UAB
Universitat Autònoma de Barcelona

Análisis Económico Comparativo entre la Gestión de Tráfico U-Space Automatizada vs. Convencional

Memoria del Trabajo Fin de Grado en Gestión Aeronáutica

realizado por

María Barnés García

y dirigido por

Cristian Eduardo Verdonk Gallego

Escuela de Ingeniería

Sabadell, Junio de 2026

El abajo firmante, director del Trabajo de Fin de Grado, profesor de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el trabajo al que corresponde la presente memoria ha sido realizado bajo su dirección por

María Barnés García

Y para que conste firma la presente en Sabadell, Junio de 2026



---------- ----------

Firmado: Cristian Eduardo Verdonk Gallego

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado estudia dos nuevos modelos de negocio con drones en la Región de Murcia, integrando de forma progresiva los servicios U-Space del Reglamento (UE) 2021/664. El primero compara un operador agrícola convencional que ya trabaja con drones (2×DJI Agras T50, sin automatización relevante) con un modelo propio que incorpora el DJI Agras T100: vuelo autónomo supervisado, tramitación digital de autorizaciones e informes de tratamiento generados automáticamente. El segundo propone un modelo de inspección ferroviaria con drones sobre el corredor Murcia–Águilas (111,7 km, línea 322 ADIF), que no tiene ningún precedente comercial en España: los drones operan en régimen BVLOS desde una estación de control en Lorca, con recargas totalmente automáticas mediante estaciones DJI Dock 2 y sin operario en campo. A los dos casos se les aplica la metodología SORA 2.5, resultando SAIL II para ambos casos de uso. El análisis económico compara costes, ingresos y periodos de retorno, mostrando que la automatización y los servicios U-Space tienen un impacto directo y cuantificable sobre la rentabilidad de ambos modelos.

Palabras clave:

UAS, U-Space, SORA 2.5, modelo de negocio, automatización progresiva, inspección ferroviaria, agricultura de precisión, DJI Agras T100, DJI Agras T50, BVLOS, DJI Dock 2, corredor Murcia–Águilas.

Abstract

This thesis examines two new drone-based business models in the Region of Murcia, Spain, developed within the U-Space regulatory framework established by Regulation (EU) 2021/664. The first case study compares a conventional agricultural drone operator (2×DJI Agras T50, limited automation) with a proposed new model using the DJI Agras T100, which combines supervised autonomous flight, digital flight authorization management and automatic treatment records. The second case study puts forward what would be the first commercial railway inspection drone service in Spain, covering the Murcia–Águilas corridor (111.7 km, ADIF line 322). In this model, two drones operate in BVLOS mode under remote supervision from a fixed control station in Lorca, with fully automatic recharging via DJI Dock 2 stations and no field personnel. SORA 2.5 is applied to both cases, yielding SAIL II for both the agricultural and the railway scenarios. A cost-benefit analysis compares CAPEX, OPEX, break-even points and payback periods across models. The findings show that incremental automation and U-Space service integration have a measurable and positive effect on the economic viability of both business models.

Keywords:

UAS, U-Space, SORA 2.5, business model, progressive automation, railway inspection, precision agriculture, DJI Agras T100, DJI Agras T50, BVLOS, DJI Dock 2, Murcia–Águilas corridor.

Resum

Aquest Treball de Fi de Grau estudia dos nous models de negoci amb drons a la Regió de Múrcia, que integren de manera progressiva els serveis U-Space del Reglament (UE) 2021/664. El primer compara un operador agrícola convencional que ja treballa amb drons (2×DJI Agras T50, sense automatització rellevant) amb un model propi que incorpora el DJI Agras T100: vol autònom supervisat, tramitació digital d'autoritzacions i informes de tractament generats automàticament. El segon proposa un model d'inspecció ferroviària amb drons sobre el corredor Múrcia–Águilas (111,7 km, línia 322 d'ADIF), que no té cap precedent comercial a Espanya: els drons operen en règim BVLOS des d'una estació de control a Lorca, amb recàrregues totalment automàtiques mitjançant estacions DJI Dock 2 i sense operari sobre el terreny. A tots dos casos s'aplica la metodologia SORA 2.5, amb un resultat de SAIL II per a ambdós casos d'ús. L'anàlisi econòmica compara costos, ingressos i períodes de retorn, i mostra que l'automatització i els serveis U-Space tenen un impacte directe i quantificable sobre la rendibilitat de tots dos models.

Paraules clau:
UAS, U-Space, SORA 2.5, model de negoci, automatització progressiva, inspecció ferroviària, agricultura de precisió, DJI Agras T100, DJI Agras T50, BVLOS, DJI Dock 2, corredor Múrcia–Águilas.

INDICE

Resumen 3
Abstract 4
1. Introducción 13
1