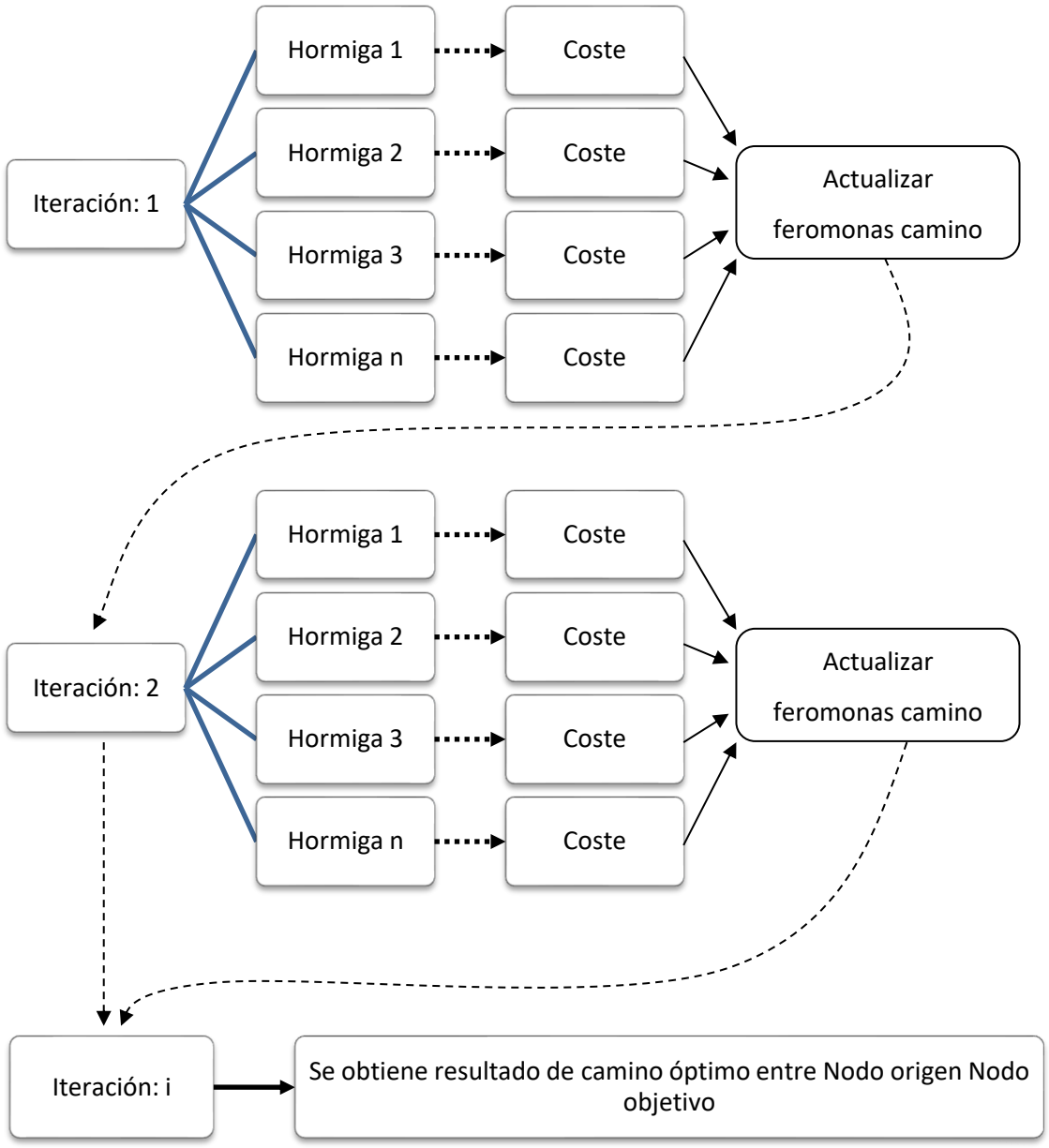


Figura 15: Relación Iteración-Hormigas-Actualización en el algoritmo ACO estándar

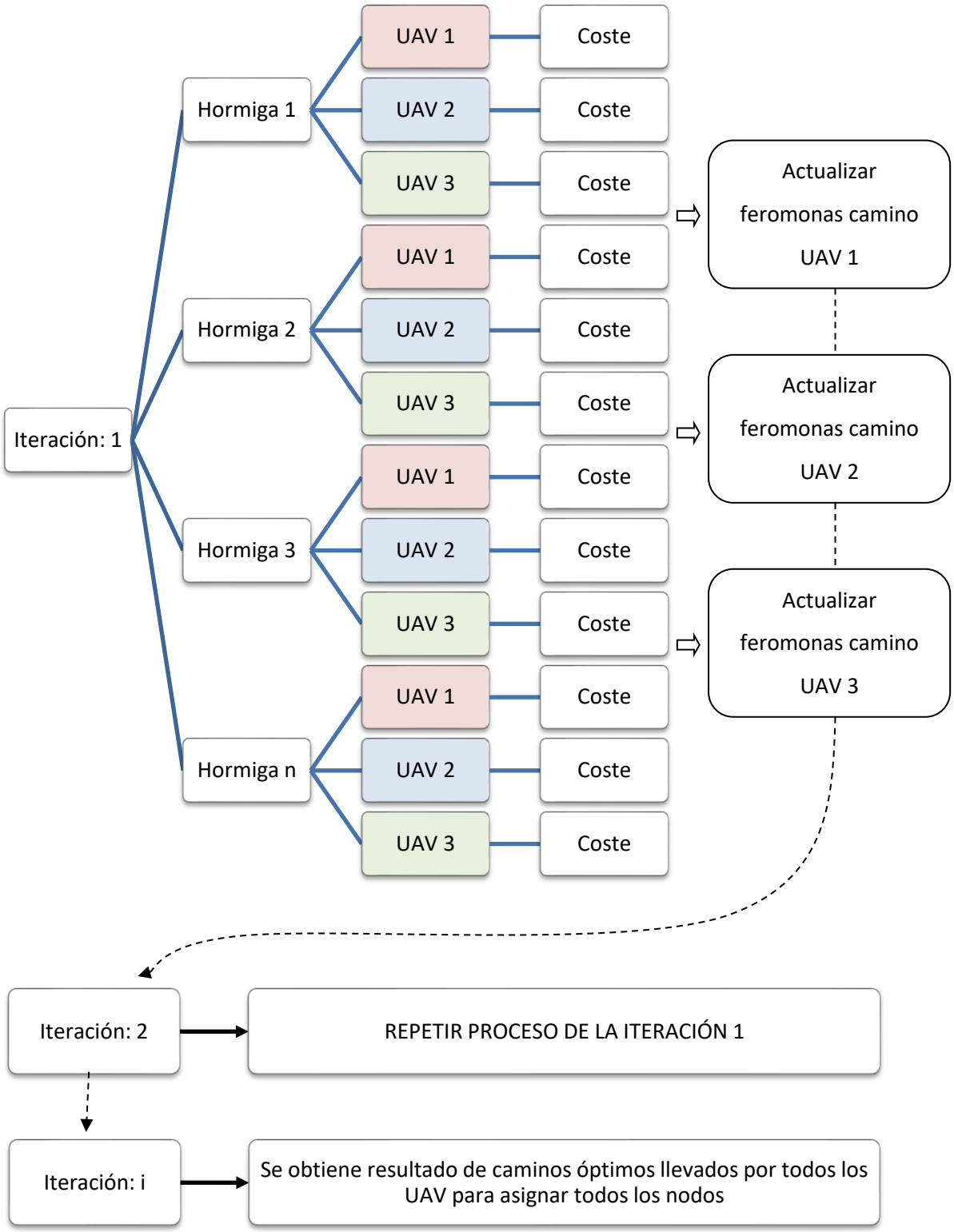


Figura 16: Relación Iteración-Hormigas-Actualización en el algoritmo ACO adaptado para problema de cobertura de áreas en sistemas multi-UAV

A continuación se representa el proceso de reconstrucción de un grafo para aplicar la estrategia de ACO-Modificada a partir de un mapa.

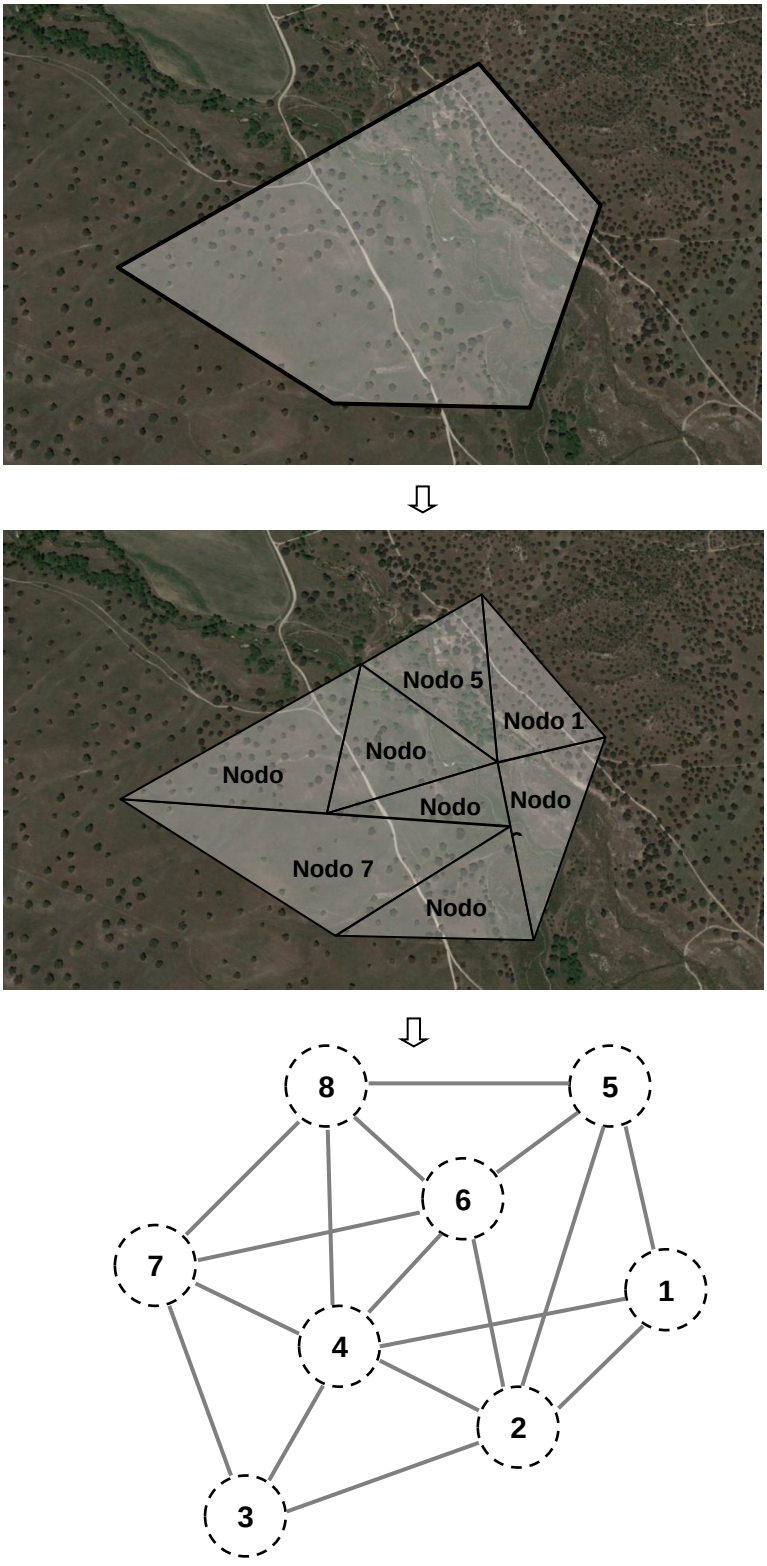


Figura 17: Resultado descomposición del mismo polígono con orientación en horizontal y en vertical en polígonos verticales y posterior suavizado

CONSIDERACIONES:

Esta propuesta tiene múltiples variantes y pueden irse modificando para encontrar soluciones que devuelvan resultados más óptimos. A continuación se listan algunas restricciones o problemas a considerar y el enfoque final propuesto:

Variante 1:

- Restricción: El UAV sólo puede pasar desde el nodo en el que se encuentra a otro que sea consecutivo y siempre que no esté ya asignado.
- Ventajas: Simplifica las posibilidades de desplazamiento y acelera el tiempo de ejecución.
- Problemas: Puede quedar encerrado un UAV sin posibilidad de desplazarse y obligar al resto a seguir asumiendo nodos.

Variante 2:

- Restricción: Sin restricciones. Un UAV se puede desplazar a cualquier nodo que quede aún por asignar sin ser necesariamente el que tenga al lado. Hay que considerar el coste de desplazamiento entre nodos y no centrarse únicamente en el coste del nodo.
- Ventajas: Aunque aumenta las posibilidades de desplazamiento, al poder desplazarse a cualquier nodo sin asignar no complica el abanico de posibilidades. Siempre encuentra solución.
- Problemas: Es necesario más cantidad de hormigas e iteraciones para dar con una solución óptima ya que en muchas de las soluciones encontradas puede haberse obligado a hacer un recorrido lejano a un UAV por el simple hecho de que aún no tenga carga.

Variante 3:

- Restricción: Un UAV se puede desplazar a cualquier nodo consecutivo de cualquiera de los nodos que tenga ya asignado y siempre que no esté ya asignado.
- Ventajas: Siempre encuentra solución.

- Problemas: Aumenta las posibilidades de desplazamiento, pero necesita analizar en cada movimiento la posibilidad de desplazarse a cualquier nodo consecutivo de los que tenga asignado.

Todas estas variantes de posibilidad de desplazamiento quedan representadas en la figura 18.

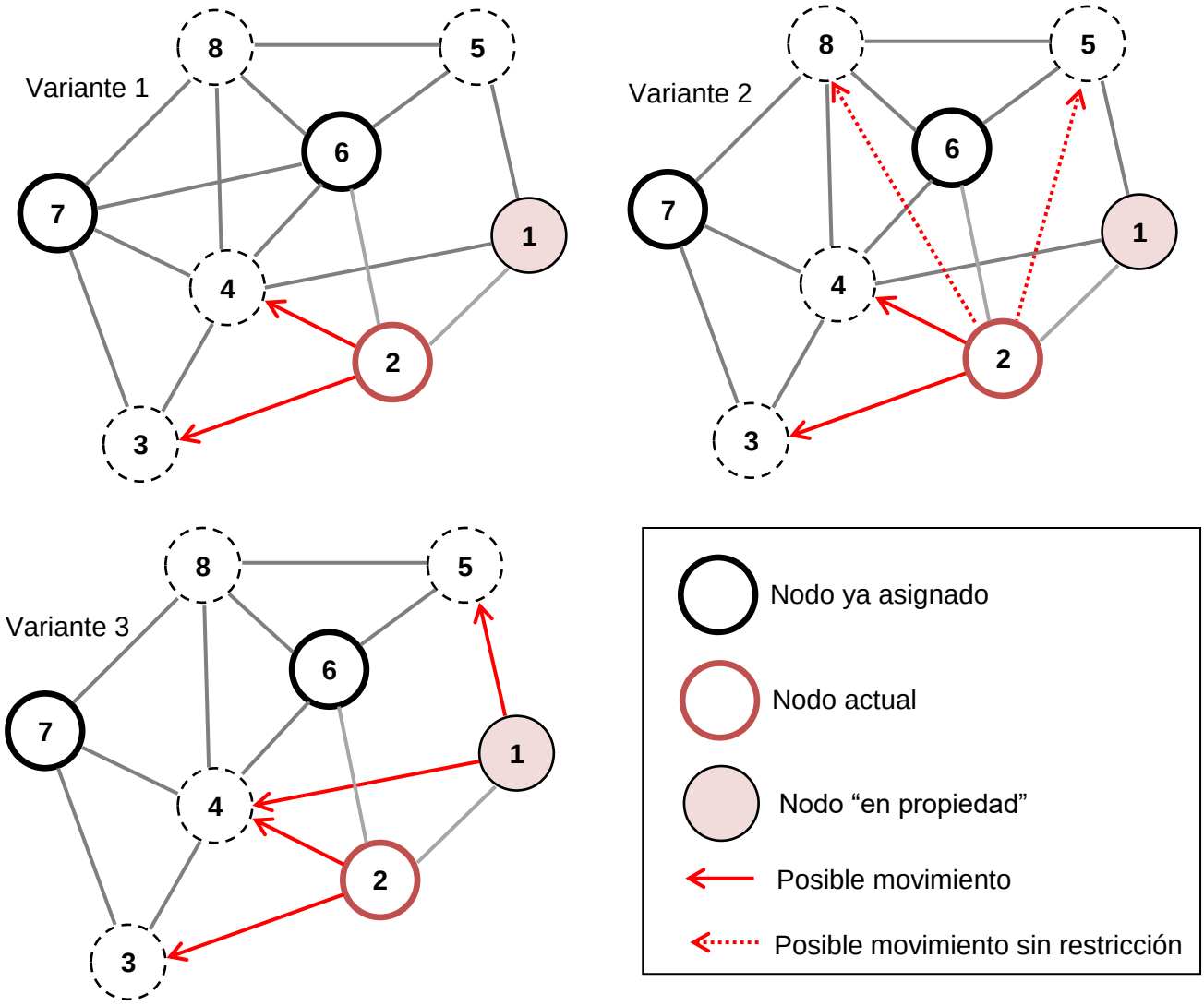


Figura 18: Posibilidad de movimiento según las distintas variantes

Tal y como se plantea esta adaptación del ACO para resolver el problema de cobertura, no tiene sentido tiene sentido trabajar con las dos primeras variantes, ya que el objetivo no es encontrar un camino, sino que el objetivo es asignar nodos a cada UAV. Es en la fase de navegación cuando se va a discernir el cómo debe recorrerse el área

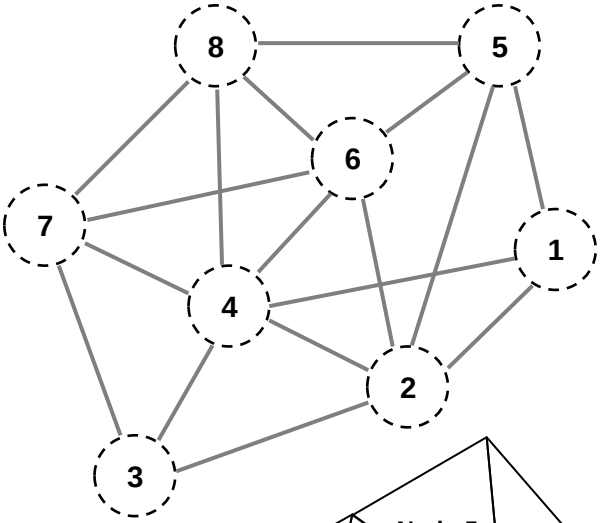
(conjunto de nodos) que tenga asignado cada UAV, por lo que es interesante asignar nuevos nodos a un UAV desde cualquier nodo que ya tenga en posesión.

A continuación, y debido a que la estrategia planteada es una adaptación personal de la teoría de hormigas, se va a desarrollar un supuesto caso simplificado (y con la variante 1 de desplazamientos entre nodos: con restricciones) y omitiendo algunos pasos para poder visualizar correctamente el mecanismo propuesto.

Ejemplo:

INICIALIZACIÓN: Estado inicial y datos de entrada

Nodo	Coste
1	5
2	5
3	5
4	3
5	5
6	4
7	8
8	4
	Σ = 39



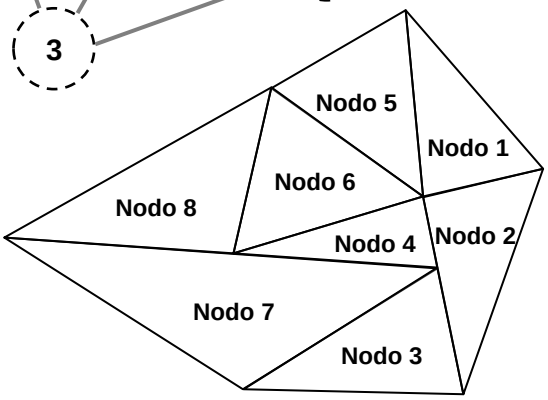


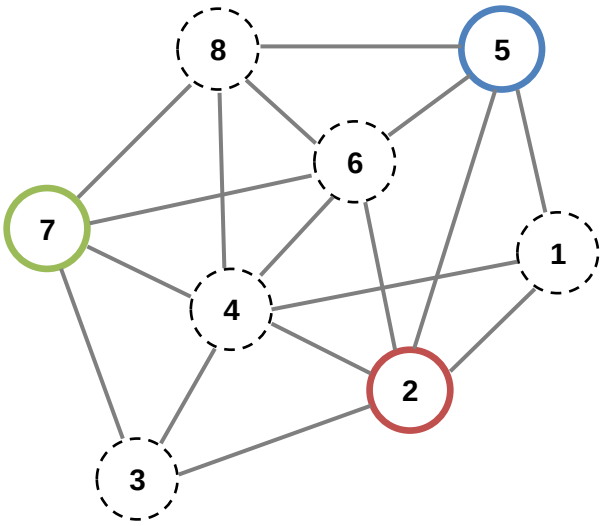
Figura 19: Tabla de coste para cada nodo del grafo

Se va a desarrollar el ejemplo para resolución con 3 UAV. Para este ejemplo y por simplificar, se va a suponer que todos los UAV tienen la misma autonomía, y sólo cambia la velocidad de navegación. Esta diferencia en la velocidad se ve ponderada en el factor de carga y la carga estimada para cada UAV.

Para el seguimiento y desarrollo de este ejemplo, se ha supuesto un escenario con un mapa y un grafo asociado con una tabla de costes dados en la figura 19, y a continuación se anexan las tablas del proceso de asignación y recorrido de los UAV con la estrategia ACO-Modificada.

UAV	[Km/h] Velocidad	[h] Autonomía	factor carga	Carga estimada %	Carga estimada Por UAV
U1	50	0.5000	25.0000	55.55	21.6667
U2	20	0.5000	10.0000	22.22	8.6667
U3	20	0.5000	10.0000	22.22	8.6667
			Σ = 45.0000	**Σ = 100**	**Σ = 39.0000**

En la fase de inicialización, se asigna a cada UAV un nodo de inicio:



UAV	Nodo inicial asignado	Carga inicial por UAV	Carga actual porcentual	Desfase carga
U1	2	5	27.7778	**27.7778**
U2	5	5	27.7778	**-5.5556**
U3	7	8	44.4444	**-22.2222**
		Σ = 18	**Σ = 100**	

El desfase de carga representa la diferencia entre el estado actual asignado a cada UAV y el estado final en el que se espera finalizar.

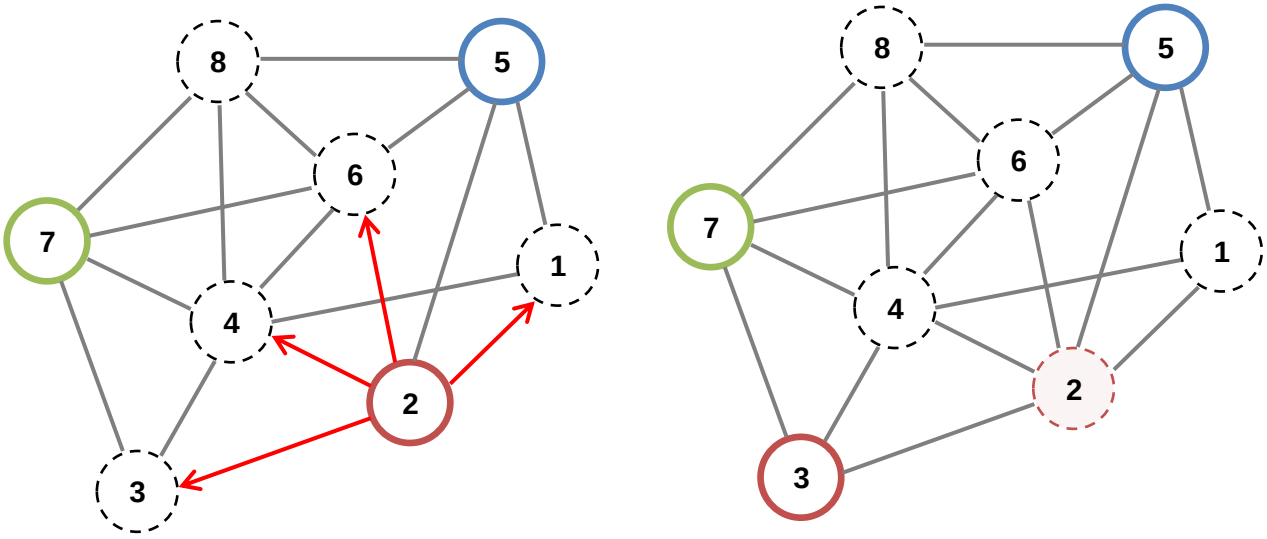
PRIMERA ITERACIÓN

CAMINOS UAV PARA HORMIGA 1:

Paso 1: Selección de UAV a desplazar

Datos de partida		Carga final estimada %	Carga neta actual	Carga % actual	Desfase
Nodos disponibles: 1,3,4,6,8 Nodos asignados: 2,5,7 Iteración: 1	UAV 1	55.5556	5.0	27.7778	27.7778
	UAV 2	22.2222	5.0	27.7778	-5.5556
	UAV 3	22.2222	8.0	44.4444	-22.2222
			18.0	100.0000	

Se selecciona al UAV 1 para el primer desplazamiento ya que es el UAV que está más desfasado:



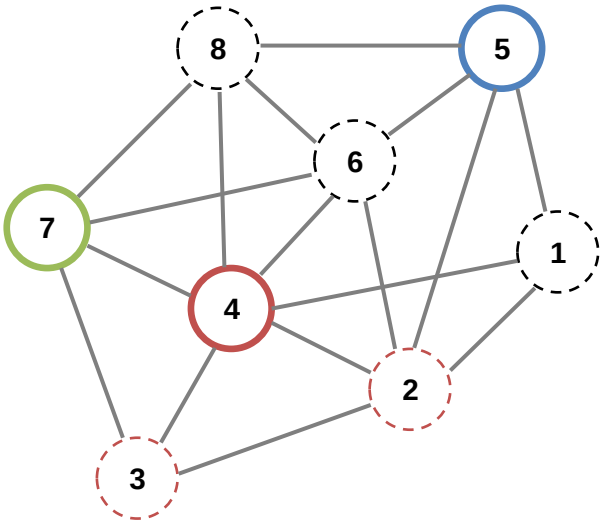
Desplazamiento UAV 1	Caminos disponibles	t*h	P_{XY}	Normalizado	Ejecución Random
Nodo Partida: NODO 2	1	0.01818	0.2086	0.2086	0.332
	3	0.01818	0.2086	0.4172	
	4	0.02857	0.3278	0.7450	
	6	0.02222	0.2550	1.0000	
	SUMA:	**0.08715**	**1.0000**		

La ejecución probabilística da como resultado el desplazamiento al NODO 3. El UAV 1 se desplaza desde el Nodo 2 al Nodo 3, y lo incluye en su asignación a explorar. Siendo el coste del Nodo 3: **5**

Paso 2: Actualización de tabla de estados y selección de UAV a desplazar

Actualizar datos			**Carga final estimada %**	**Carga neta actual**	**Carga % actual**	**Desfase**
Nodos disponibles →	1,4,6,8	UAV 1	55.5556	10.0	43.4783	12.0773
Nodos asignados →	2,3,5,7	UAV 2	22.2222	5.0	21.7391	0.4831
Iteración →	1	UAV 3	22.2222	8.0	34.7826	-12.5604
				23.0	100.0000	

Se selecciona al UAV 1 para el primer desplazamiento ya que es el UAV que está más desfasado:



Desplazamiento UAV 1	**Caminos disponibles**	**t*h**	**P_{XY}**	**Normalizado**	**Ejecución Random**
Nodo Partida: NODO 3	4	0.02857	0.02857	-	-
	SUMA:	**0.02857**	**0.02857**		

El UAV 1desde el Nodo 3 sólo puede desplazarse al Nodo 4. UAV 1 se desplaza desde el Nodo 3 al Nodo 4, y lo incluye en su asignación a explorar. Siendo el coste del Nodo 4: **3**

Paso 3: Actualización de tabla de estados y selección de UAV a desplazar

Actualizar datos			**Carga final estimada %**	**Carga neta actual**	**Carga % actual**	**Desfase**
Nodos disponibles →	1,6,8	UAV 1	55.5556	13.0	50.0000	5.5556
Nodos asignados →	2,3,4,5,7	UAV 2	22.2222	5.0	19.2308	2.9915
Iteración →	1	UAV 3	22.2222	8.0	30.7692	-8.5470
				26.0	100.0000	

Se selecciona al UAV 1 para el tercer desplazamiento.

UAV 1	**Caminos disponibles**	**t*h**	**P_{XY}**	**Normalizado**	**Ejecución Random**
Nodo Partida: NODO 4	1	0.01818	0.2903	0.2903	0.823
	6	0.02222	0.3548	0.6452	
	8	0.02222	0.3548	1.0000	
	SUMA:	**0.06262**	**1.0000**		

El UAV 1 se desplaza desde el Nodo 4 al Nodo 8, y lo incluye en su asignación a explorar. Coste Nodo 8: **4**

Paso 4: Actualización de tabla de estados y selección de UAV a desplazar

Actualizar datos			**Carga final estimada %**	**Carga neta actual**	**Carga % actual**	**Desfase**
Nodos disponibles →	1,6	UAV 1	55.5556	17.0	56.6667	-1.1111
Nodos asignados →	2,3,4,5,7,8	UAV 2	22.2222	5.0	16.6667	5.5556
Iteración →	1	UAV 3	22.2222	8.0	26.6667	-4.4444
				30.0	100.0000	

Se selecciona al UAV 2 para cuarto el desplazamiento.

UAV 2	Caminos disponibles	t*h	P_{XY}	Normalizado	Ejecución Random
Nodo Partida: NODO 5	1	0.01818	0.4500	0.4500	0.142
	6	0.02222	0.5500	1.0000	
	SUMA:	**0.0404**	**1.0000**		

El UAV 2 se desplaza desde el Nodo 5 al Nodo 1, y lo incluye en su asignación a explorar. Coste Nodo 1: **5**

Paso 5: Actualización de tabla de estados y selección de UAV a desplazar

Actualizar datos			Carga final estimada %	Carga neta actual	Carga % actual	Desfase
Nodos disponibles →	6	UAV 1	55.5556	17.0	48.5714	6.9841
Nodos asignados →	1,2,3,4,5,7,8	UAV 2	22.2222	10.0	28.5714	-6.3492
Iteración →	1	UAV 3	22.2222	8.0	22.8571	-0.6349
				35.0	100.0000	

Se selecciona al UAV 1 para cuarto el desplazamiento.

UAV 1	Caminos disponibles	t*h	P_{XY}	Normalizado	Ejecución Random
Nodo Partida: NODO 8	6	0.02222	1.0000	1.0000	-
	SUMA:	**0.02222**	**1.0000**		

El UAV 1 se desplaza al último nodo disponible: Nodo 6, y lo incluye en su asignación a explorar. Coste Nodo 6: **4**

Paso 6: Actualización de tabla de estados y selección de UAV a desplazar

Actualizar datos			Carga final estimada %	Carga neta actual	Carga % actual	Desfase
Nodos disponibles →		UAV 1	55.5556	21.0	53.8462	1.7094
Nodos asignados →	1,2,3,4,5,6,7,8	UAV 2	22.2222	10.0	25.6410	-3.4188
Iteración →	1	UAV 3	22.2222	8.0	20.5128	1.7094
				39.0	100.0000	

Paso 7: Valoración del resultado de la Hormiga 1

TABLA RESUMEN: HORMIGA 1			
Camino UAV 1	2--3--4--8--6		
Camino UAV 2	5--1		
Camino UAV 3	7		
Coste:			**Coste Desfase / factor**
Camino tiempo más largo	Carga	Desfase	
UAV 1:	21	1.7094	
UAV 2:	**10**	-3.4188	**34.1880**
UAV 3:	8	1.7094	

CAMINOS UAV PARA HORMIGA 2:

Tras ejecutar la misma secuencia queda como resultado:

TABLA RESUMEN: HORMIGA 2			
Camino UAV 1	2--3--4--1		
Camino UAV 2	5—6--8		
Camino UAV 3	7		
Coste:			**Coste Desfase / factor**
Camino tiempo más largo	Carga	Desfase	
UAV 1:	18	9.4018	
UAV 2:	**13**	-11.1111	**111.1110**
UAV 3:	8	1.7094	

FINALIZACIÓN DE LA PRIMERA ITERACIÓN

Tras la finalización de la primera iteración y con el resultado de los caminos obtenidos por cada hormiga (Para este ejemplo sólo dos), se procede a actualizar la constante de feromona según el resultado obtenido por cada hormiga. En este paso es necesario realizar otra adaptación de la forma en la que se actualiza esta constante, debido a que cada hormiga representa el recorrido llevado por cada UAV hay que separar en este punto la potenciación de la constante de feromona para cada UAV. Esto se debe a que no tiene por qué ser igual de provechoso moverse desde un nodo i hasta un nodo j para cada uno de los UAV, esto vendrá marcado por el coste que haya conseguido esa hormiga.

Coste de los caminos para cada UAV de la Hormiga 1 **34.1880**

Coste de los caminos para cada UAV de la Hormiga 2 **111.1110**

Caminos i ↔ j		**UAV1**	H1	H2	**UAV1**
Nodo i	**Nodo j**	**(1- ρ)* τ**	**UAV 1**	**UAV 1**	**(1- ρ)* τ**
1	2	0.099			0.099
1	4	0.099	0.0293	0.0090	0.1373
1	5	0.099			0.099
1	6	0.099	0.0293		0.1283
2	3	0.099	0.0293	0.0090	0.1373
2	4	0.099			0.099
2	6	0.099			0.099
2	5	0.099			0.099
3	4	0.099	0.0293	0.0090	0.1373
3	7	0.099			0.099
4	6	0.099			0.099
4	7	0.099			0.099
4	8	0.099			0.099
5	6	0.099			0.099
5	8	0.099			0.099
6	7	0.099			0.099
6	8	0.099			0.099
7	8	0.099			0.099

Caminos i ↔ j		**UAV 2**	H1	H2	**UAV2**
Nodo i	**Nodo j**	**(1- ρ)* τ**	**UAV 2**	**UAV 2**	**(1- ρ)* τ**
1	2	0.099			0.099
1	4	0.099			0.099
1	5	0.099			0.099
1	6	0.099			0.099
2	3	0.099			0.099
2	4	0.099			0.099
2	6	0.099			0.099
2	5	0.099			0.099
3	4	0.099			0.099
3	7	0.099			0.099
4	6	0.099			0.099
4	7	0.099			0.099
4	8	0.099			0.099
5	6	0.099		0.0090	0.1080
5	8	0.099	0.0293		0.1283
6	7	0.099			0.099
6	8	0.099		0.0090	0.1080
7	8	0.099			0.099

Caminos		UAV 3	H1	H2	UAV3
Nodo i	Nodo j	(1- ρ)* τ	UAV 3	UAV 3	(1- ρ)* τ
1	2	0.099			0.099
1	4	0.099			0.099
1	5	0.099			0.099
1	6	0.099			0.099
2	3	0.099			0.099
2	4	0.099			0.099
2	6	0.099			0.099
2	5	0.099			0.099
3	4	0.099			0.099
3	7	0.099			0.099
4	6	0.099			0.099
4	7	0.099			0.099
4	8	0.099			0.099
5	6	0.099			0.099
5	8	0.099			0.099
6	7	0.099			0.099
6	8	0.099			0.099
7	8	0.099			0.099

Figura 20: Actualización potencia de la feromona para los caminos disponibles para cada uno de los UAV

Tras realizar varias iteraciones la potencia de la feromona va incrementándose en aquellos caminos en los que se obtenían mejores soluciones, aumentando después de cada iteración la probabilidad de volver a ser elegido.

Cuantas más hormigas e iteraciones se hagan, más probable será que el resultado obtenido sea considerado como resultado óptimo.

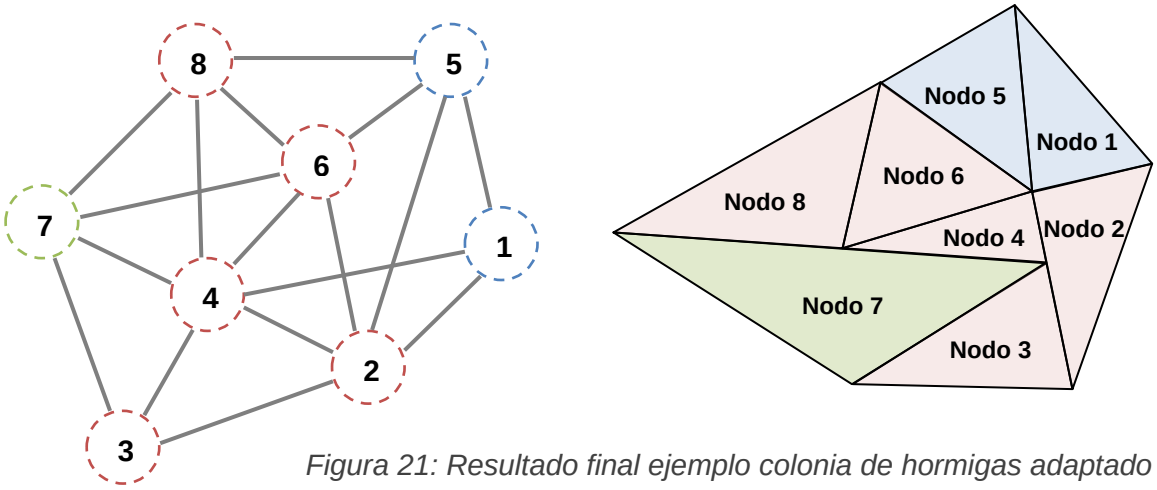


Figura 21: Resultado final ejemplo colonia de hormigas adaptado

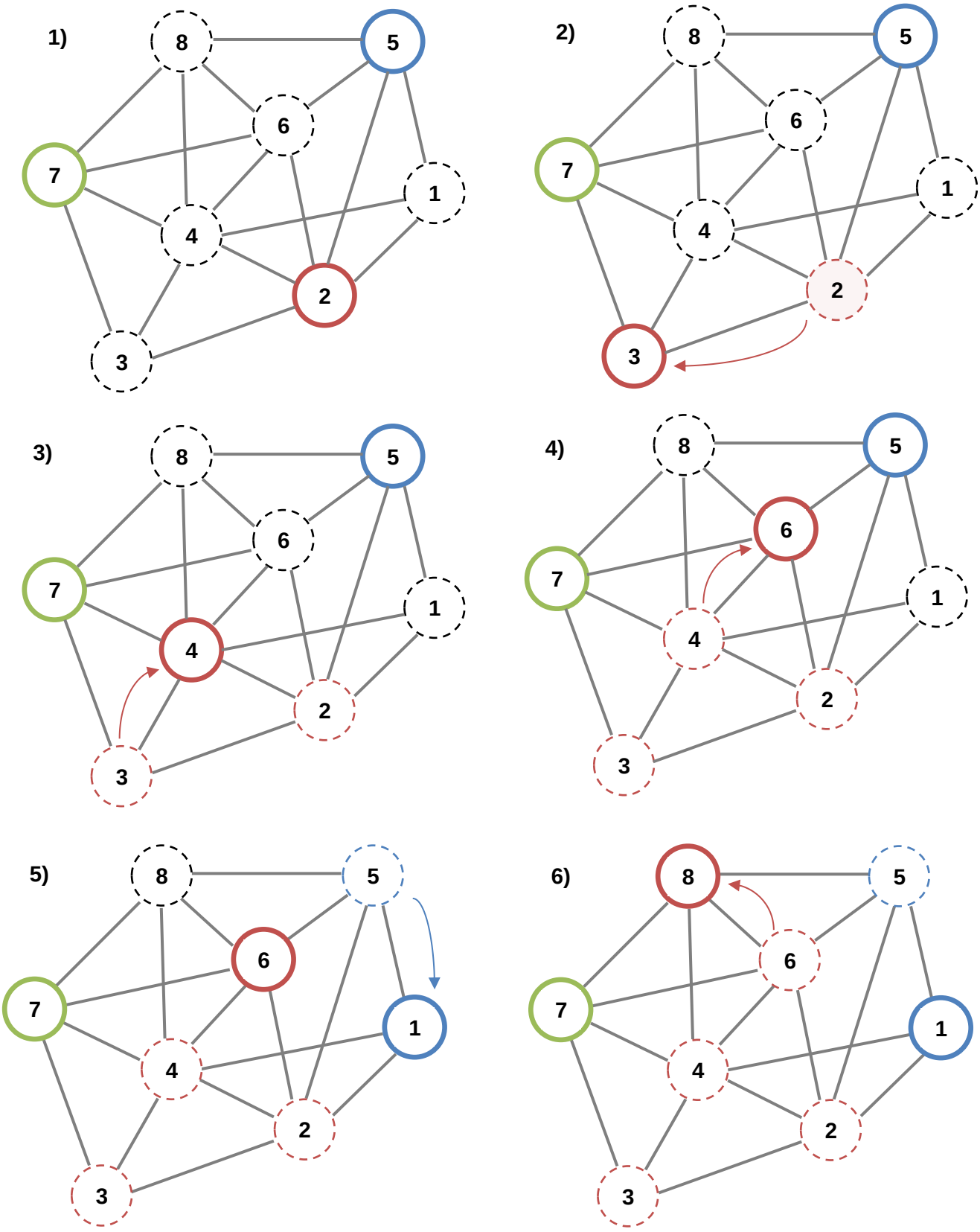


Figura 22: Secuencia resumen Iteración 1, Hormiga 1-ejemplo

3.2. Estrategias para la optimización en la planificación de rutas para cobertura de un área

Las principales corrientes de investigación llevadas a cabo en sistemas de navegación empleando UAV de tipo multirrotor apuntan, como mejor estrategia para cubrir un espacio, aquellas que minimicen el número de giros durante el vuelo, debido a las pérdidas que se producen en las fases de aceleración-deceleración y durante el propio giro. Estos estudios limitan la posibilidad de giro en valores fijos, típicamente giros de 45º-90º. Esta restricción, que se utiliza para simplificar, viene heredada del estudio de navegación típico que se estudia para sistemas robóticos terrestres.

Para el análisis de las diferentes *estrategias de optimización en la asignación de superficie a explorar* que se han propuesto se ha optado por unificar la estrategia de navegación a una única, eligiendo la estrategia de minimizar el número de giros haciendo zigzag debido al extenso consenso de esta estrategia como la óptima. Se deja para trabajos futuros incorporar la comparativa de minimizar el número de giros haciendo una espiral y la estrategia de descomposición en mallado vistos en el capítulo de 2.2 Estado del Arte.

El cálculo del tiempo que se pierde en cada giro se obtiene de la siguiente ecuación [1], que representa el modelo simplificado de giro de un UAV:

$$\tau_{ri} = \tau_C[n_w - 1] + \sum[k\alpha] + \frac{1}{V_{UAV}}\left[d_{Bi} + d_{Bf}\right] \quad (5)$$

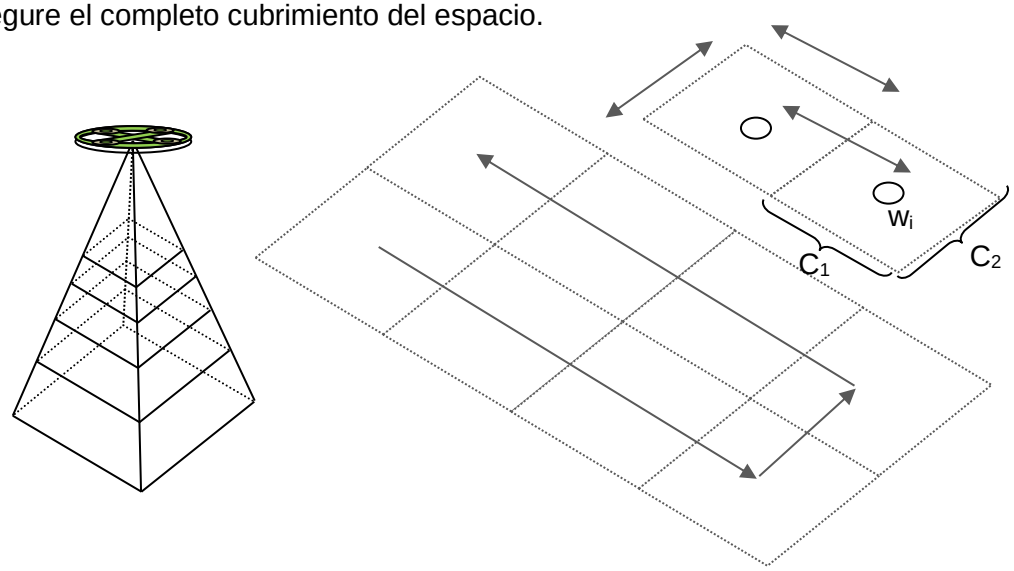
$$\tau_C = \frac{C}{V_{UAV}} \quad (6)$$

Siendo k el factor de penalización por cada ángulo y de valor 0.444 [3], y α el giro producido.

Este modelo tiene la ventaja de permitir cualquier giro para el UAV, sin ningún tipo de restricción, y lo penaliza con el factor k multiplicado por el ángulo

C es la región o capacidad de espacio visible bajo el UAV, V_{UAV} la velocidad de desplazamiento, n_w número de waypoints, τ_c el tiempo de desplazamiento entre waypoint.

Para la realización de la navegación, una vez que un UAV tiene asignado un espacio a cubrir, se generan vectores de puntos o waypoint con el ancho marcado por la óptica de la cámara embarcada y la altura de vuelo, de tal forma que entre puntos se asegure el completo cubrimiento del espacio.



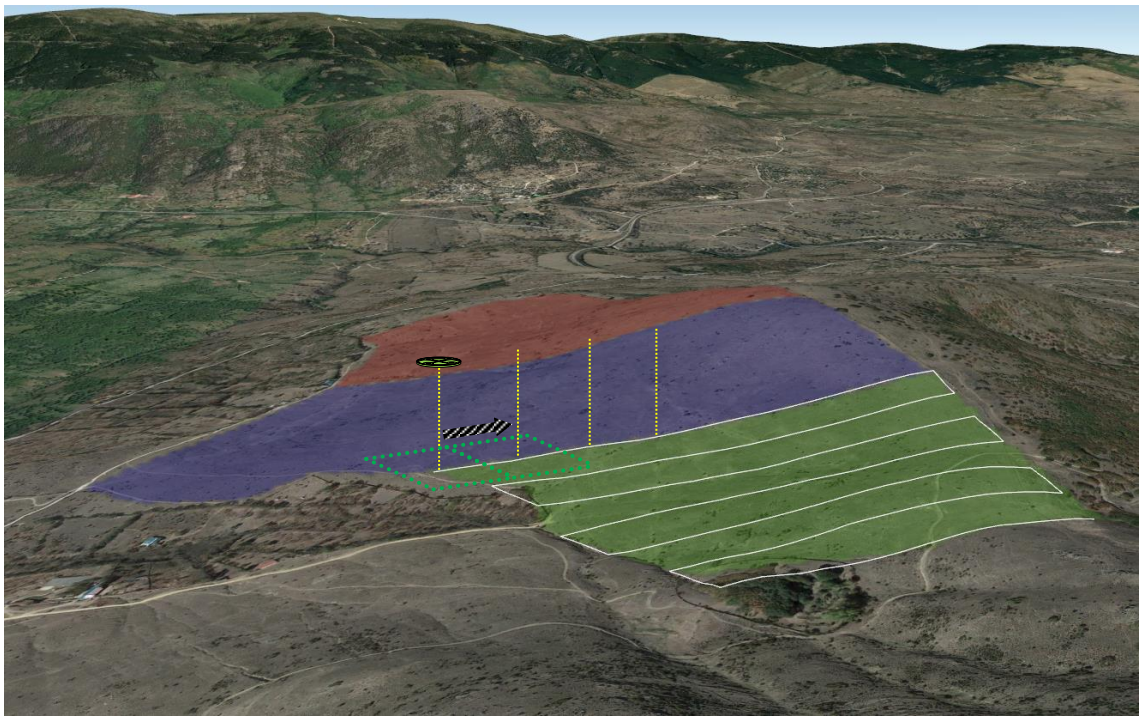


Figura 23: Campo de visión de UAV sobre el plano de vuelo relativo a la altura y óptica de la cámara embarcada

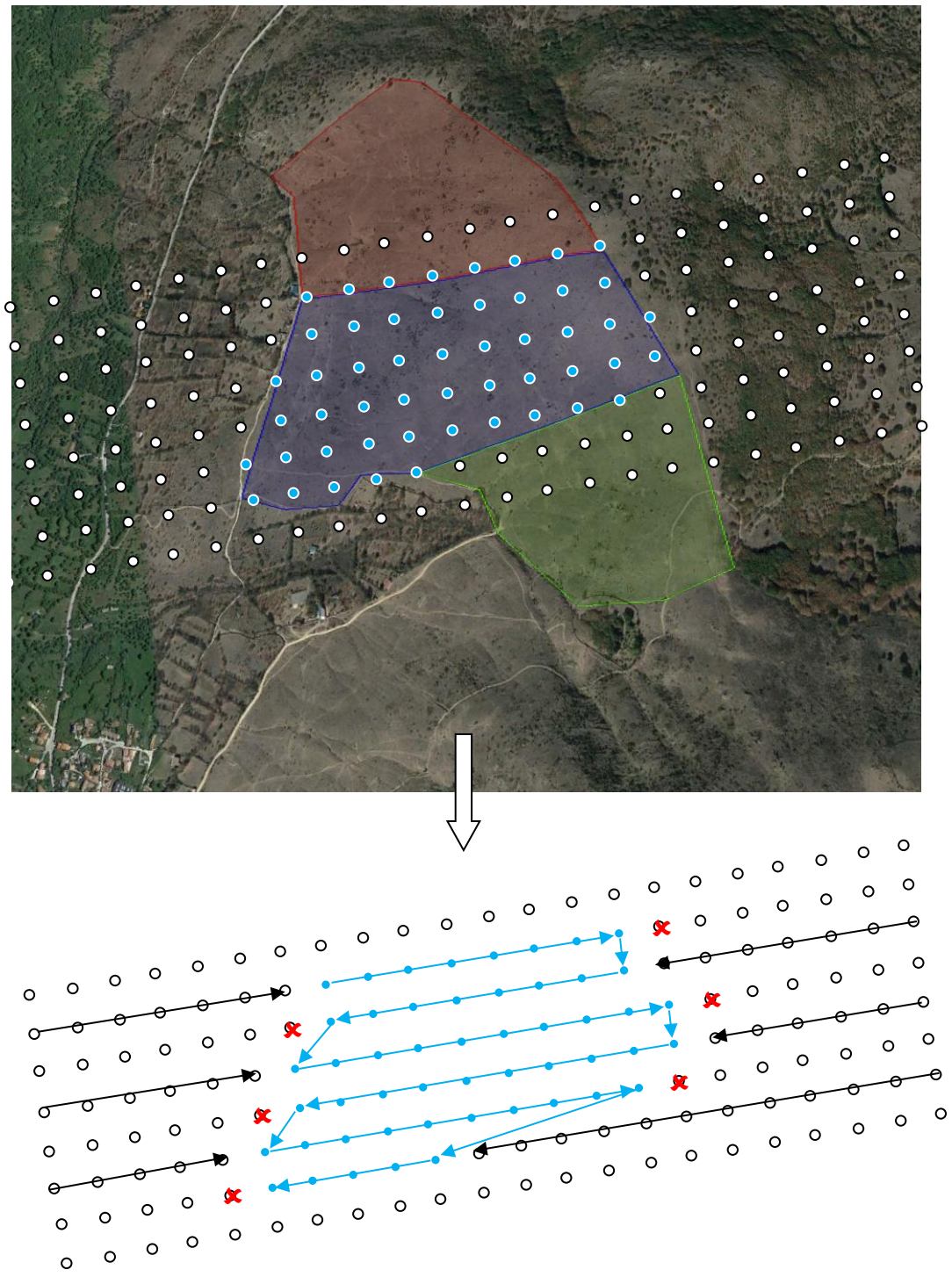


Figura 24: Vectores de navegación y posibilidad de giros completos de k α

La generación de los puntos con tamaño C_i x C_i están orientados paralelamente al lado más largo del polígono asignado, con la idea de minimizar los giros. Cada vector de puntos comprueba los puntos que caen dentro del espacio asignado y genera

vectores de puntos a recorrer. Posteriormente, y ya en la fase de vuelo, el UAV va desplazándose punto a punto y cambiando de vector en cuanto encuentra un punto vacío.

El coste final de navegación para cada UAV se obtiene de la suma de los costes de moverse de punto a punto y se incluye el tiempo inicial d_{Bi} y un tiempo de retorno d_{Bf} que corresponde con:

Coste de navegación: tiempo de despegue + tiempo de alcanzar el primer waypoint del mapa desde la estación base + tiempo de retorno desde el último waypoint del mapa hasta retornar a la estación base + tiempo de aterrizaje.

Por cuestiones de seguridad, la velocidad empelada en el despegue y aterrizaje normalmente es más lento que la velocidad de vuelo.

4. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.1. Variantes estudiadas

Dada la diversidad de escenarios posibles que se pueden dar, el software de simulación desarrollado permite estudiar el comportamiento de las distintas estrategias propuestas atendiendo a diferentes características:

- Características físicas de los UAV
- Número de unidades UAV
- Posición de los UAV
- Características de la superficie a explorar

Para esta presentación de resultados se va a simplificar la cantidad de combinaciones posibles, realizando las siguientes simulaciones:

Tipo de escenario	Número de UAV	Estrategia	Suavizado
Regular convexo Regular compacto Irregular	3 5 8	Descomposición polígonos Algoritmo de clustering K-means Colonia de hormigas ACO	Sí No

Figura 25: Tabla de combinaciones simuladas

4.1.1. Características físicas de los UAV

Parámetros significativos:

- Características cinemáticas y dinámicas del vuelo: Velocidad, aceleración, peso.
- Tiempo de vuelo y alcance
- Altura de operación
- Cámara de visión embarcada

Los parámetros anteriores se pueden agrupar en dos bloques:

- Velocidad y autonomía como capacidad de vuelo.
- Altura de operación y cámara embarcada como región de mapa visible.

Si bien el software permite modificar todos los parámetros anteriores, las simulaciones adjuntas en la presente memoria se han hecho con una flota de UAV homogénea en sus características físicas.

4.1.2. Número de unidades UAV

Otro factor a tener en cuenta a la hora de comparar las distintas estrategias propuestas es el número de UAV que se disponen. Se plantea la posibilidad que el resultado obtenido para cada estrategia propuesta se comporte de manera diferente según si el número de unidades es bajo o alto, así, se probarán todos ellos con disponibilidad de 2 – 5 – 8 unidades UAV.

En la siguiente figura se representa la diferencia de aplicar diferente número de UAV para las distintas estrategias.

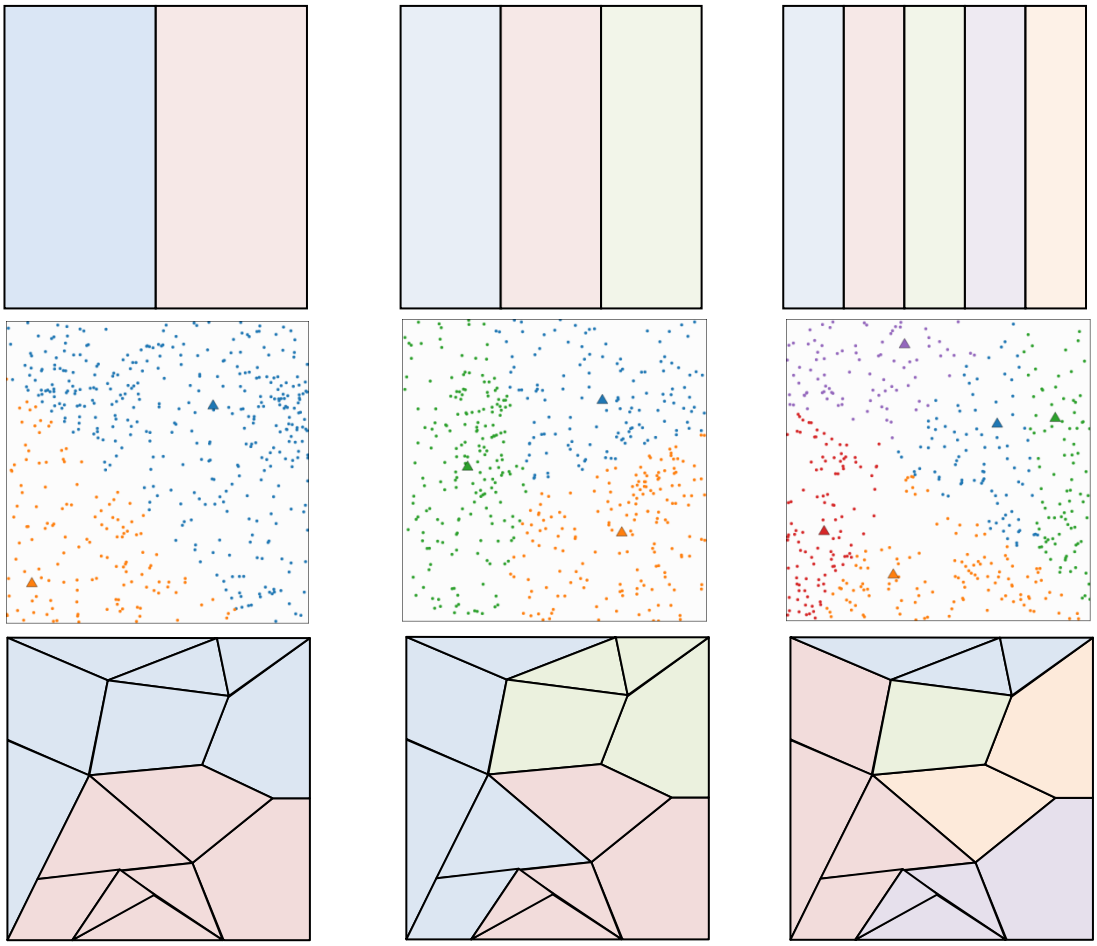


Figura 26: Propuesta de estrategias atendiendo al número de UAV

4.1.3. Posición de los UAV

Se plantean distintos escenarios de partida atendiendo desde dónde se encuentran los UAV disponibles:

- Estación base: Todos los UAV se encuentran ubicados en una estación base fuera del área a explorar

- Posición aleatoria: Se posicionan aleatoriamente los UAV dentro del área a explorar.

Las simulaciones adjuntas realizadas se han hecho bajo el supuesto de que todos los UAV se encuentran estacionados en una estación base. Se ha considerado que este escenario tiene más aplicación real que el de la posición aleatoria, que queda disponible en el software de simulación como una variante más académica.

El cálculo del coste del tiempo empleado para cumplir la misión incluye el necesario para despegar, ir hasta el área a explorar, recorrerlo, volver a la estación base y aterrizar.

En la figura 27 se muestran las dos posibles formas de inicializar la posición de los UAV.

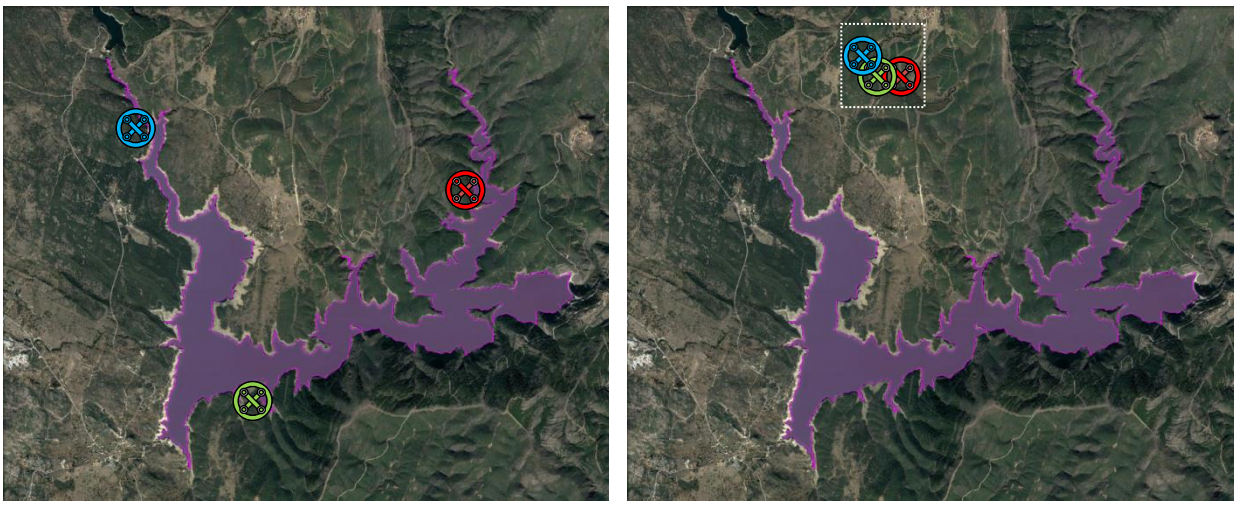


Figura 27: Posición inicial de los UAV: Aleatoria vs Estación base

4.1.4. Características de la superficie a explorar

La topología de la superficie a explorar puede comprometer la elección de una estrategia respecto a otra, por ello se distinguen los siguientes escenarios:

- Superficies altamente regulares
    - Mapas regulares convexo
    - Mapas regulares (compactos)
- Superficies irregulares

La siguiente figura muestra los distintos escenarios que se han utilizado para probar y valida las simulaciones.

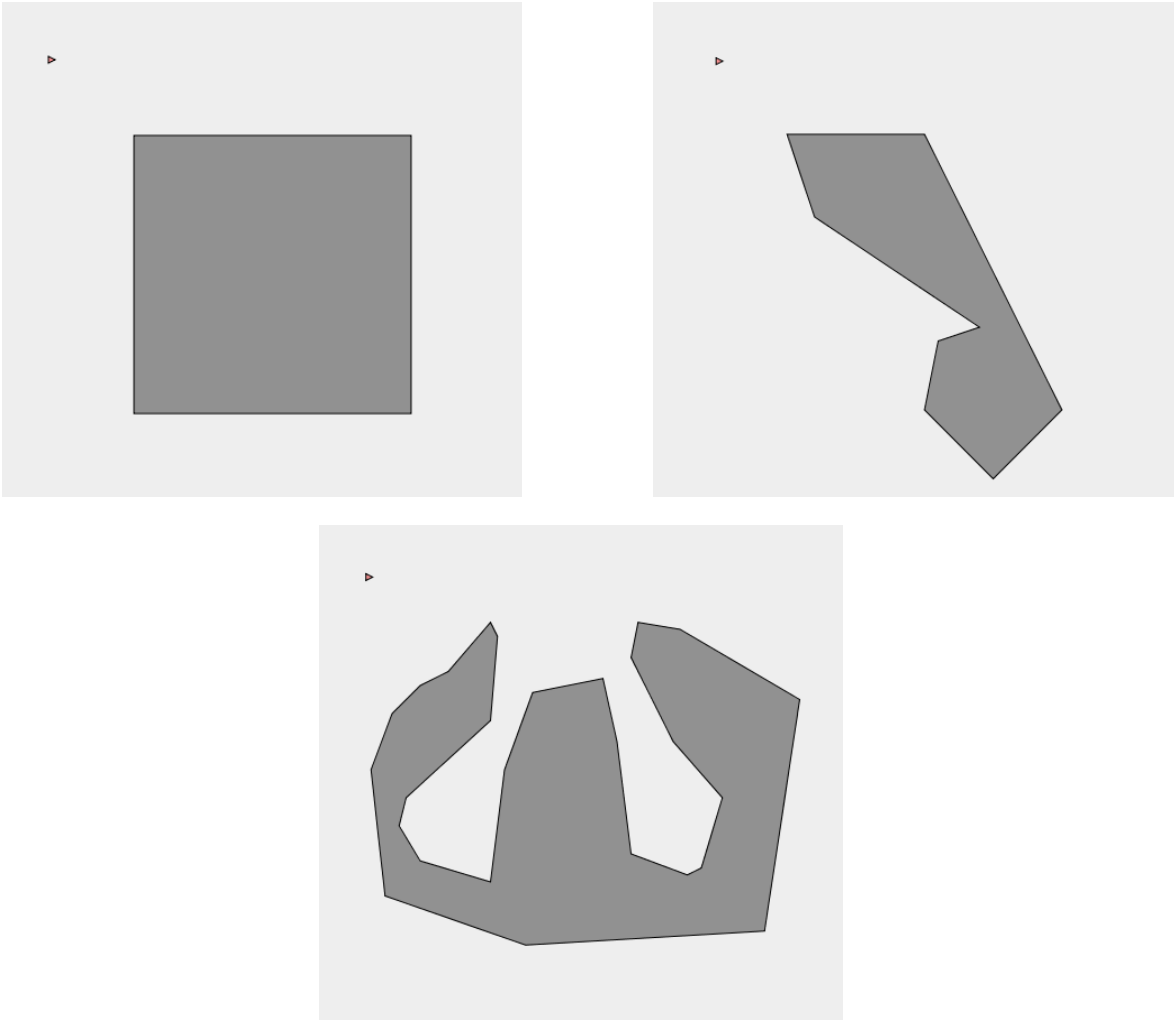
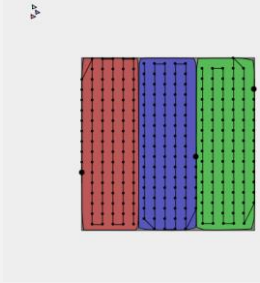
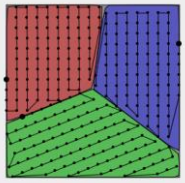
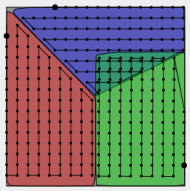


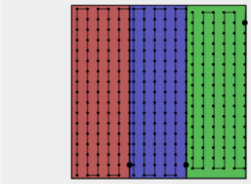
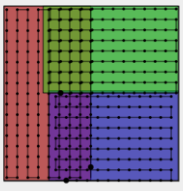
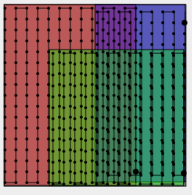
Figura 28: Superficie regular cóncava, regular convexa y “compacta” e irregular

4.2. Ejecución de simulaciones

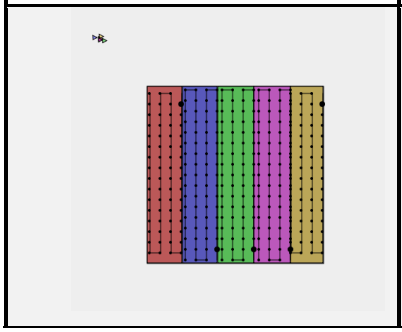
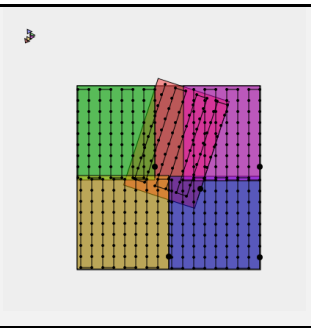
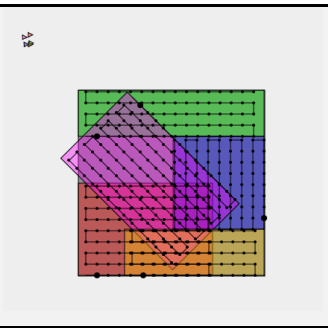
Se incluyen tablas con resultado visual y resultado de costes de vuelo atendiendo al tiempo que tarda cada UAV en recorrer su espacio, siendo el UAV que más tiempo tarde el UAV denominado crítico:

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

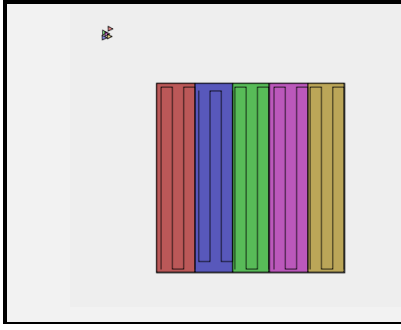
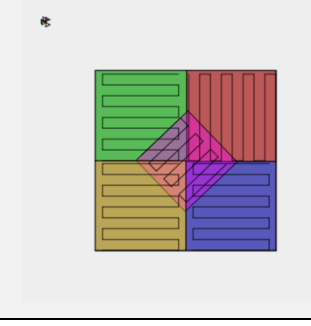
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	423,4
K-Means	483,6
Colonia de hormigas –ACO-	535

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

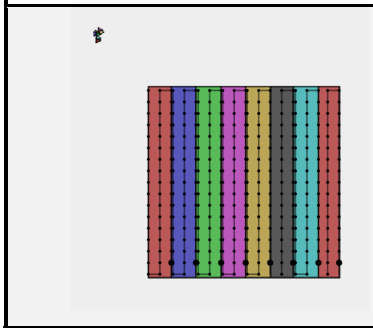
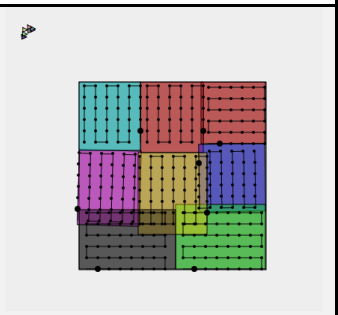
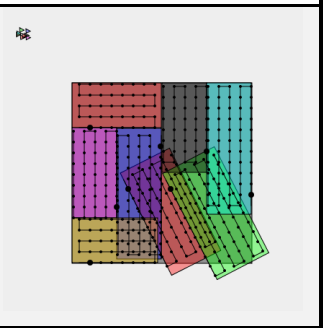
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	428,6
K-Means	585,2
Colonia de hormigas –ACO-	700,8

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

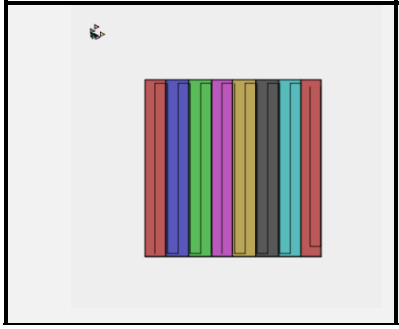
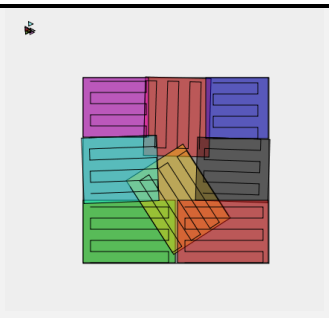
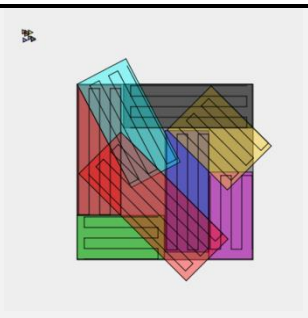
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	308,4
K-Means	366,4
Colonia de hormigas –ACO-	433,4

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

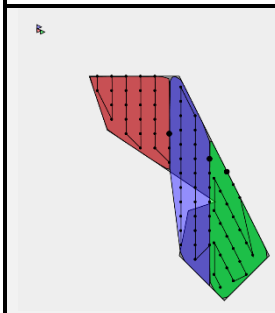
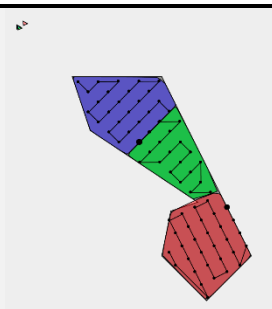
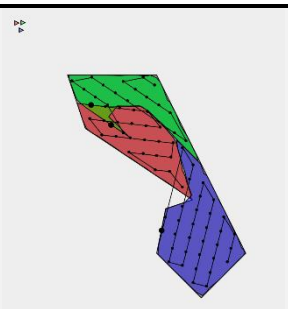
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	314,6
K-Means	391
Colonia de hormigas –ACO-	560,8

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

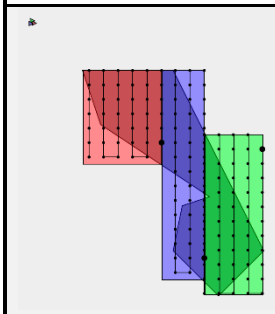
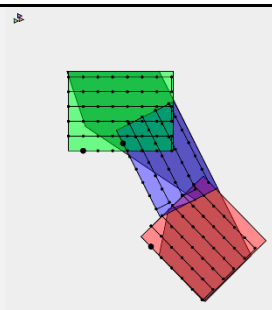
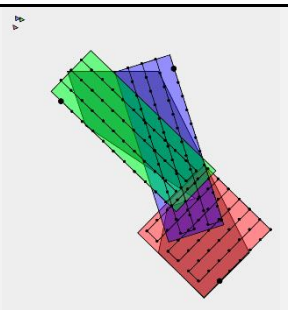
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	260,4
K-Means	267
Colonia de hormigas –ACO-	329

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

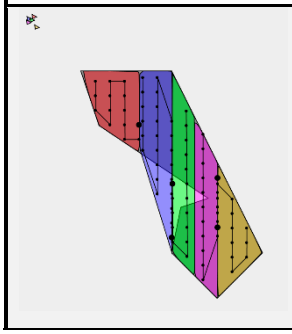
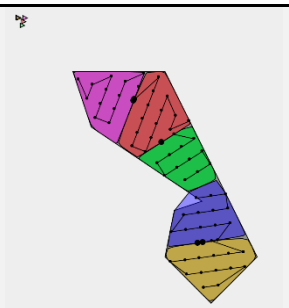
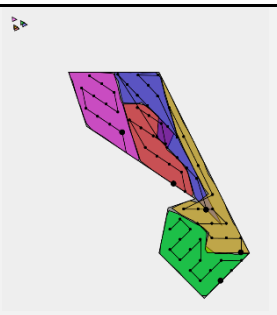
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	254,6
K-Means	279,4
Colonia de hormigas –ACO-	368,4

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

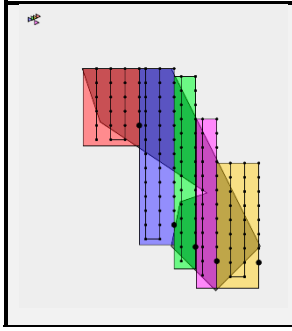
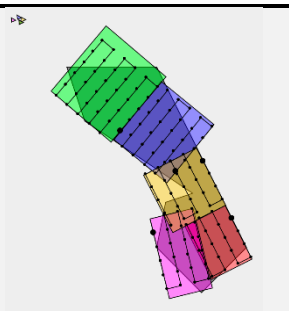
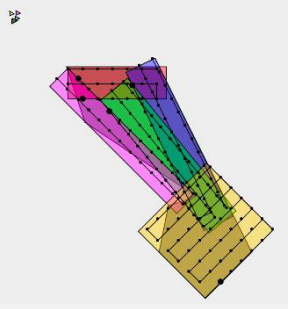
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	231,6
K-Means	253
Colonia de hormigas –ACO-	331,4

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

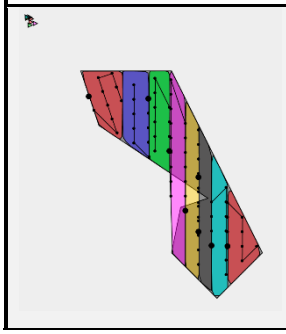
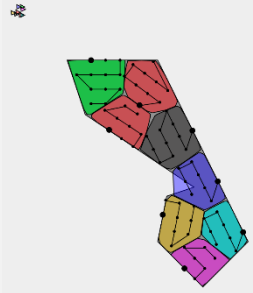
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	360
K-Means	297,2
Colonia de hormigas –ACO-	426,8

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: NO**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

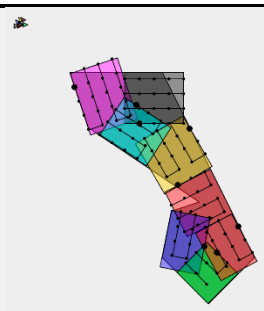
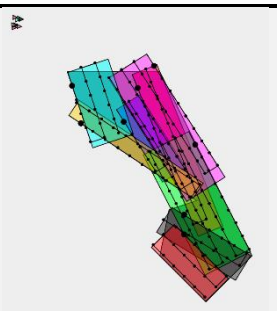
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	216
K-Means	200,4
Colonia de hormigas –ACO-	230,2

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: SÍ**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

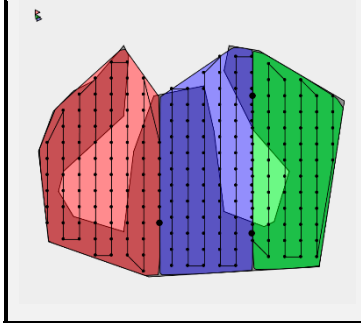
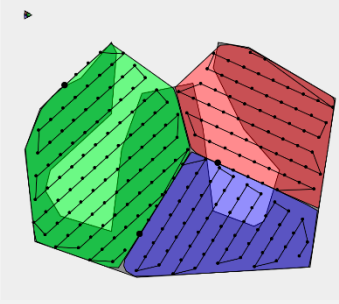
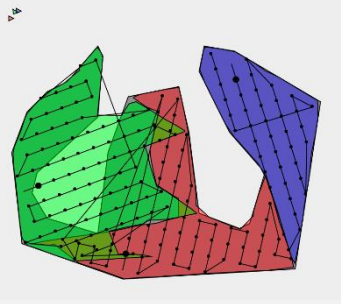
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	248,2
K-Means	253,6
Colonia de hormigas –ACO-	373,2

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: NO**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

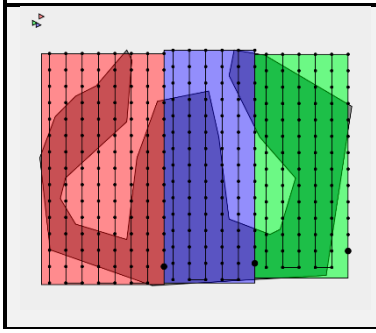
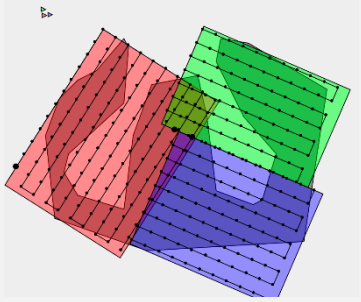
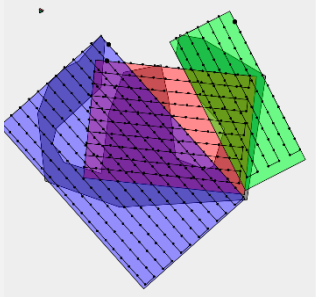
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	166,4
K-Means	163,2
Colonia de hormigas –ACO-	186,2

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: SÍ**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

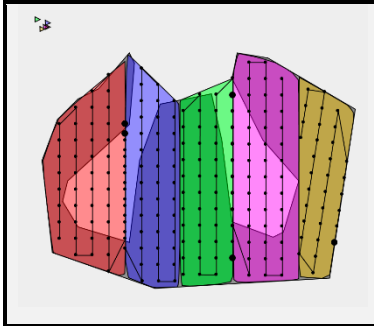
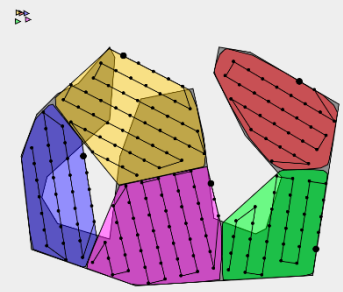
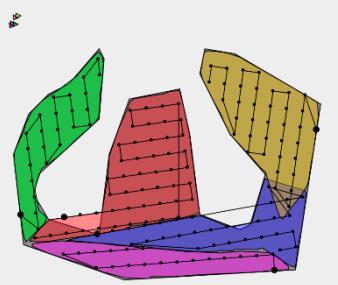
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	195,2
K-Means	177,8
Colonia de hormigas –ACO-	226,4

Número de UAV: 3 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

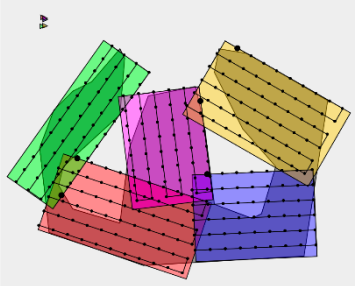
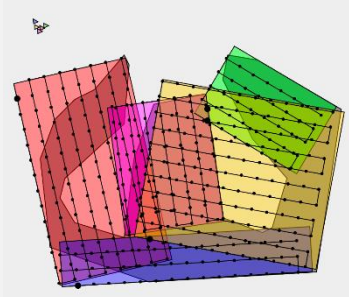
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	482,6
K-Means	533,2
Colonia de hormigas –ACO-	572,4

Número de UAV: 3 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos Clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

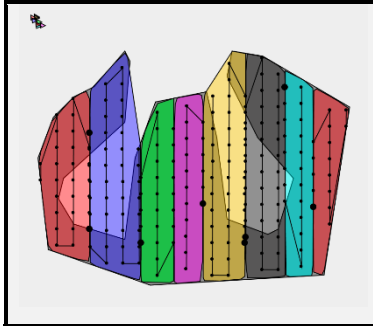
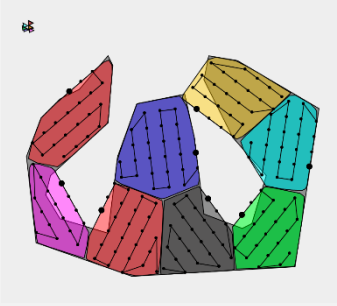
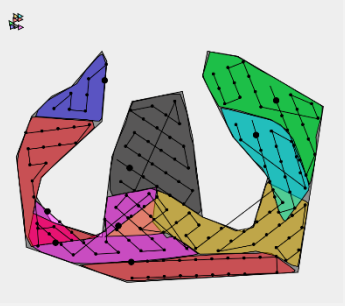
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	614,2
K-Means	661,4
Colonia de hormigas –ACO-	1088,8

Número de UAV: 5 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

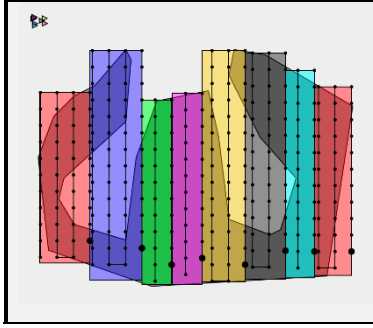
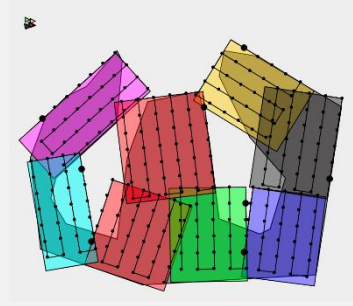
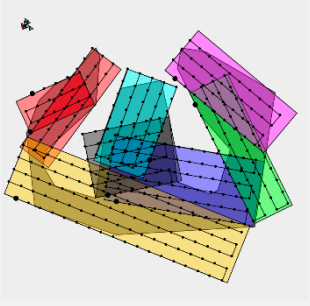
RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	344,8
K-Means	317,6
Colonia de hormigas –ACO-	375,4

Número de UAV: 5 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	411
K-Means	374,4
Colonia de hormigas –ACO-	741

Número de UAV: 8 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	257,4
K-Means	244,6
Colonia de hormigas –ACO-	382,4

Número de UAV: 8 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

RESUMEN	Media UAV Crítico (segundos)
Polígonos	309,2
K-Means	283,6
Colonia de hormigas –ACO-	541,2

4.3. Interpretación de los resultados

4.3.1. Simulaciones

Cada estrategia propuesta tiene una serie de parámetros que, si son mal calibrados, puede afectar a la validez del resultado obtenido.

También hay que tener en consideración a la hora de sacar conclusiones que los resultados obtenidos han sido definidos a partir de la propuesta del modelo de movimiento planteado en [3] y que, si se cambia el valor de penalización de giro, soluciones que aquí se plantean como más eficientes con respecto a otras pueden no serlo con estos nuevos valores de penalización.

Por eso se han incluido tantas imágenes visuales del resultado de cada simulación, ya que, aunque la tabla asociada compute un valor numérico como resultado, habrá otros usos en los que se pueda (a raíz de la solución visual) considerarse soluciones más interesantes.

4.3.2. Parametrización de las estrategias

Descomposición de polígonos

- Velocidad de vuelo: 5 m/s
- Altura de vuelo: 120 m

Clustering

- Velocidad de vuelo: 5 m/s
- Altura de vuelo: 120 m
- Número de puntos: 5000

Es importante que el número de puntos elegido en el algoritmo de clustering sea suficiente para cubrir por completo la superficie a sobrevolar. Sin embargo, una vez el número de puntos es suficiente para asegurar que los UAV recorran toda la superficie, aumentar el número de puntos no produce mejores resultados.

Para la validación de resultados se han empleado una nube de 5000 puntos, ya que se ha considerado que era un número suficiente para poder cubrir completamente el escenario. En la siguiente figura se puede ver cómo un número insuficiente de puntos hace que no se distribuya completamente el área.

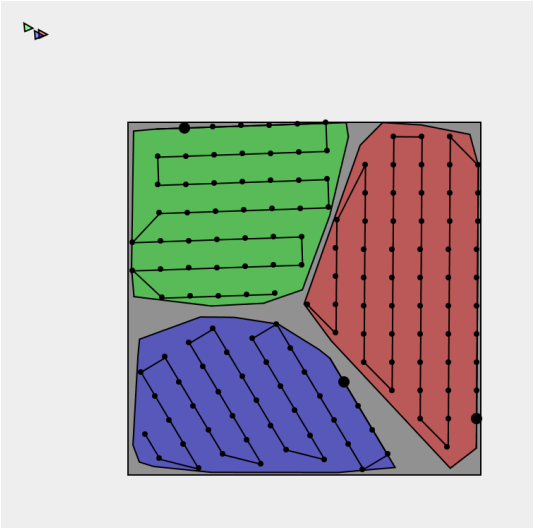


Figura 29: Algoritmo de clustering con un número insuficiente de puntos (300)

Colonias de hormigas

- Velocidad de vuelo: 5 m/s
- Altura de vuelo: 120 m
- Número de iteraciones: 20
- Número de hormigas: 30

4.3.3. Análisis de resultados

Tabla resumen: mejores resultados (segundos)			
	Polígonos	Clustering	Hormigas
3 UAV \ Regular Convexo \ Sin Suavizado	**423,4**	483,6	535
3 UAV \ Regular Convexo \ Con Suavizado	**428,6**	585,2	700,8
5 UAV \ Regular Convexo \ Sin Suavizado	**308,4**	366,4	433,4
5 UAV \ Regular Convexo \ Con Suavizado	**314,6**	391	560,8
8 UAV \ Regular Convexo \ Sin Suavizado	**260,4**	267	329
8 UAV \ Regular Convexo \ Con Suavizado	**254,6**	279,4	368,4
3 UAV \ Regular No Convexo \ Sin Suavizado	**231,6**	253	331,4
3 UAV \ Regular No Convexo \ Con Suavizado	360	**297,2**	426,8

5 UAV \ Regular No Convexo \ Sin Suavizado	216	**200,4**	230,2
5 UAV \ Regular No Convexo \ Con Suavizado	**248,2**	253,6	373,2
8 UAV \ Regular No Convexo \ Sin Suavizado	166,4	**163,2**	186,2
8 UAV \ Regular No Convexo \ Con Suavizado	195,2	**177,8**	226,4
3 UAV \ Irregular \ Sin Suavizado	**482,6**	533,2	572,4
3 UAV \ Irregular \ Con Suavizado	**614,2**	661,4	1088,8
5 UAV \ Irregular \ Sin Suavizado	344,8	**317,6**	375,4
5 UAV \ Irregular \ Con Suavizado	411	**373,4**	741
8 UAV \ Irregular \ Sin Suavizado	257,4	**244,6**	382,4
8 UAV \ Irregular \ Con Suavizado	309,2	**283,6**	541,2

A la vista de los resultados que se han obtenido en las diferentes composiciones se observa que todas las estrategias propuestas dan soluciones satisfactorias y bastante eficientes en la resolución del problema que se planteaba, si bien, según el tipo de escenario que se presente, algunas estrategias dan mejores resultados que otras.

En líneas generales, el algoritmo de colonia de hormigas presenta los peores resultados numéricos, aunque la solución visual que ofrece es muy interesante. Esto hace pensar que en otras aplicaciones similares o en escenarios en los que el factor de penalización de giros sea distinto, puede que ofrezca las soluciones más eficientes numéricamente.

En cuanto a los resultados que se han obtenido cuando se aplicaban la estrategia de polígonos o de clustering, lo más característico que las diferencia es la solución visual que ofrecen, ya que la numérica con los parámetros de entrada empleados es bastante parecida. Esta gran diferencia en la solución visual da la posibilidad de elegir propuestas "a ojo" según lo que más pueda interesar en un momento dato.

Al igual que pasaba con la estrategia de hormigas, variar los parámetros de vuelo puede cambiar radicalmente la percepción de validez de cada estrategia.

Como últimas consideraciones y entrando en detalle en los resultados obtenidos tal y como aquí se han parametrizado los UAV, cabe señalar que, de forma general, a medida que aumenta el número de UAV parece que la estrategia de clustering ofrece mejores prestaciones, mientras que en pocas unidades las mejores prestaciones se obtienen con la estrategia de polígonos.

A continuación se listan las bondades e inconvenientes de cada estrategia:

Descomposición de polígonos

Principales bondades:

- Una vez definidos los criterios, es un algoritmo computacionalmente rápido.
- Fácil de interpretar, permite incluso hacer una estimación visual sin necesidad del software de simulación
- Por la misma razón, permite analizar la bondad del resultado obtenido con una simple visualización del resultado.
- Resuelve eficazmente la variante de flota UAV con diferentes prestaciones.
- Funciona bien en polígonos regulares convexos y da solución al resto de casos.
- Funciona bien con diferentes unidades de UAV a repartir.
- Funciona bien en la composición de partida de los UAV posicionados en una estación base.

Principales limitaciones:

- No optimiza bien el espacio sobrevolado, si bien el coste total sí da buenas soluciones, puede necesitar recorrer grandes espacios, especialmente en polígonos cóncavos.
- Si cambia el factor de penalización o se decide trabajar con entornos de navegación con zonas prohibidas de vuelo, puede presentar soluciones muy malas.

Clustering

Principales bondades:

- Algoritmo computacionalmente rápido.
- Permite utilizar diferentes modalidades (K-means en este proyecto)

- Soluciones visualmente muy compactas en todas las composiciones probadas.

- Presenta los mejores resultados a medida que aumenta el número de UAV, especialmente en polígonos no convexos.

- Buenas soluciones en el resto de composiciones, aunque en algunas es menos eficiente que usando la estrategia de polígonos.

- Al aumentar el número de UAV es la que suele dar mejores resultados.

Principales limitaciones:

- En polígonos regulares convexos con pocas unidades UAV da peores resultados que la descomposición de polígonos.

- No resuelve cuando hay flotas de UAV con características diferentes, ya que el algoritmo de clustering no permite ponderaciones.

Colonias de hormigas

Principales bondades:

- Resuelve fácilmente la variante de flota UAV con diferentes prestaciones.

- Funciona bien en todos los escenarios, aunque no sea el más eficiente.

- Pueden posicionarse los UAV en estación base o aleatoriamente.

Principales limitaciones:

- Con excesivo número de hormigas e iteraciones, la computación puede ser relativamente lenta.

- Obtiene los peores resultados en todas las combinaciones, aunque vienen marcados por el valor de penalización (k). Con un valor de penalización distinto cabe la posibilidad de que los resultados fuesen más eficientes. A su vez, la solución visual ofrecida resulta muy interesante.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Uno de los grandes valores logrados en este trabajo está conseguido en la fase de investigación documental que se ha llevado a cabo, que tenía como objetivo acumular conocimiento sobre el objeto de estudio que se proponía. Esto, ha posibilitado desarrollar una perspectiva teórica que ha finalizado con la comprensión del problema que se planteaba y ha permitido enlazar con otras disciplinas obteniendo resultados que permiten vislumbrar nuevas ideas personales para extender un trabajo futuro.

Se han desarrollado unas nuevas estrategias hasta ahora no propuestas en ningún trabajo de investigación para resolver el problema de cubrimiento de áreas empleando sistemas multi-UAV.

Estas estrategias propuestas han obtenido resultados satisfactorios y eficientes, tal y como se ha desarrollado a lo largo del capítulo 4.

Otro aspecto a reseñar es que se ha elaborado un software de simulación de todas estas estrategias altamente modular y escalable, en lenguaje de alto nivel Java, que permitirá a futuros trabajos introducir nuevos: algoritmos, métodos, escenarios de mapa, características de vuelo de los UAV, etc., con lo que se ofrece un punto de partida a que nuevas propuestas puedan aplicar sus métodos y obtener resultados sin tener que hacer grandes modificaciones al código.

También se ha podido determinar la importancia de la selección de número de UAV, la tipología del escenario, modelo de vuelo, y otros parámetros de entrada a la hora de elegir una estrategia de las propuestas.

El estudio, tiene la consecuencia de aportar gran cantidad de ideas, pero que por razones evidentes de la dimensión del problema que se va generando, estas ideas no pueden ser todas incluidas en esta fase del trabajo. Además, para cada uso que se pretenda dar de un sistema multi-UAV para misiones de cobertura de áreas, es posible que sea interesante incluir ciertas características que en otros casos son irrelevantes.

Así, se proponen una serie de trabajos que sí considero sería interesante poder extender con las bases presentadas:

- **Incorporar algoritmos de agrupamiento o clustering:** No se espera que se mejoren los resultados, pero puede ser interesante ampliar las alternativas.

- **Análisis de más escenarios para sacar patrones o generación de características:** Ampliar la base de resultados.

- **Modificación de los algoritmos puros de agrupamiento o clustering:** Hay dos desarrollos que podrían ser interesantes. Primero, forzar el número máximo de puntos que puede incluirse en un clúster determinado –con lo que se conseguiría dar solución usando esta estrategia al problema de sistemas multi-UAV con características físicas diferentes- y segundo, modificar la densidad de puntos –era aleatoria- por una densidad de puntos condicionada, tal que, en zonas donde haya especial interés en que sea recorrida con más detalle, haya mayor densidad de puntos y con ello una asignación de área más pequeña para el UAV que deba recorrer ese espacio.

- **Inclusión de áreas segregadas:** Permitiría incluir zonas de vuelo prohibidas que podría ser de utilidad para evitar núcleos urbanos, espacios privados o de bajo interés.

- **Recomposición dinámica en tiempo real:** Se ha demostrado que las estrategias propuestas dan una solución en pocos milisegundos, por lo que podría contemplarse la opción de recomposición de asignaciones en caso de contingencias.

6. Referencias bibliográficas

Para la realización de este Trabajo Fin de Máster se ha consultado infinidad de apuntes académicos de carácter general relativos a una gran cantidad de disciplinas que estudian los sistemas inteligentes, así como contacto con proveedores de UAV con los que se ha podido establecer un conjunto de ideas globales sobre el cómo resolver el problema de cobertura de espacios empleando sistemas multi agente.

En este apartado se listan los trabajos consultados más característicos y relacionados directamente con el estudio realizado aquí, y que han servido de punto de partida para las propuestas que se han planteado como nuevas vías de estudio.

[1] Santana Cruz, Ernesto, Romualdo Moreno Ortiz, and Miquel Àngel Piera Eroles. "Planificación de rutas para la cobertura de un área en tiempo mínimo mediante un sistema Multi-UAV." Actas de las XXXV Jornadas de Automática, 3-5 de septiembre de 2014, Valencia.

[2] Jiao, Yu-Song, et al. "Research on the coverage path planning of uavs for polygon areas." *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference on*. IEEE, 2010.

[3] Santana Cruz, E. E. (2017). Propuesta de sistema multi-UAV para aplicaciones de cobertura de área.

[4] Barcos, L., Rodríguez, V., Álvarez, M. J., & Robusté, F. (2002). Algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas para la resolución del problema del transporte de carga desde varios orígenes a varios destinos. In V Congreso de Ingeniería del Transporte. Santander

[5] Valente, J., Del Cerro, J., Barrientos, A., & Sanz, D. (2013). Aerial coverage optimization in precision agriculture management: A musical harmony inspired approach. Computers and electronics in agriculture

[6] Barrientos, A., Colorado, J., Cerro, J. D., Martinez, A., Rossi, C., Sanz, D., & Valente, J. (2011). Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. Journal of Field Robotics,

[7] San Juan, V., Santos, M., & Andújar, J. M. (2018). Intelligent UAV Map Generation and Discrete Path Planning for Search and Rescue Operations. Complexity, vol. 2018, Article ID 6879419, 17 pages.

[8] Garcia-Aunon, P., Peñas, M. S., & de la Cruz García, J. M. (2017). Parameter selection based on fuzzy logic to improve UAV path-following algorithms. Journal of Applied Logic, 24, 62-75.

[9] Zotes, F. A., & Peñas, M. S. (2017). Una Revisión de Técnicas de Optimización Heurística para el Diseño de Trayectorias Interplanetarias en Misiones Espaciales. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 14(1), 1-15.

[10] Zotes, F. A., & Peñas, M. S. (2012). Particle swarm optimisation of interplanetary trajectories from Earth to Jupiter and Saturn. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25(1), 189-199.

[11] Santos, M. (2011). Un enfoque aplicado del control inteligente. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 8(4), 283-296.

[12] Pajares, G., Ruz, J. J., Lanillos, P., Guijarro, M., de la Cruz, J. M., & Santos, M. (2008). Generación de trayectorias y toma de decisiones para uavs. Revista iberoamericana de automática e informática Industrial, 5(1), 83-92.

[13] Departamento de informática y automática, UNED. Minería de datos: Reconocimiento de patrones, clustering II. S.esión 4.

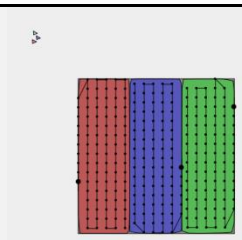
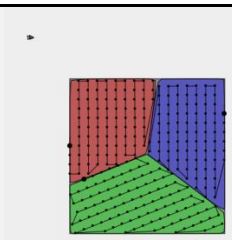
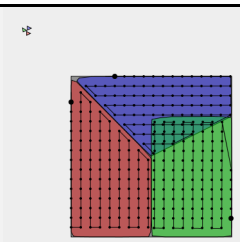
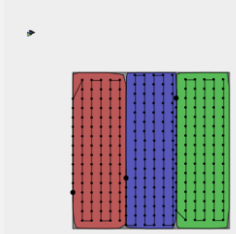
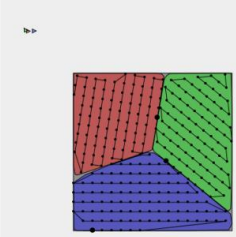
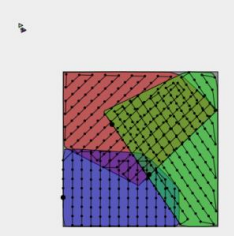
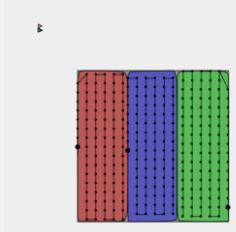
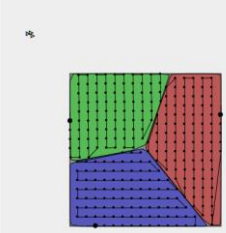
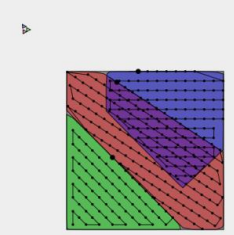
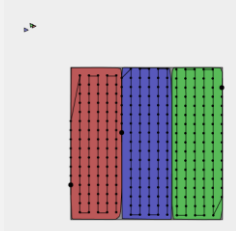
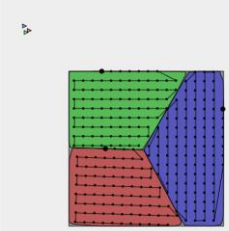
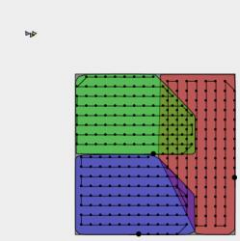
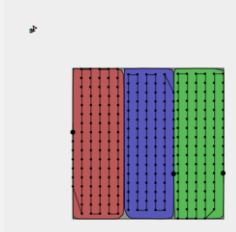
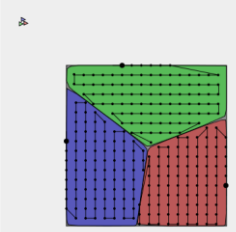
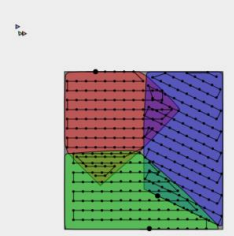
[14] Khan, A., Noreen, I., & Habib, Z. (2017). On Complete Coverage Path Planning Algorithms for Non-holonomic Mobile Robots: Survey and Challenges. J. Inf. Sci. Eng., 33, 101-121.

[15] Driscoll, Theresa Marie, "Complete coverage path planning in an agricultural environment" (2011). Graduate Theses and Dissertations. 12095.

[16] Jun M., D'Andrea R. (2003) Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Uncertain and Adversarial Environments. In: Butenko S., Murphey R., Pardalos P.M. (eds) Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms. Cooperative Systems, vol 1. Springer, Boston, MA

[17] Horváth, Ernö & Pozna, C & Precup, Radu-Emil. (2018). Robot Coverage Path Planning Based on Iterative Structured Orientation. Acta Polytechnica Hungarica. 15. 231-249. 10.12700/APH.15.1.2018.2.12.

7. Anexo: Ejecución completa de simulaciones

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

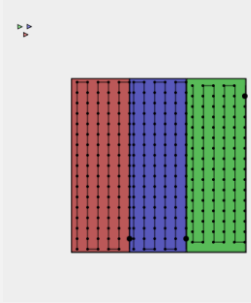
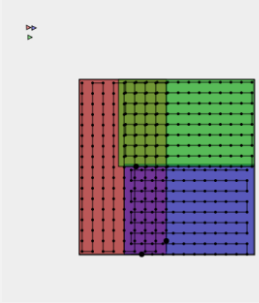
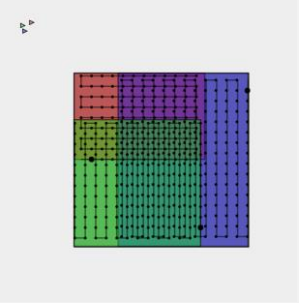
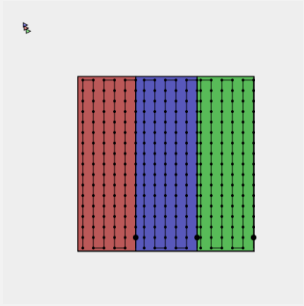
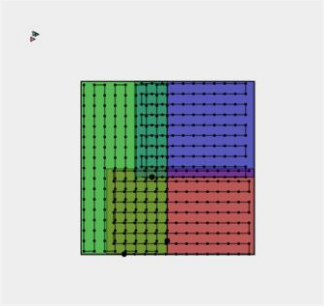
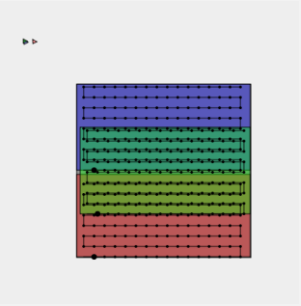
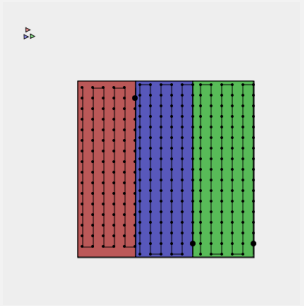
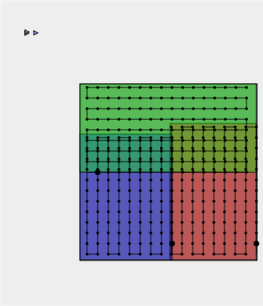
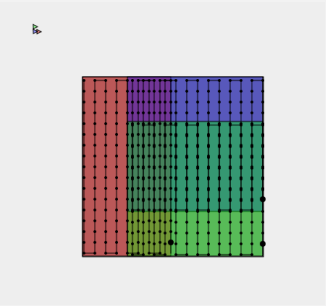
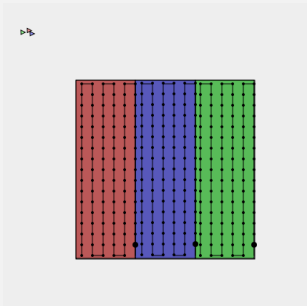
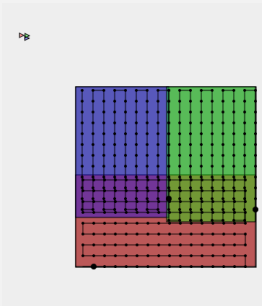
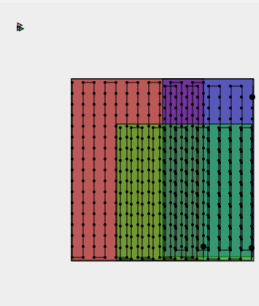
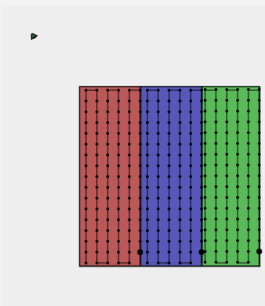
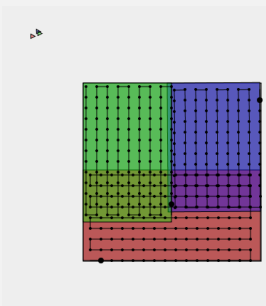
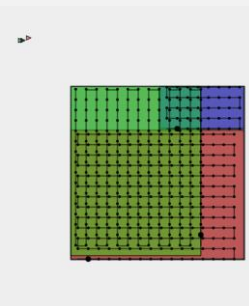
REGULAR CONVEXO
-Número de UAV: 3
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	380	393	407	407	Σ=1180 μ=393 σ=14
Iteración 2	446	423	410	446	Σ=1279 μ=426 σ=18
Iteración 3	367	375	402	402	Σ=1144 μ=381 σ=18
Iteración 4	435	395	388	435	Σ=1218 μ=406 σ=25
Iteración 5	400	369	427	427	Σ=1196 μ=399 σ=29

Método: K-Means					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	416	491	481	491	Σ=1388 μ=463 σ=41
Iteración 2	381	489	426	489	Σ=1296 μ=432 σ=54
Iteración 3	475	479	472	479	Σ=1426 μ=475 σ=4
Iteración 4	421	484	476	484	Σ=1381 μ=460 σ=34
Iteración 5	475	450	438	475	Σ=1363 μ=454 σ=19

Método: Colonia de hormigas –ACO-					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	407	413	474	474	Σ=1294 μ=431 σ=37
Iteración 2	494	479	502	502	Σ=1475 μ=492 σ=12
Iteración 3	563	510	359	563	Σ=1432 μ=477 σ=106
Iteración 4	532	510	471	532	Σ=1513 μ=504 σ=31
Iteración 5	366	548	604	604	Σ=1518 μ=506 σ=124

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	423,4
K-Means	483,6
Colonia de hormigas –ACO-	535

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

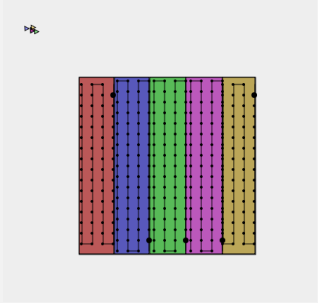
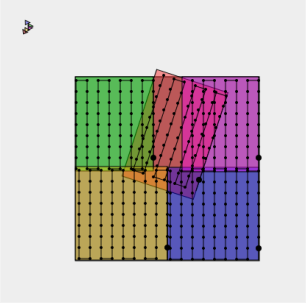
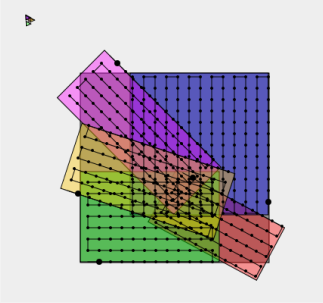
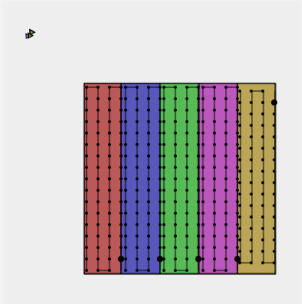
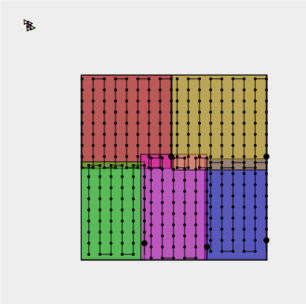
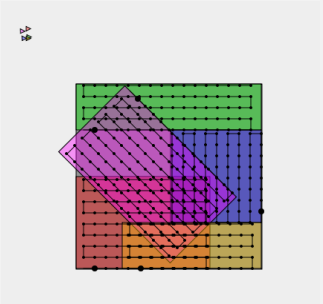
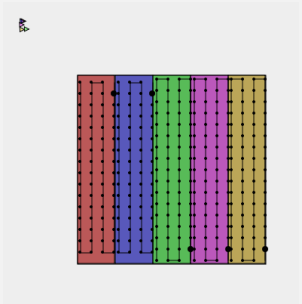
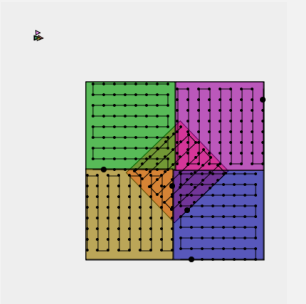
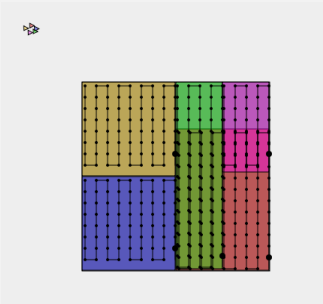
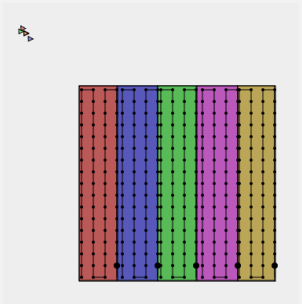
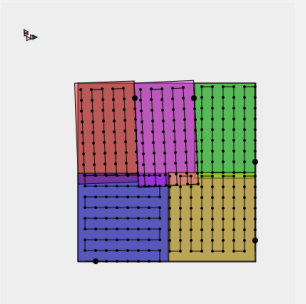
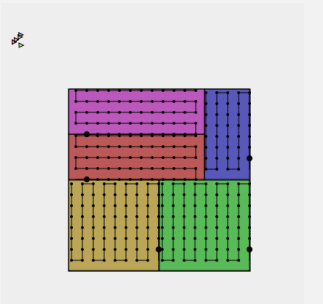
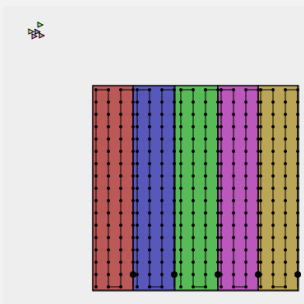
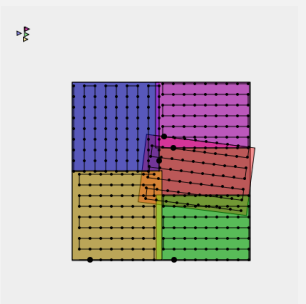
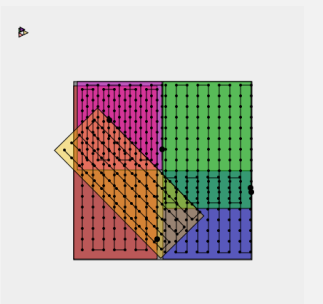
REGULAR CONVEXO
-Número de UAV: 3
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	415	425	435	435	Σ=1275 μ=425 σ=10
Iteración 2	417	424	434	434	Σ=1275 μ=425 σ=9
Iteración 3	417	425	393	425	Σ=1235 μ=412 σ=17
Iteración 4	416	424	394	424	Σ=1234 μ=411 σ=16
Iteración 5	417	425	393	425	Σ=1235 μ=412 σ=17

Método: K-Means					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	540	477	488	540	Σ=1505 μ=502 σ=34
Iteración 2	597	462	462	597	Σ=1521 μ=507 σ=78
Iteración 3	458	456	613	613	Σ=1527 μ=509 σ=90
Iteración 4	457	612	455	612	Σ=1524 μ=508 σ=90
Iteración 5	462	554	564	564	Σ=1580 μ=527 σ=56

Método: Colonia de hormigas –ACO-					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	618	613	642	642	Σ=1873 μ=624 σ=16
Iteración 2	430	454	788	788	Σ=1672 μ=557 σ=200
Iteración 3	790	609	776	790	Σ=2175 μ=725 σ=101
Iteración 4	613	642	620	642	Σ=1875 μ=625 σ=15
Iteración 5	642	540	637	642	Σ=1819 μ=606 σ=58

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	428,6
K-Means	585,2
Colonia de hormigas –ACO-	700,8

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

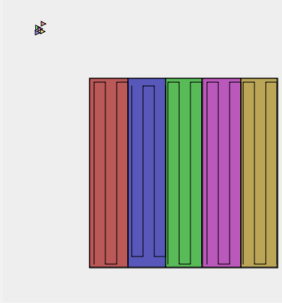
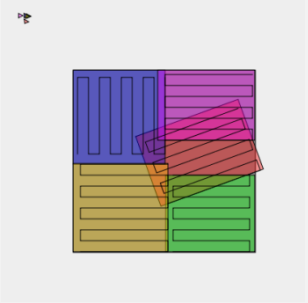
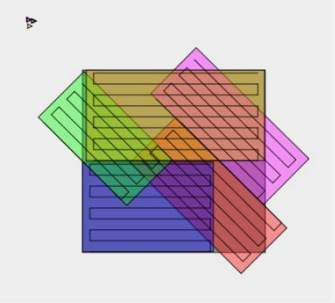
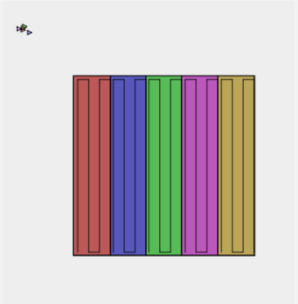
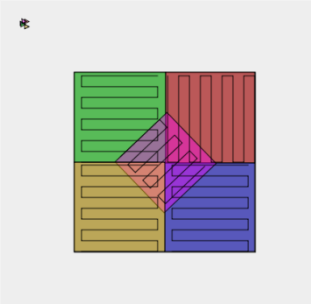
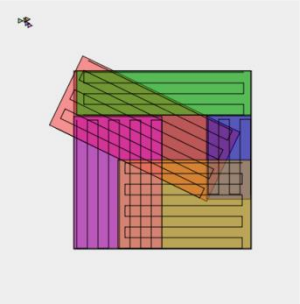
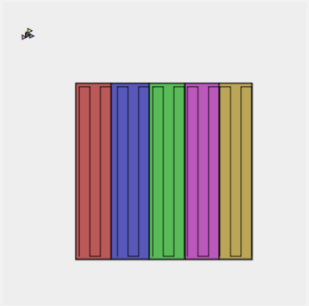
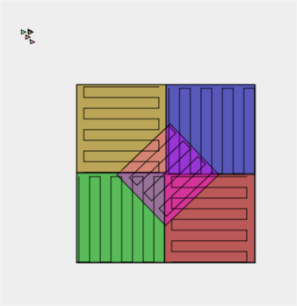
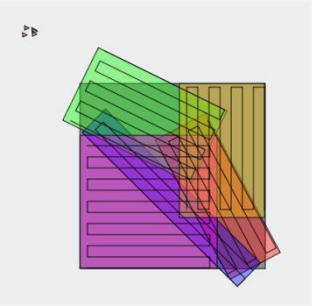
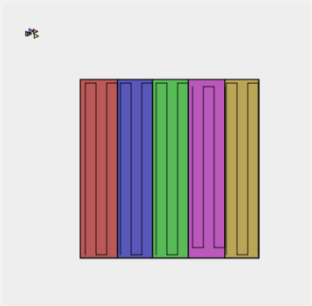
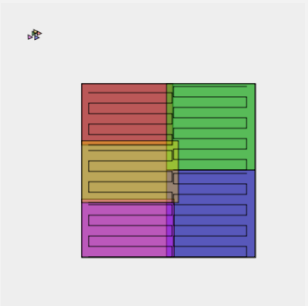
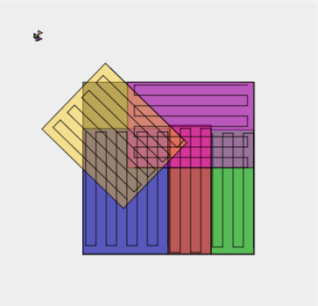
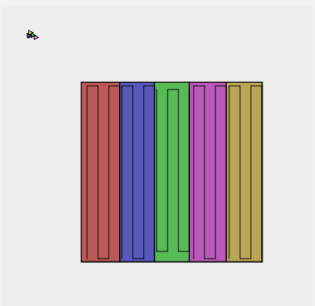
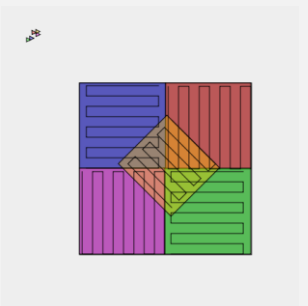
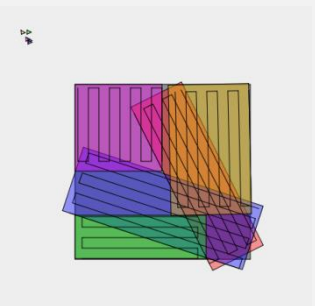
REGULAR CONVEXO
-Número de UAV: 5
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	253	287	316	290	308	316	Σ=1454 μ=291 σ=24
Iteración 2	257	250	288	277	274	288	Σ=1346 μ=269 σ=15
Iteración 3	251	291	271	271	309	309	Σ=1393 μ=279 σ=22
Iteración 4	251	315	257	308	274	315	Σ=1405 μ=281 σ=29
Iteración 5	245	292	302	314	286	314	Σ=1439 μ=288 σ=26

Método: K-Means							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	385	334	295	279	356	385	Σ=1649 μ=330 σ=43
Iteración 2	350	294	322	363	266	363	Σ=1595 μ=319 σ=40
Iteración 3	238	359	368	289	323	368	Σ=1577 μ=315 σ=53
Iteración 4	339	350	264	357	321	357	Σ=1631 μ=326 σ=37
Iteración 5	250	243	333	298	359	359	Σ=1483 μ=297 σ=51

Método: Colonia de hormigas –ACO-							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	401	211	253	323	373	401	Σ=1561 μ=312 σ=80
Iteración 2	257	359	234	208	405	405	Σ=1463 μ=293 σ=85
Iteración 3	410	362	269	453	261	453	Σ=1755 μ=351 σ=85
Iteración 4	240	487	298	364	299	487	Σ=1688 μ=338 σ=94
Iteración 5	306	389	281	421	377	421	Σ=1774 μ=355 σ=59

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	308,4
K-Means	366,4
Colonia de hormigas –ACO-	433,4

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

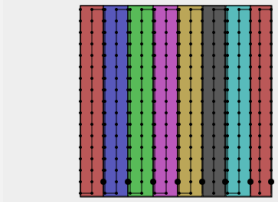
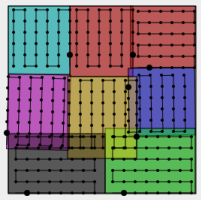
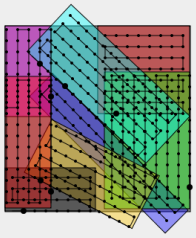
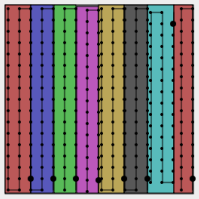
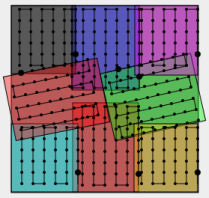
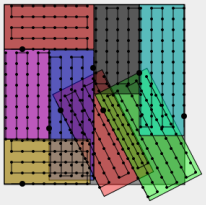
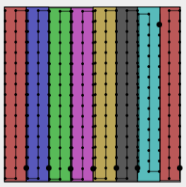
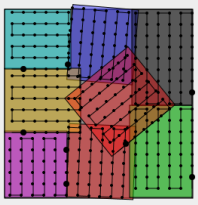
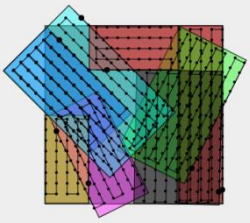
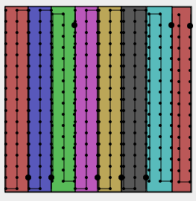
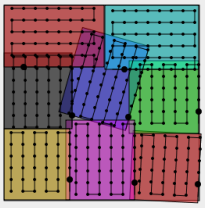
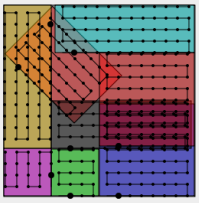
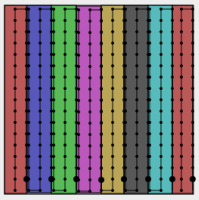
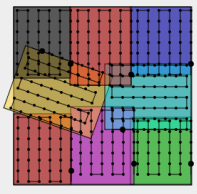
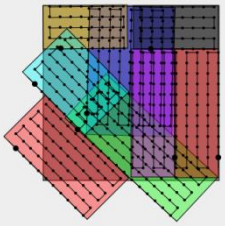
REGULAR CONVEXO
-Número de UAV: 5
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	295	299	305	310	283	310	Σ=1492 μ=298 σ=10
Iteración 2	244	300	304	309	318	318	Σ=1475 μ=295 σ=29
Iteración 3	294	299	305	311	317	317	Σ=1526 μ=305 σ=9
Iteración 4	244	299	304	310	316	316	Σ=1473 μ=295 σ=29
Iteración 5	294	298	304	312	283	312	Σ=1491 μ=298 σ=11

Método: K-Means							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	357	382	356	283	239	382	Σ=1617 μ=323 σ=60
Iteración 2	348	290	337	361	396	396	Σ=1732 μ=346 σ=39
Iteración 3	332	381	240	355	335	381	Σ=1643 μ=329 σ=53
Iteración 4	398	360	283	268	380	398	Σ=1689 μ=338 σ=59
Iteración 5	335	269	255	239	398	398	Σ=1496 μ=299 σ=66

Método: Colonia de hormigas –ACO-							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	261	568	369	305	330	568	Σ=1833 μ=367 σ=119
Iteración 2	124	460	438	302	496	496	Σ=1820 μ=364 σ=153
Iteración 3	337	462	432	351	389	462	Σ=1971 μ=394 σ=53
Iteración 4	457	635	433	199	368	635	Σ=2092 μ=418 σ=158
Iteración 5	459	643	323	196	352	643	Σ=1973 μ=395 σ=168

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	314,6
K-Means	391
Colonia de hormigas –ACO-	560,8

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

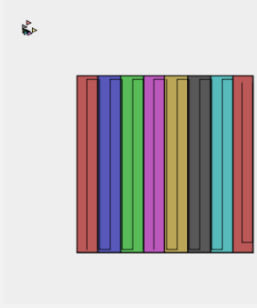
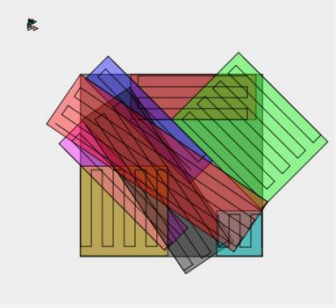
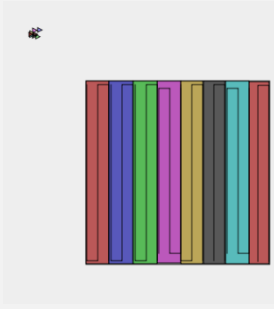
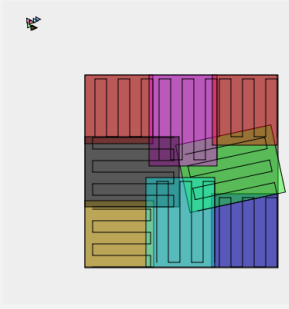
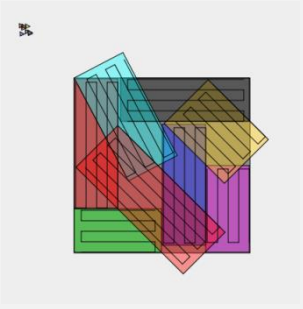
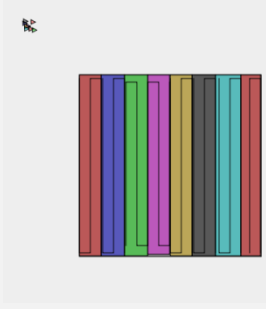
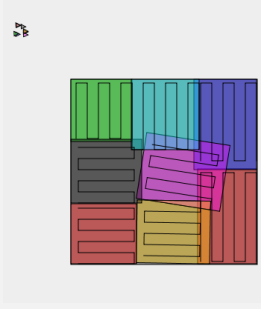
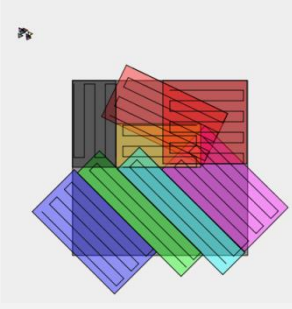
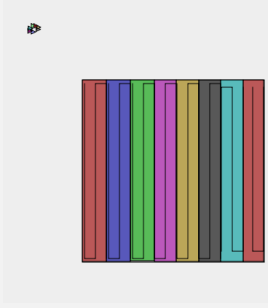
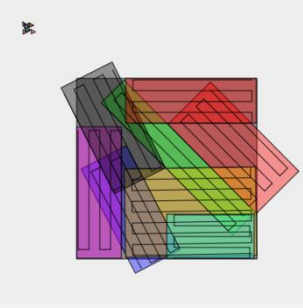
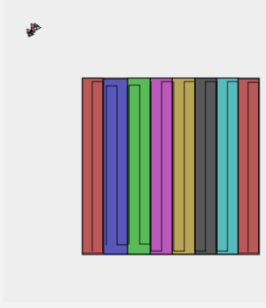
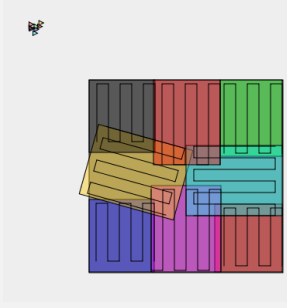
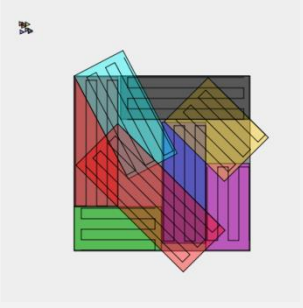
REGULAR CONVEXO
-Número de UAV: 8
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	217	185	197	250	150	151	244	184	250	Σ=1578 μ=197 σ=38
Iteración 2	132	182	198	202	199	268	213	177	268	Σ=1571 μ=196 σ=38
Iteración 3	178	211	224	266	211	274	254	212	274	Σ=1830 μ=229 σ=33
Iteración 4	187	193	258	255	199	201	217	189	258	Σ=1699 μ=212 σ=29
Iteración 5	189	250	133	199	240	230	252	180	252	Σ=1673 μ=209 σ=41

Método: K-Means										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	265	250	220	212	238	270	202	264	270	Σ=1921 μ=240 σ=26
Iteración 2	226	230	219	260	212	241	237	281	281	Σ=1906 μ=238 σ=23
Iteración 3	222	222	240	233	186	238	264	219	264	Σ=1824 μ=228 σ=22
Iteración 4	196	244	253	216	260	241	198	223	260	Σ=1831 μ=229 σ=24
Iteración 5	237	245	235	192	246	214	260	247	260	Σ=1876 μ=235 σ=22

Método: Colonia de hormigas –ACO-										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	306	303	230	337	298	127	298	254	337	Σ=2153 μ=269 σ=66
Iteración 2	207	237	350	247	287	158	359	187	359	Σ=2032 μ=254 σ=73
Iteración 3	173	301	274	278	356	244	145	298	356	Σ=2069 μ=259 σ=70
Iteración 4	247	223	257	224	153	192	202	322	322	Σ=1820 μ=228 σ=50
Iteración 5	246	267	237	221	252	241	271	213	271	Σ=1948 μ=244 σ=20

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	260,4
K-Means	267
Colonia de hormigas –ACO-	329

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

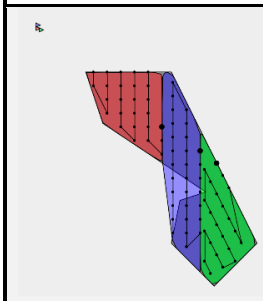
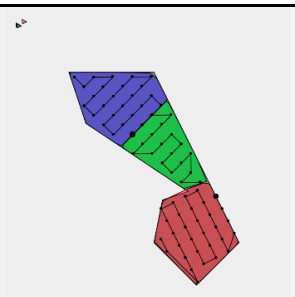
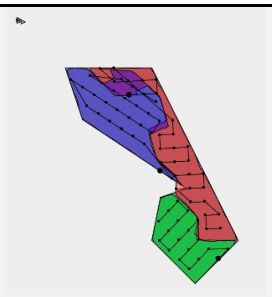
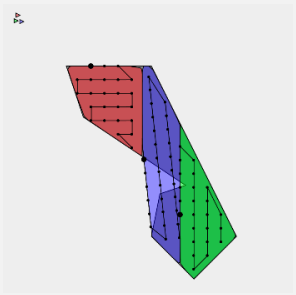
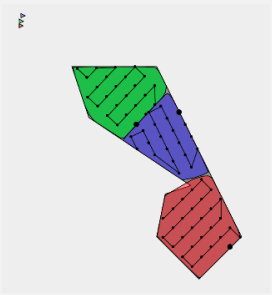
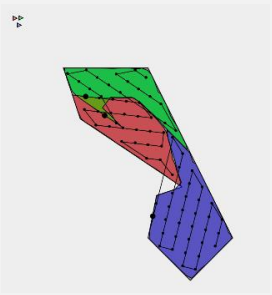
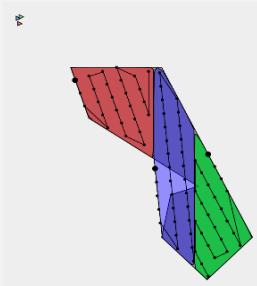
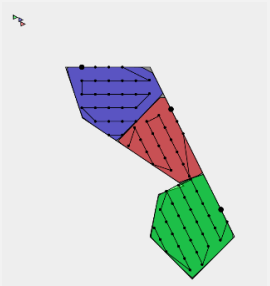
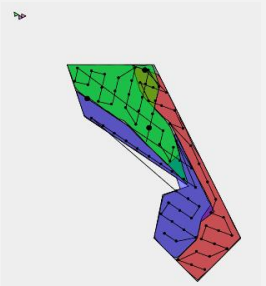
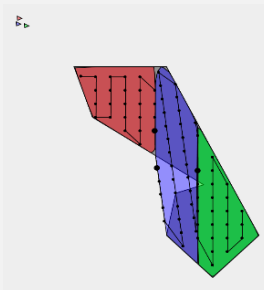
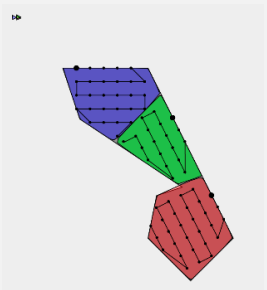
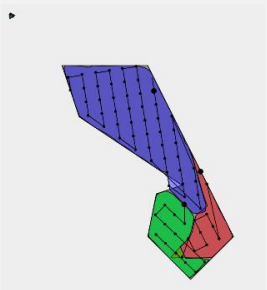
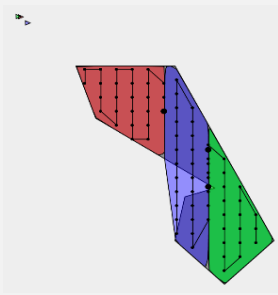
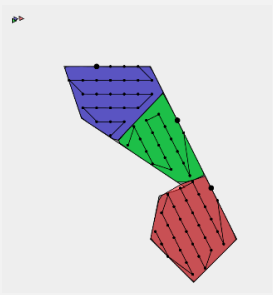
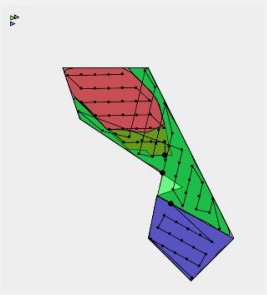
REGULAR CONVEXO
-Número de UAV: 8
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	236	239	197	242	247	252	255	200	255	Σ=1868 μ=234 σ=23
Iteración 2	235	236	240	243	209	251	253	201	253	Σ=1868 μ=234 σ=19
Iteración 3	235	236	239	243	246	250	255	200	255	Σ=1904 μ=238 σ=17
Iteración 4	235	236	240	244	246	250	256	169	256	Σ=1876 μ=235 σ=27
Iteración 5	236	237	239	243	246	249	254	200	254	Σ=1904 μ=238 σ=17

Método: K-Means										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	229	215	293	245	237	204	248	191	293	Σ=1862 μ=233 σ=31
Iteración 2	227	218	201	248	183	230	298	293	298	Σ=1898 μ=237 σ=41
Iteración 3	221	220	236	216	233	190	243	230	243	Σ=1789 μ=224 σ=16
Iteración 4	178	237	233	204	215	230	251	219	251	Σ=1767 μ=221 σ=23
Iteración 5	247	312	216	229	226	218	237	238	312	Σ=1923 μ=240 σ=31

Método: Colonia de hormigas –ACO-										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	245	290	198	344	325	172	219	286	344	Σ=2079 μ=260 σ=61
Iteración 2	240	226	313	313	183	179	322	328	328	Σ=2104 μ=263 σ=63
Iteración 3	337	260	359	286	161	332	386	218	386	Σ=2339 μ=292 σ=76
Iteración 4	301	183	296	468	129	285	191	226	468	Σ=2079 μ=260 σ=104
Iteración 5	252	239	287	286	238	222	316	200	316	Σ=2040 μ=255 σ=38

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	254,6
K-Means	279,4
Colonia de hormigas –ACO-	368,4

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

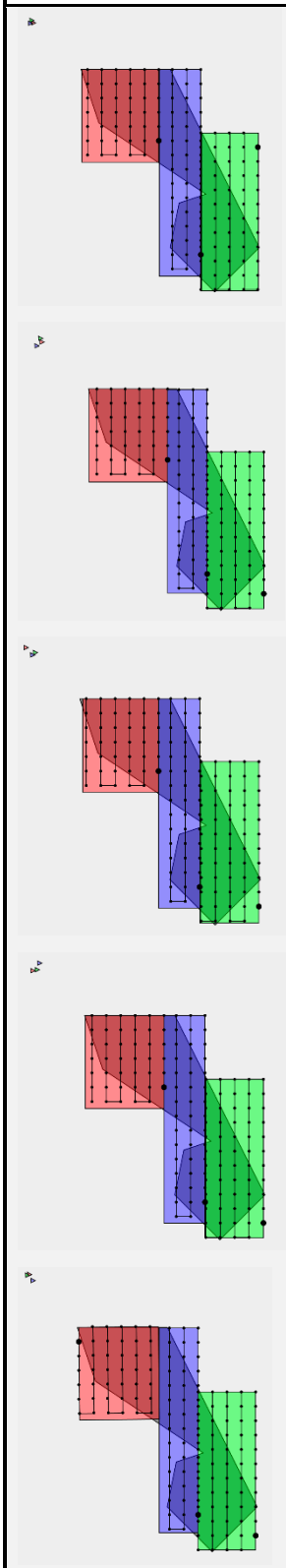
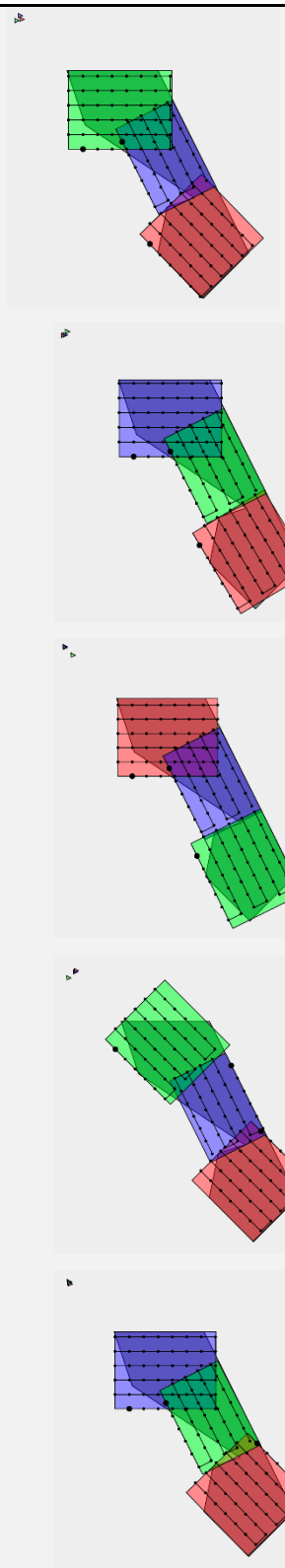
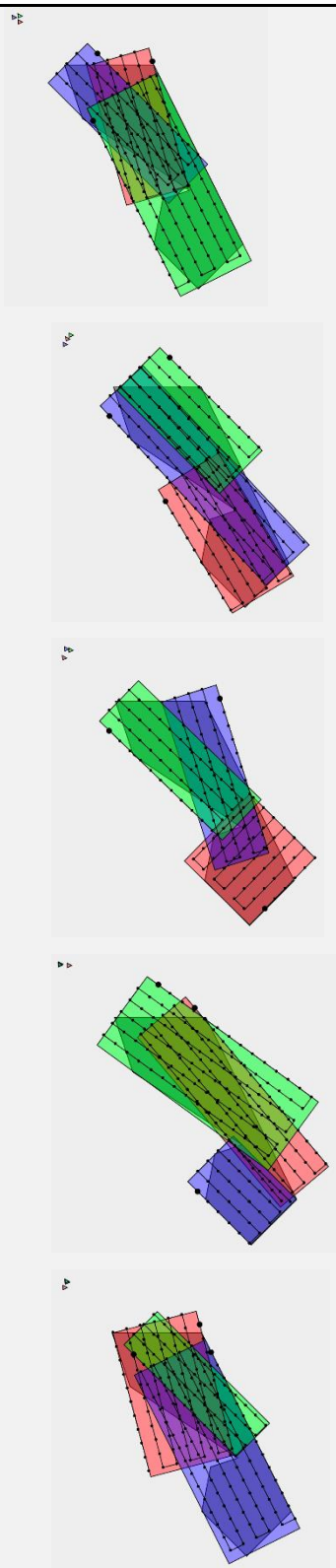
REGULAR NO CONVEXO (COMPACTO)
-Número de UAV: 3
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	206	201	247	247	Σ=654 μ=218 σ=25
Iteración 2	200	204	206	206	Σ=610 μ=203 σ=3
Iteración 3	200	201	217	217	Σ=618 μ=206 σ=10
Iteración 4	190	214	219	219	Σ=623 μ=208 σ=16
Iteración 5	227	269	210	269	Σ=706 μ=235 σ=30

Método: K-Means					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	249	231	208	249	Σ=688 μ=229 σ=21
Iteración 2	277	176	227	277	Σ=680 μ=227 σ=51
Iteración 3	168	213	252	252	Σ=633 μ=211 σ=42
Iteración 4	238	211	167	238	Σ=616 μ=205 σ=36
Iteración 5	249	177	168	249	Σ=594 μ=198 σ=44

Método: Colonia de hormigas –ACO-					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	317	234	242	317	Σ=793 μ=264 σ=46
Iteración 2	172	297	175	297	Σ=644 μ=215 σ=71
Iteración 3	232	262	304	304	Σ=798 μ=266 σ=36
Iteración 4	158	353	158	353	Σ=669 μ=223 σ=113
Iteración 5	253	193	386	386	Σ=832 μ=277 σ=99

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	231,6
K-Means	253
Colonia de hormigas –ACO-	331,4

Número de UAV: 3 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

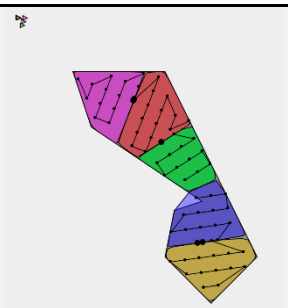
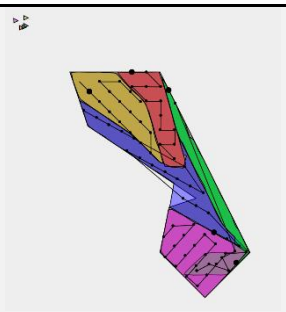
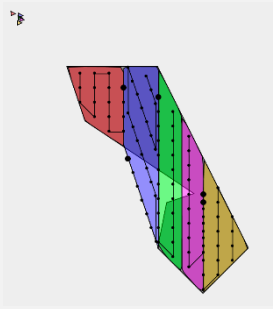
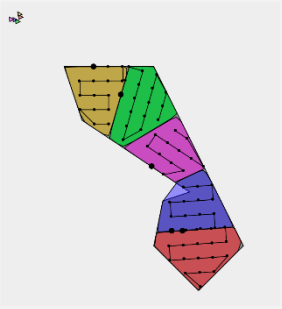
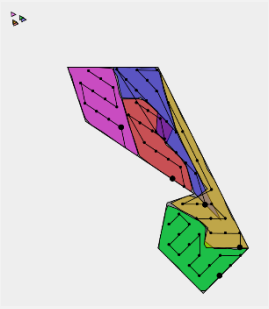
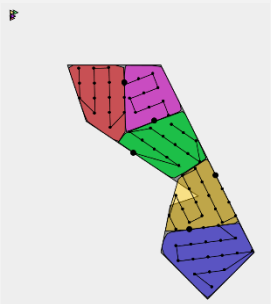
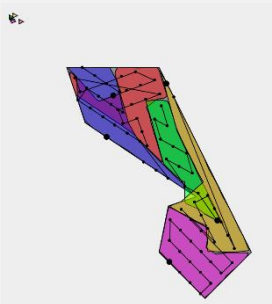
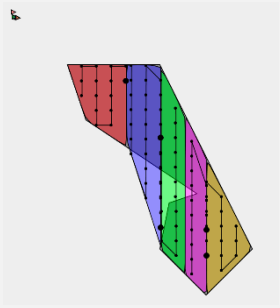
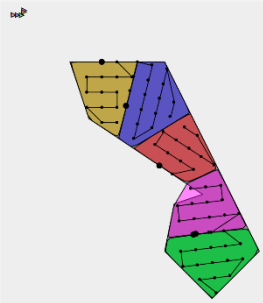
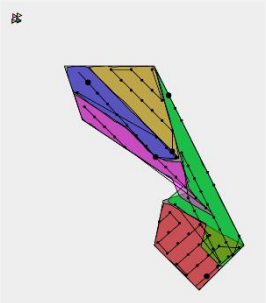
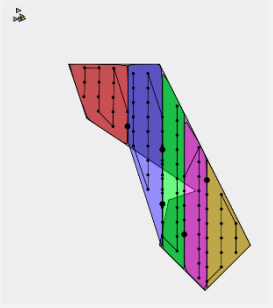
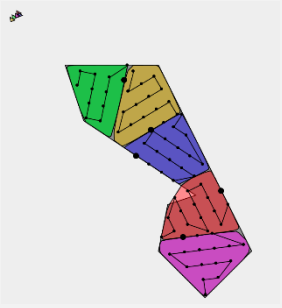
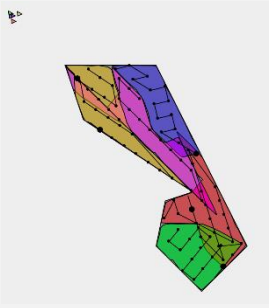
REGULAR NO CONVEXO (COMPACTO)
-Número de UAV: 3
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	259	279	342	342	Σ=880 μ=293 σ=43
Iteración 2	259	279	350	350	Σ=888 μ=296 σ=48
Iteración 3	260	278	368	368	Σ=906 μ=302 σ=58
Iteración 4	259	280	369	369	Σ=908 μ=303 σ=58
Iteración 5	252	272	371	371	Σ=895 μ=298 σ=64

Método: K-Means					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	322	236	271	322	Σ=829 μ=276 σ=43
Iteración 2	311	270	235	311	Σ=816 μ=272 σ=38
Iteración 3	273	237	307	307	Σ=817 μ=272 σ=35
Iteración 4	271	219	275	275	Σ=765 μ=255 σ=31
Iteración 5	270	271	235	271	Σ=776 μ=259 σ=21

Método: Colonia de hormigas –ACO-					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	288	235	468	468	Σ=991 μ=330 σ=122
Iteración 2	293	442	275	442	Σ=1010 μ=337 σ=92
Iteración 3	372	274	269	372	Σ=915 μ=305 σ=58
Iteración 4	383	272	421	421	Σ=1076 μ=359 σ=77
Iteración 5	297	431	427	431	Σ=1155 μ=385 σ=76

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	360
K-Means	297,2
Colonia de hormigas –ACO-	426,8

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: NO**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

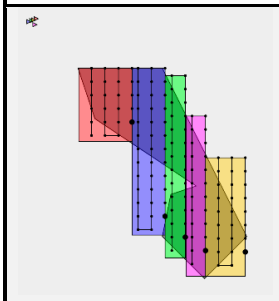
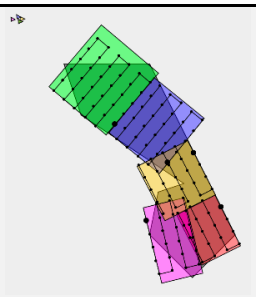
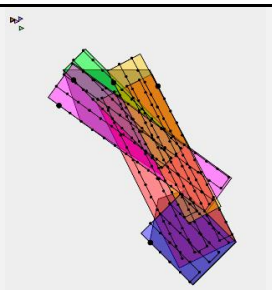
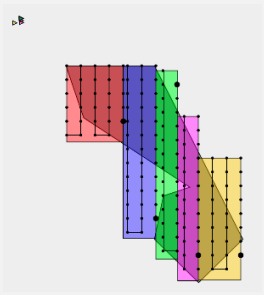
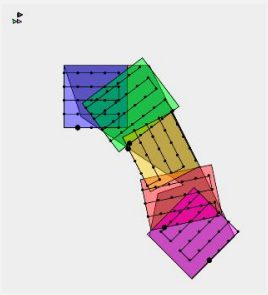
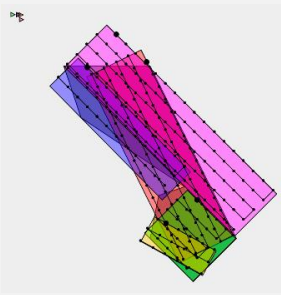
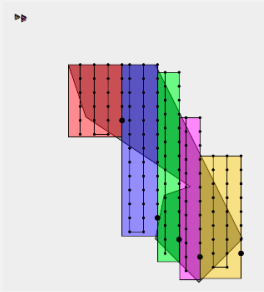
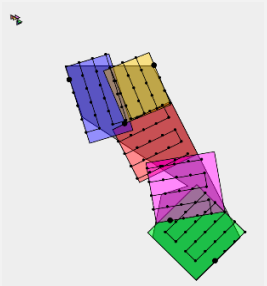
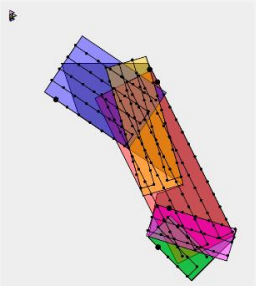
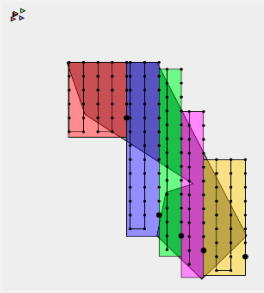
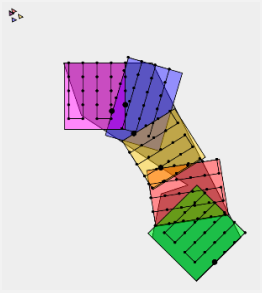
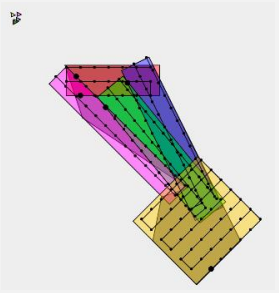
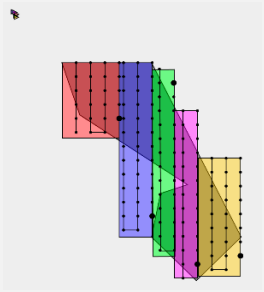
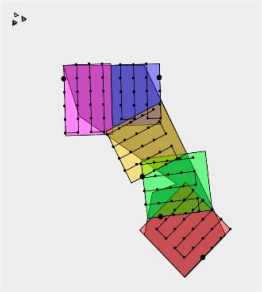
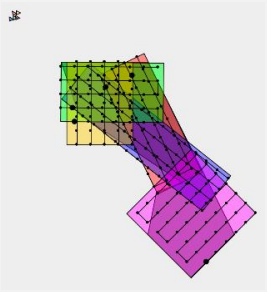
REGULAR NO CONVEXO (COMPACTO)
-Número de UAV: 5
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	124	238	137	149	168	238	Σ=816 μ=163 σ=45
Iteración 2	128	198	147	140	178	198	Σ=791 μ=158 σ=29
Iteración 3	125	180	148	149	151	180	Σ=753 μ=151 σ=20
Iteración 4	150	242	142	179	184	242	Σ=897 μ=179 σ=39
Iteración 5	170	222	139	167	172	222	Σ=870 μ=174 σ=30

Método: K-Means							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	165	181	148	150	198	198	Σ=842 μ=168 σ=21
Iteración 2	201	172	144	154	151	201	Σ=822 μ=164 σ=23
Iteración 3	123	205	145	135	174	205	Σ=782 μ=156 σ=33
Iteración 4	153	150	198	174	115	198	Σ=790 μ=158 σ=31
Iteración 5	176	172	133	200	179	200	Σ=860 μ=172 σ=24

Método: Colonia de hormigas –ACO-							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	126	222	129	244	112	244	Σ=833 μ=167 σ=61
Iteración 2	151	203	223	130	227	227	Σ=934 μ=187 σ=44
Iteración 3	185	160	188	214	164	214	Σ=911 μ=182 σ=22
Iteración 4	247	105	208	129	156	247	Σ=845 μ=169 σ=58
Iteración 5	211	200	219	143	159	219	Σ=932 μ=186 σ=33

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	216
K-Means	200,4
Colonia de hormigas –ACO-	230,2

Número de UAV: 5 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: SÍ**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

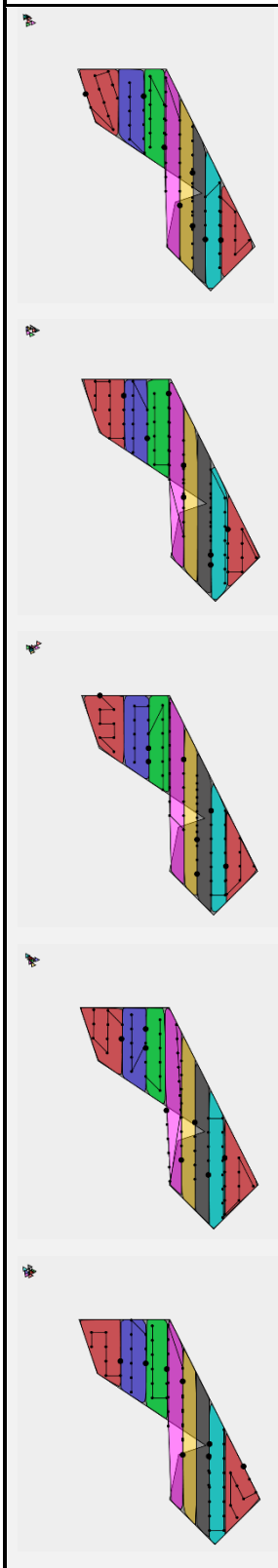
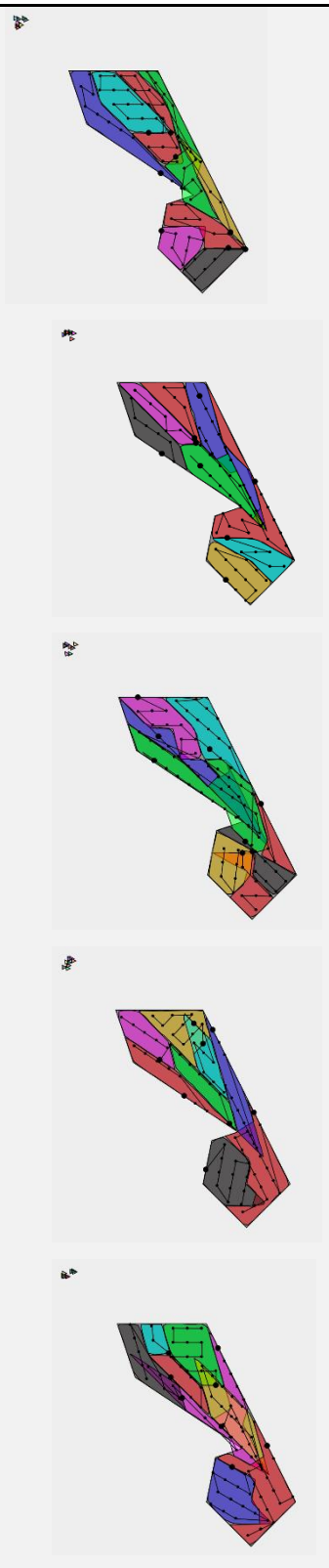
REGULAR NO CONVEXO (COMPACTO)
-Número de UAV: 5
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	164	245	202	191	220	245	Σ=1022 μ=204 σ=30
Iteración 2	195	244	166	190	263	263	Σ=1058 μ=212 σ=40
Iteración 3	163	245	201	192	220	245	Σ=1021 μ=204 σ=31
Iteración 4	197	243	201	192	221	243	Σ=1054 μ=211 σ=21
Iteración 5	166	245	166	203	219	245	Σ=999 μ=200 σ=34

Método: K-Means							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	178	243	259	207	190	259	Σ=1077 μ=215 σ=35
Iteración 2	209	169	227	251	203	251	Σ=1059 μ=212 σ=30
Iteración 3	204	159	251	219	142	251	Σ=975 μ=195 σ=44
Iteración 4	239	176	253	175	206	253	Σ=1049 μ=210 σ=36
Iteración 5	254	150	216	156	213	254	Σ=989 μ=198 σ=44

Método: Colonia de hormigas –ACO-							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	353	254	179	320	214	353	Σ=1320 μ=264 σ=72
Iteración 2	386	179	201	415	157	415	Σ=1338 μ=268 σ=123
Iteración 3	353	247	165	168	223	353	Σ=1156 μ=231 σ=77
Iteración 4	126	204	204	130	374	374	Σ=1038 μ=208 σ=100
Iteración 5	238	306	258	371	207	371	Σ=1380 μ=276 σ=64

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	248,2
K-Means	253,6
Colonia de hormigas –ACO-	373,2

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: NO**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

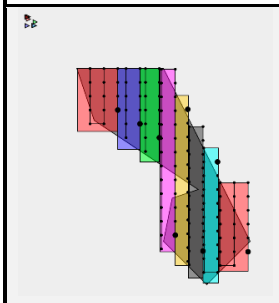
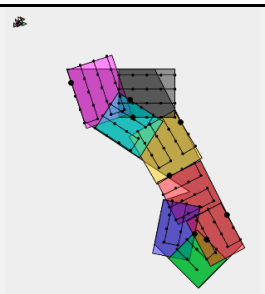
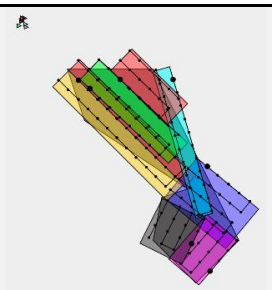
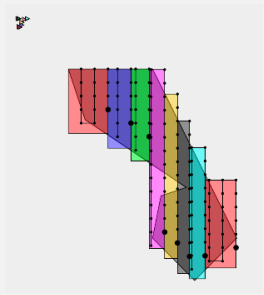
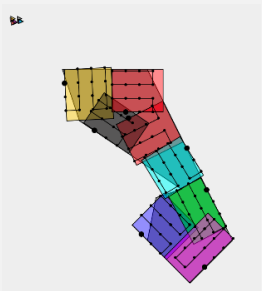
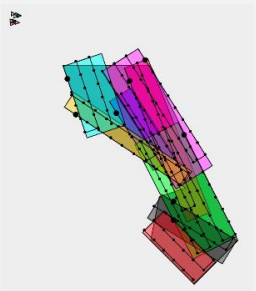
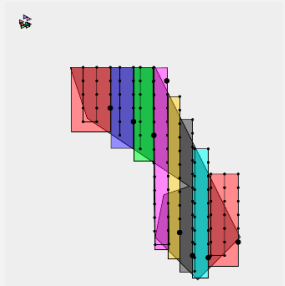
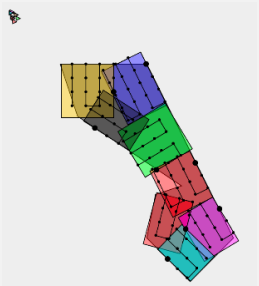
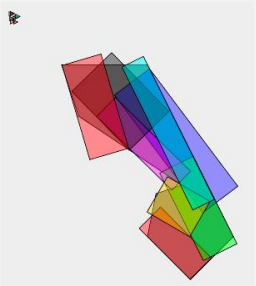
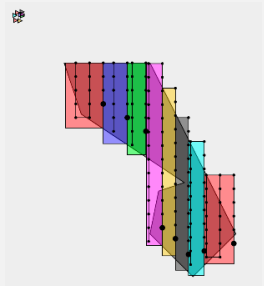
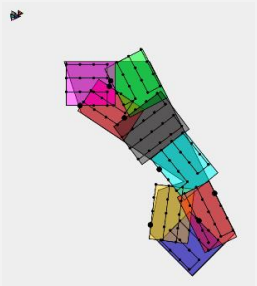
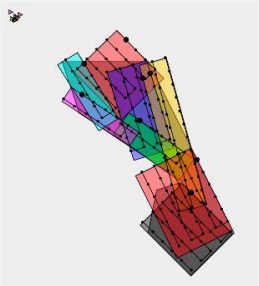
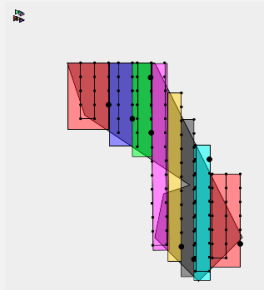
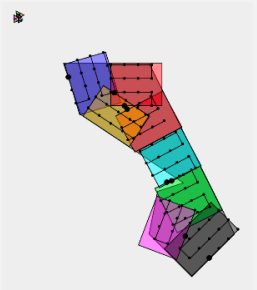
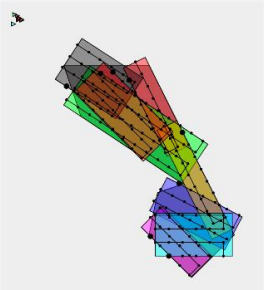
REGULAR NO CONVEXO (COMPACTO)
-Número de UAV: 8
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	89	91	133	176	193	130	153	158	193	Σ=1123 μ=140 σ=37
Iteración 2	96	122	100	131	107	130	164	142	164	Σ=992 μ=124 σ=23
Iteración 3	109	110	117	123	133	114	141	149	149	Σ=996 μ=125 σ=15
Iteración 4	123	79	91	149	124	87	155	153	155	Σ=961 μ=120 σ=31
Iteración 5	83	113	91	171	77	85	147	131	171	Σ=898 μ=112 σ=34

Método: K-Means										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	109	121	124	145	145	128	134	125	145	Σ=1031 μ=129 σ=12
Iteración 2	160	109	118	109	126	154	134	145	160	Σ=1055 μ=132 σ=20
Iteración 3	176	143	102	134	148	107	85	145	176	Σ=1040 μ=130 σ=30
Iteración 4	171	100	102	132	126	140	106	132	171	Σ=1009 μ=126 σ=24
Iteración 5	164	127	123	99	101	162	149	132	164	Σ=1057 μ=132 σ=25

Método: Colonia de hormigas –ACO-										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	198	147	198	140	140	162	147	167	198	Σ=1299 μ=162 σ=24
Iteración 2	160	125	102	162	87	154	87	116	162	Σ=993 μ=124 σ=31
Iteración 3	128	112	196	140	156	111	124	102	196	Σ=1069 μ=134 σ=31
Iteración 4	167	113	105	85	142	175	95	100	175	Σ=982 μ=123 σ=34
Iteración 5	84	159	170	200	148	108	70	156	200	Σ=1095 μ=137 σ=45

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	166,4
K-Means	163,2
Colonia de hormigas –ACO-	186,2

Número de UAV: 8 – Escenario: REGULAR NO CONVEXO **– Suavizado: SÍ**		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

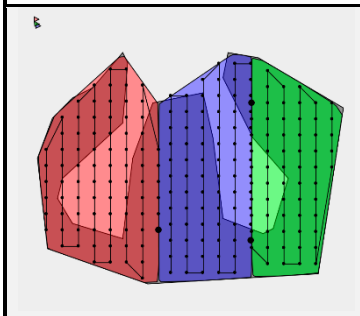
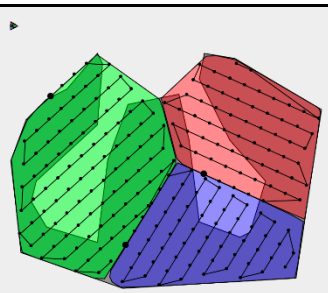
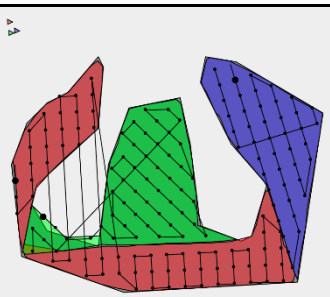
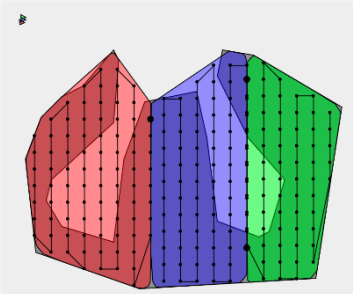
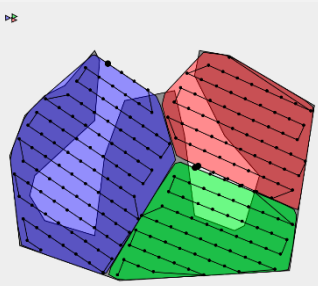
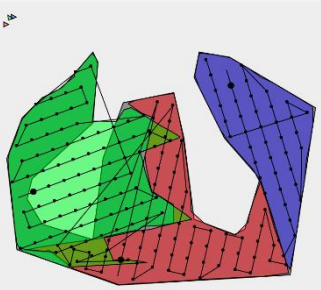
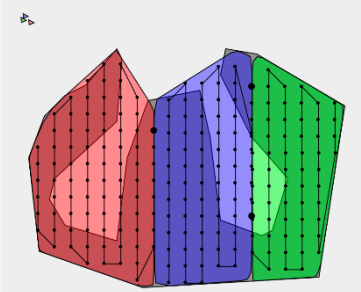
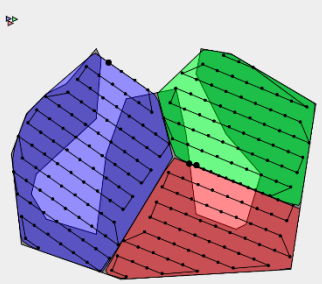
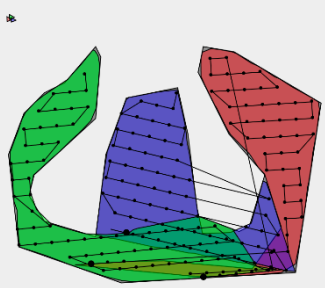
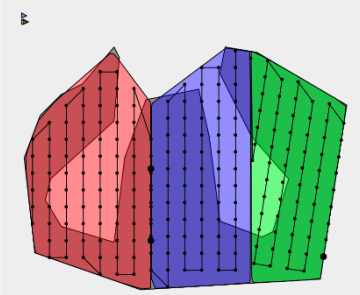
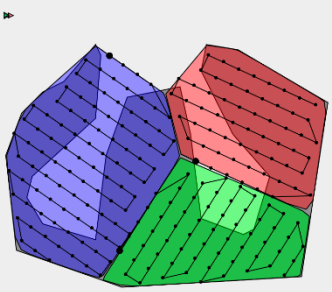
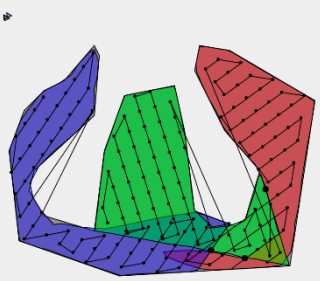
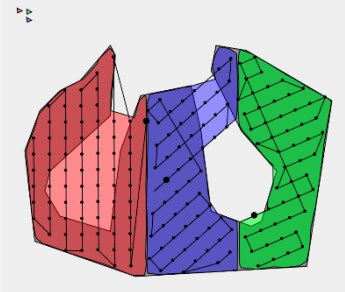
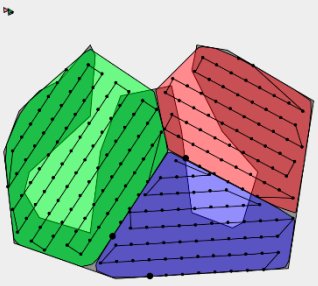
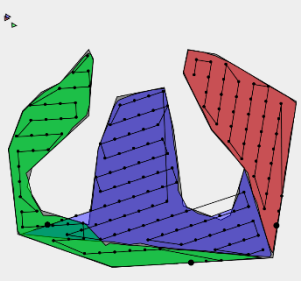
REGULAR NO CONVEXO (COMPACTO)
-Número de UAV: 8
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	115	101	115	196	103	183	151	196	196	Σ=1160 μ=145 σ=42
Iteración 2	115	102	118	197	135	138	178	194	197	Σ=1177 μ=147 σ=37
Iteración 3	115	103	116	163	126	134	177	192	192	Σ=1126 μ=141 σ=33
Iteración 4	114	102	116	197	133	137	179	195	197	Σ=1173 μ=147 σ=38
Iteración 5	113	101	118	167	135	153	194	136	194	Σ=1117 μ=140 σ=31

Método: K-Means										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	166	168	127	144	137	143	119	139	168	Σ=1143 μ=143 σ=17
Iteración 2	150	187	145	189	126	115	144	126	189	Σ=1182 μ=148 σ=27
Iteración 3	168	140	141	126	115	159	149	168	168	Σ=1166 μ=146 σ=19
Iteración 4	91	162	143	118	175	166	174	148	175	Σ=1177 μ=147 σ=30
Iteración 5	125	127	171	170	105	189	172	125	189	Σ=1184 μ=148 σ=31

Método: Colonia de hormigas –ACO-										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	135	182	161	190	122	196	146	131	196	Σ=1263 μ=158 σ=29
Iteración 2	148	103	237	219	140	128	118	157	237	Σ=1250 μ=156 σ=48
Iteración 3	154	241	123	176	126	209	149	143	241	Σ=1321 μ=165 σ=41
Iteración 4	158	175	96	83	209	218	74	234	234	Σ=1247 μ=156 σ=64
Iteración 5	117	161	224	174	133	173	201	177	224	Σ=1360 μ=170 σ=34

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	195,2
K-Means	177,8
Colonia de hormigas –ACO-	226,4

Número de UAV: 3 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

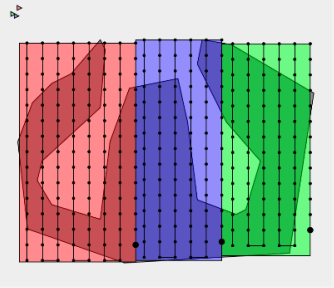
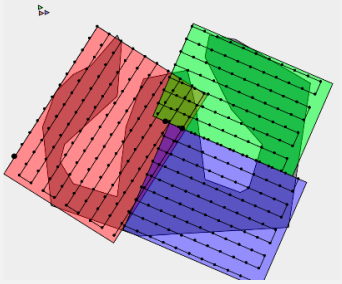
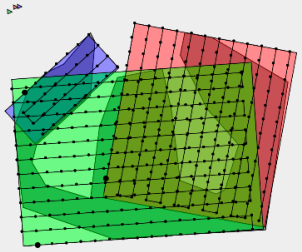
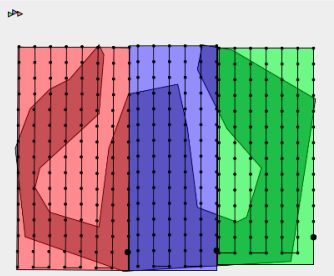
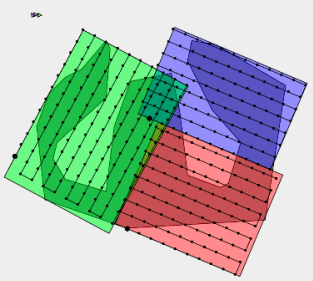
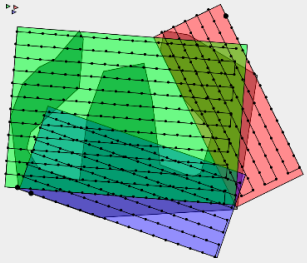
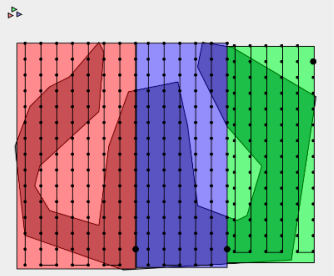
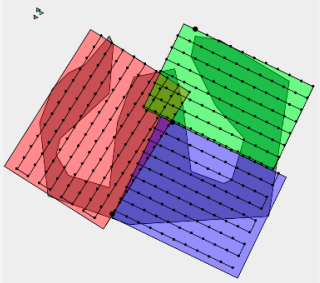
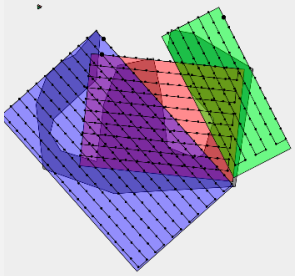
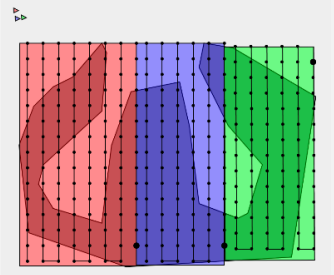
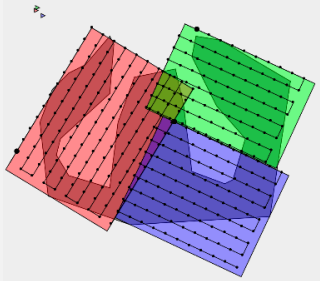
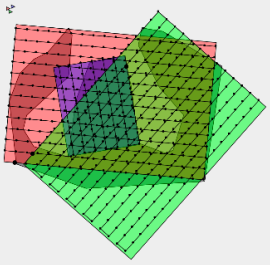
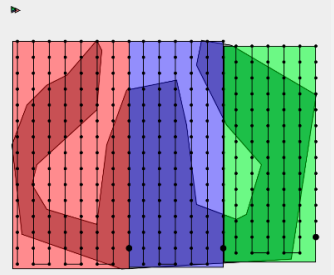
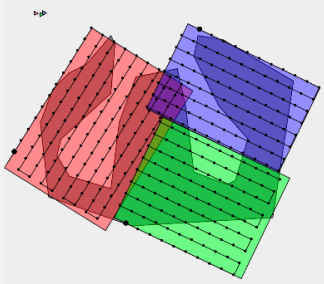
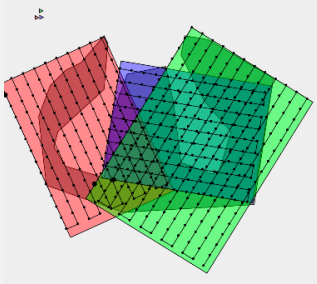
IRREGULAR
-Número de UAV: 3
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	509	459	404	509	Σ=1372 μ=457 σ=53
Iteración 2	453	461	411	461	Σ=1325 μ=442 σ=27
Iteración 3	445	446	400	446	Σ=1291 μ=430 σ=26
Iteración 4	499	395	465	499	Σ=1359 μ=453 σ=53
Iteración 5	498	474	433	498	Σ=1405 μ=468 σ=33

Método: K-Means					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	427	401	561	561	Σ=1389 μ=463 σ=86
Iteración 2	434	523	381	523	Σ=1338 μ=446 σ=72
Iteración 3	388	514	429	514	Σ=1331 μ=444 σ=64
Iteración 4	384	521	421	521	Σ=1326 μ=442 σ=71
Iteración 5	406	416	547	547	Σ=1369 μ=456 σ=79

Método: Colonia de hormigas –ACO-					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	637	337	438	637	Σ=1412 μ=471 σ=153
Iteración 2	576	333	605	605	Σ=1514 μ=505 σ=149
Iteración 3	472	495	473	495	Σ=1440 μ=480 σ=13
Iteración 4	493	541	462	541	Σ=1496 μ=499 σ=40
Iteración 5	393	584	396	584	Σ=1373 μ=458 σ=109

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	482,6
K-Means	533,2
Colonia de hormigas –ACO-	572,4

Número de UAV: 3 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos Clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

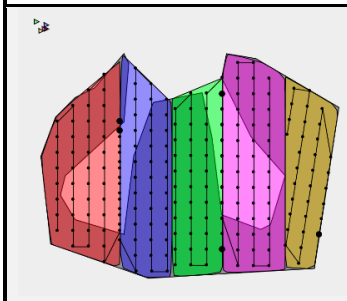
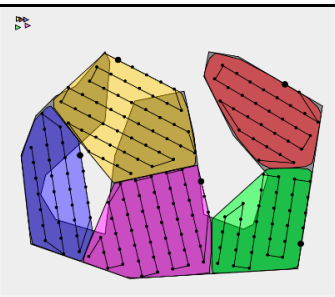
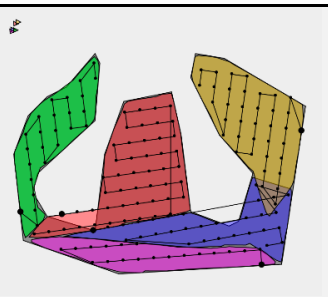
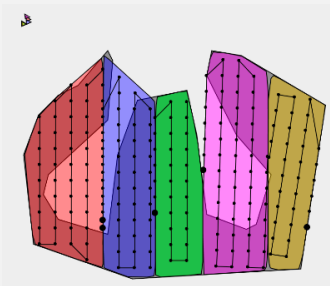
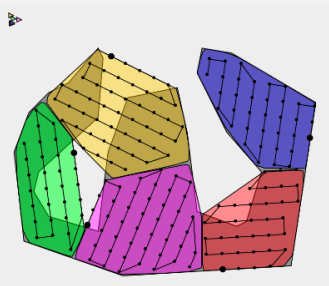
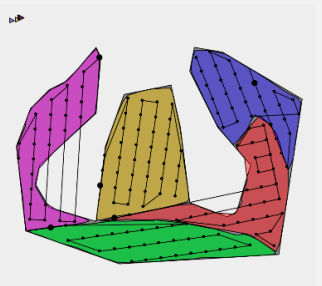
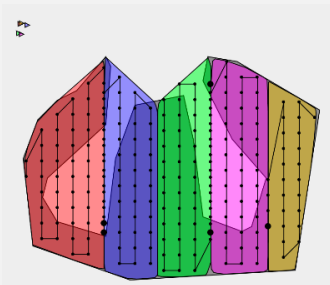
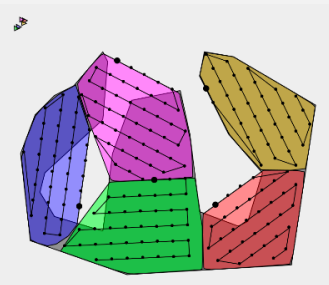
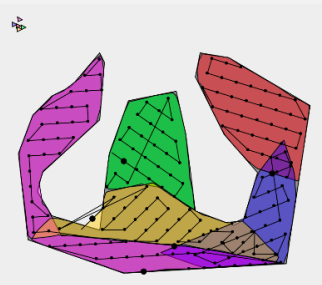
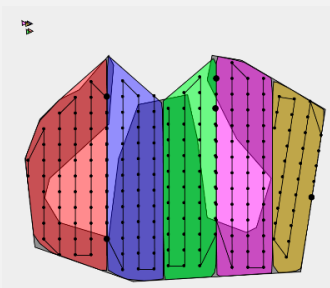
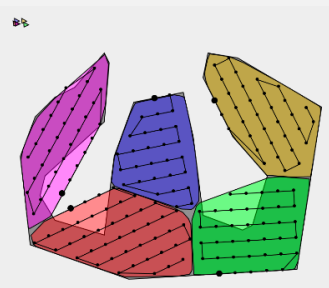
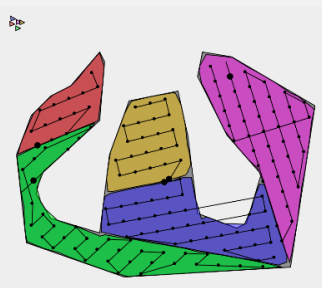
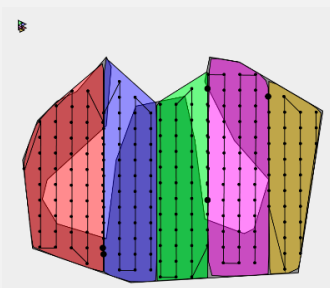
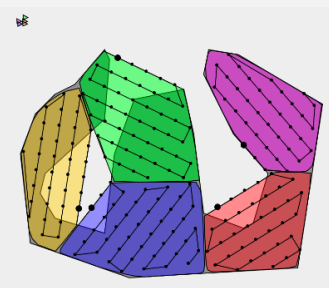
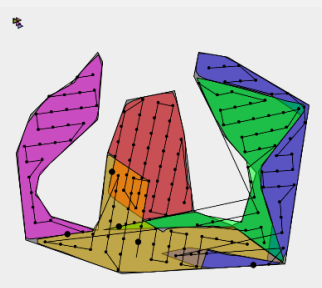
IRREGULAR
-Número de UAV: 3
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	607	481	473	607	Σ=1561 μ=520 σ=75
Iteración 2	646	482	537	646	Σ=1665 μ=555 σ=83
Iteración 3	606	482	452	606	Σ=1540 μ=513 σ=82
Iteración 4	607	481	450	607	Σ=1538 μ=513 σ=83
Iteración 5	605	482	473	605	Σ=1560 μ=520 σ=74

Método: K-Means					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	678	505	515	678	Σ=1698 μ=566 σ=97
Iteración 2	593	546	680	680	Σ=1819 μ=606 σ=68
Iteración 3	645	508	480	645	Σ=1633 μ=544 σ=88
Iteración 4	680	506	450	680	Σ=1636 μ=545 σ=120
Iteración 5	624	480	590	624	Σ=1694 μ=565 σ=75

Método: Colonia de hormigas –ACO-					
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	816	196	985	985	Σ=1997 μ=666 σ=415
Iteración 2	478	629	1187	1187	Σ=2294 μ=765 σ=373
Iteración 3	655	1019	453	1019	Σ=2127 μ=709 σ=287
Iteración 4	1238	343	1200	1238	Σ=2781 μ=927 σ=506
Iteración 5	721	729	1015	1015	Σ=2465 μ=822 σ=167

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	614,2
K-Means	661,4
Colonia de hormigas –ACO-	1088,8

Número de UAV: 5 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

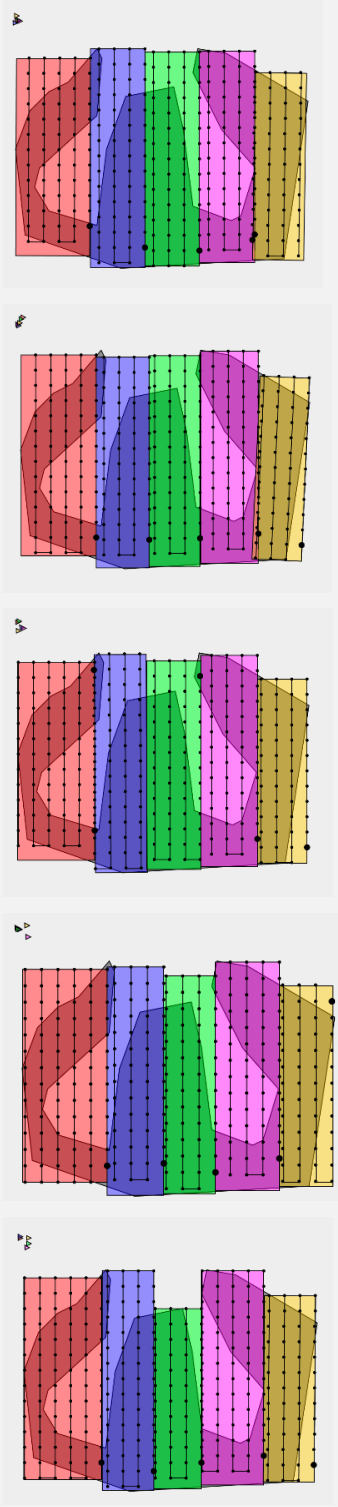
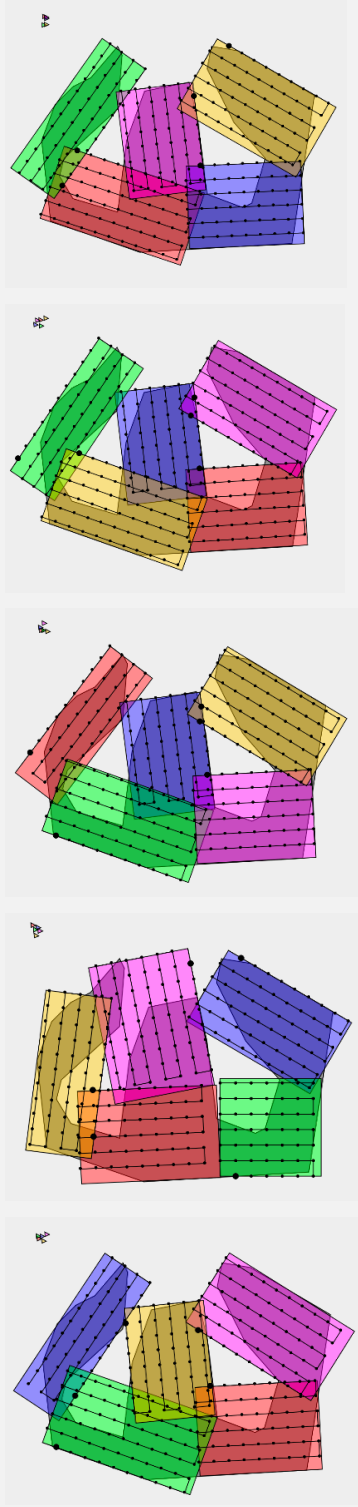
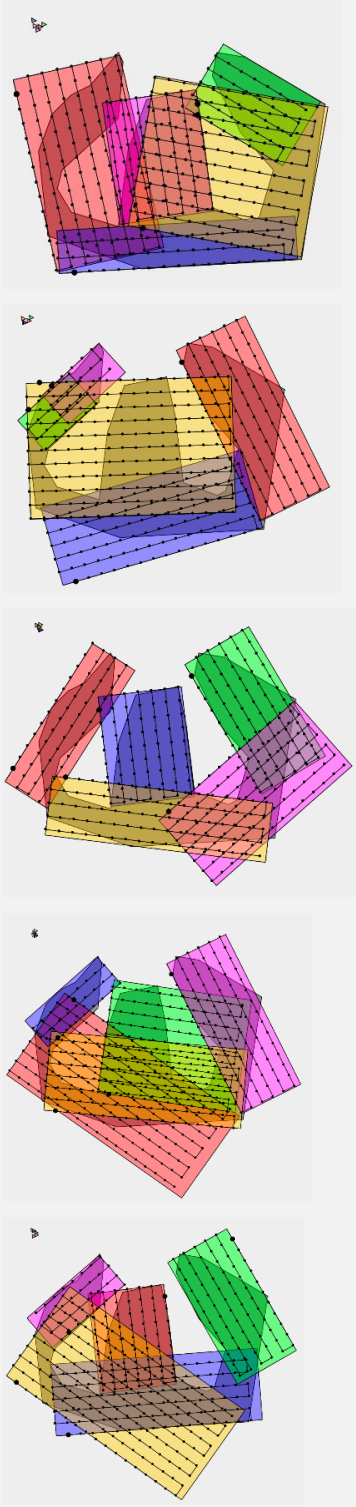
IRREGULAR
-Número de UAV: 5
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	271	262	313	293	287	313	Σ=1426 μ=285 σ=20
Iteración 2	336	286	226	360	289	360	Σ=1497 μ=299 σ=52
Iteración 3	341	296	279	324	243	341	Σ=1483 μ=297 σ=38
Iteración 4	352	257	264	297	266	352	Σ=1436 μ=287 σ=39
Iteración 5	358	302	275	303	279	358	Σ=1517 μ=303 σ=33

Método: K-Means							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	243	193	298	321	282	321	Σ=1337 μ=267 σ=50
Iteración 2	297	334	187	328	276	334	Σ=1422 μ=284 σ=59
Iteración 3	284	273	277	261	277	284	Σ=1372 μ=274 σ=8
Iteración 4	340	256	288	226	270	340	Σ=1380 μ=276 σ=42
Iteración 5	283	309	263	296	272	309	Σ=1423 μ=285 σ=18

Método: Colonia de hormigas –ACO-							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	347	284	229	200	345	347	Σ=1405 μ=281 σ=67
Iteración 2	335	260	264	259	289	335	Σ=1407 μ=281 σ=32
Iteración 3	315	301	251	452	378	452	Σ=1697 μ=339 σ=78
Iteración 4	138	336	363	330	203	363	Σ=1370 μ=274 σ=98
Iteración 5	273	358	380	266	365	380	Σ=1642 μ=328 σ=54

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	344,8
K-Means	317,6
Colonia de hormigas –ACO-	375,4

Número de UAV: 5 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

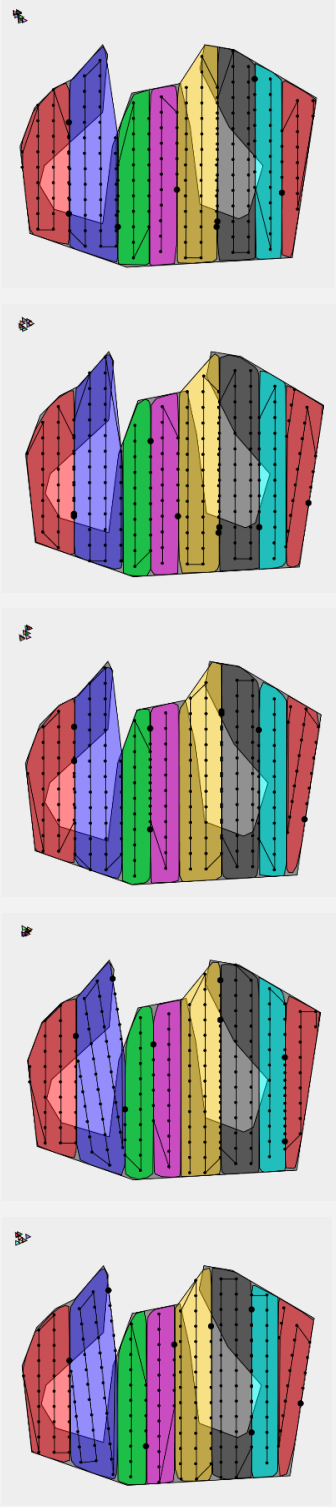
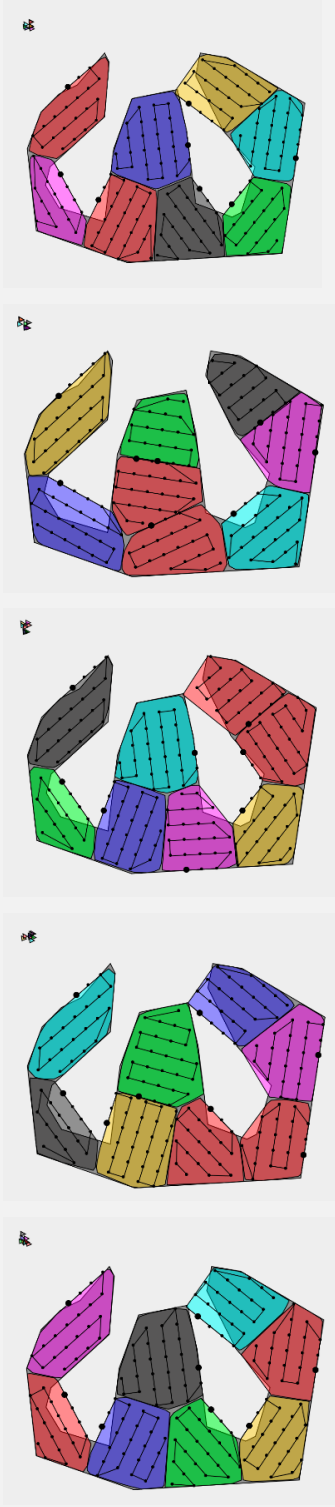
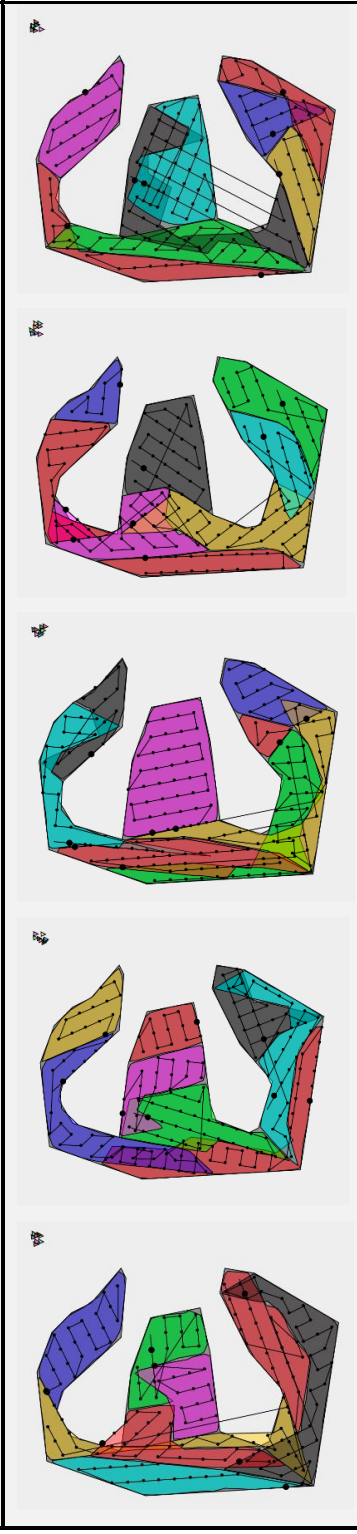
IRREGULAR
-Número de UAV: 5
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	384	335	343	333	335	384	Σ=1730 μ=346 σ=22
Iteración 2	376	317	325	334	353	376	Σ=1705 μ=341 σ=24
Iteración 3	413	300	296	332	328	413	Σ=1669 μ=334 σ=47
Iteración 4	441	318	327	332	307	441	Σ=1725 μ=345 σ=55
Iteración 5	441	337	291	396	353	441	Σ=1818 μ=364 σ=57

Método: K-Means							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	342	340	289	276	325	342	Σ=1572 μ=314 σ=30
Iteración 2	341	278	274	371	342	371	Σ=1606 μ=321 σ=43
Iteración 3	254	278	409	341	369	409	Σ=1651 μ=330 σ=64
Iteración 4	328	326	323	337	341	341	Σ=1655 μ=331 σ=8
Iteración 5	340	271	409	368	286	409	Σ=1674 μ=335 σ=57

Método: Colonia de hormigas –ACO-							
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	563	288	264	344	747	747	Σ=2206 μ=441 σ=208
Iteración 2	481	522	168	131	855	855	Σ=2157 μ=431 σ=296
Iteración 3	296	353	411	544	419	544	Σ=2023 μ=405 σ=92
Iteración 4	733	183	690	482	635	733	Σ=2723 μ=545 σ=223
Iteración 5	344	529	406	213	826	826	Σ=2318 μ=464 σ=232

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	411
K-Means	374,4
Colonia de hormigas –ACO-	741

Número de UAV: 8 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: NO		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		

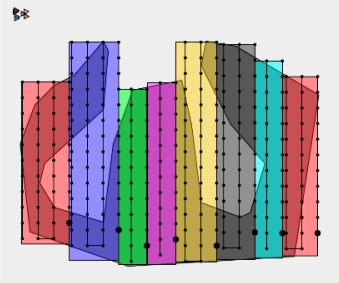
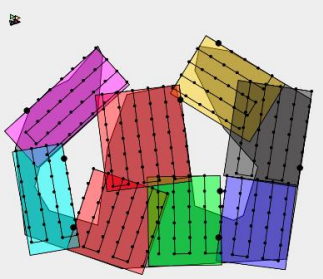
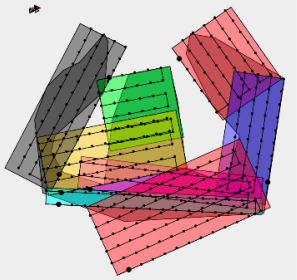
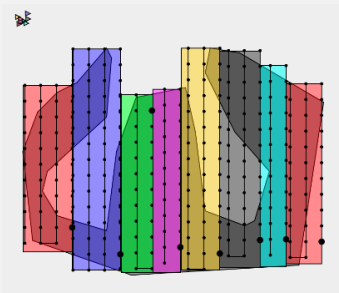
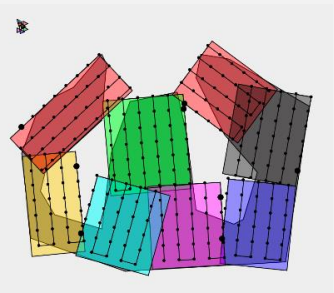
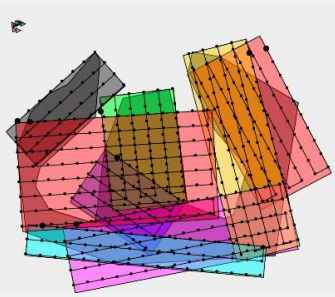
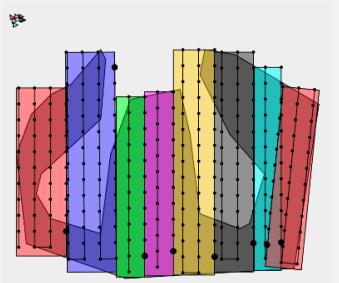
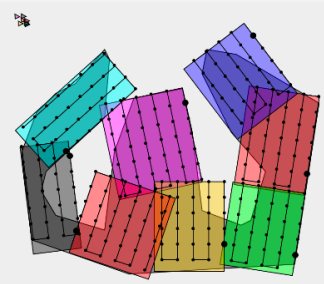
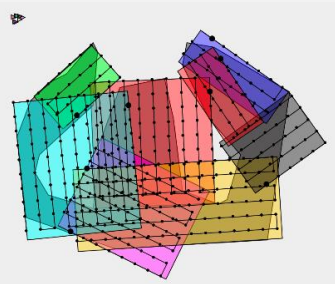
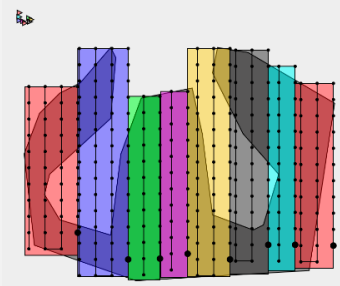
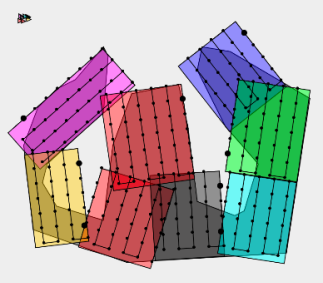
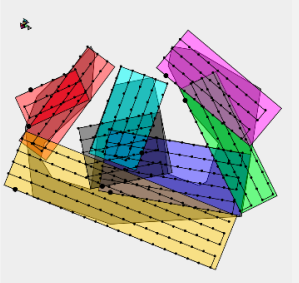
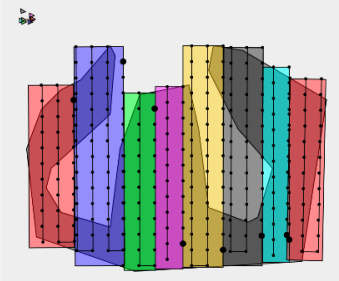
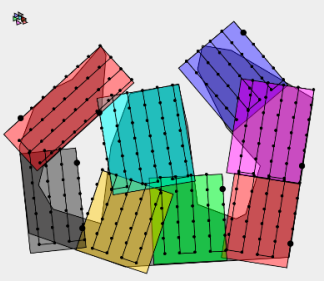
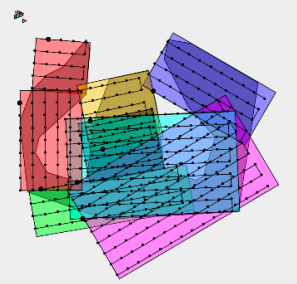
IRREGULAR
-Número de UAV: 8
-Sin suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	234	234	214	163	276	275	167	206	276	Σ=1769 μ=221 σ=43
Iteración 2	217	296	126	172	264	266	189	243	296	Σ=1773 μ=222 σ=57
Iteración 3	182	244	169	131	216	220	162	234	244	Σ=1558 μ=195 σ=40
Iteración 4	184	222	128	132	223	234	210	178	234	Σ=1511 μ=189 σ=41
Iteración 5	184	224	179	144	223	237	189	229	237	Σ=1609 μ=201 σ=32

Método: K-Means										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	148	203	220	135	209	203	248	221	248	Σ=1587 μ=198 σ=38
Iteración 2	173	169	183	235	170	210	244	222	244	Σ=1606 μ=201 σ=31
Iteración 3	234	211	136	229	223	158	204	218	234	Σ=1613 μ=202 σ=36
Iteración 4	178	209	261	231	230	138	151	236	261	Σ=1634 μ=204 σ=44
Iteración 5	139	208	203	154	220	210	202	236	236	Σ=1572 μ=197 σ=33

Método: Colonia de hormigas –ACO-										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	155	308	409	170	454	167	170	173	454	Σ=2006 μ=251 σ=122
Iteración 2	168	112	230	280	316	250	190	190	316	Σ=1736 μ=217 σ=65
Iteración 3	121	211	343	324	307	154	238	240	343	Σ=1938 μ=242 σ=80
Iteración 4	407	301	241	195	133	227	302	133	407	Σ=1939 μ=242 σ=93
Iteración 5	207	240	197	176	286	392	203	242	392	Σ=1943 μ=243 σ=69

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	257,4
K-Means	244,6
Colonia de hormigas –ACO-	382,4

Número de UAV: 8 – Escenario: IRREGULAR – Suavizado: SÍ		
Descomposición polígonos	**Teoría de grupos clustering**	**Algoritmo genético Colonia de hormigas**
		
		
		
		
		

IRREGULAR
-Número de UAV: 8
-Con suavizado
-Con salida y retorno a la estación base

Método: Polígonos										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	259	311	176	178	276	268	201	255	311	Σ=1924 μ=241 σ=50
Iteración 2	257	333	197	177	277	268	200	257	333	Σ=1966 μ=246 σ=51
Iteración 3	258	272	174	178	276	268	201	272	276	Σ=1899 μ=237 σ=45
Iteración 4	259	332	174	275	267	202	255	177	332	Σ=1941 μ=243 σ=54
Iteración 5	167	272	197	177	276	294	202	271	294	Σ=1856 μ=232 σ=51

Método: K-Means										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	267	262	219	195	198	288	169	252	288	Σ=1850 μ=231 σ=42
Iteración 2	224	262	252	218	171	287	245	216	287	Σ=1875 μ=234 σ=35
Iteración 3	287	221	276	252	231	169	213	267	287	Σ=1916 μ=240 σ=39
Iteración 4	269	205	269	216	172	218	263	252	269	Σ=1864 μ=233 σ=36
Iteración 5	275	206	218	287	242	173	265	215	287	Σ=1881 μ=235 σ=39

Método: Colonia de hormigas –ACO-										
	UAV 1	UAV 2	UAV 3	UAV 4	UAV 5	UAV 6	UAV 7	UAV 8	UAV crítico	Coste conjunto
Iteración 1	291	298	249	258	325	312	222	461	461	Σ=2416 μ=302 σ=68
Iteración 2	367	212	289	435	393	214	277	566	566	Σ=2753 μ=344 σ=113
Iteración 3	444	161	178	408	472	280	461	154	472	Σ=2558 μ=319 σ=133
Iteración 4	193	436	293	258	500	281	282	131	500	Σ= 2374 μ=297 σ=112
Iteración 5	139	306	308	707	250	239	548	252	707	Σ=2749 μ=344 σ=176

RESUMEN	Media UAV Crítico
Polígonos	309,2
K-Means	283,6
Colonia de hormigas –ACO-	541,2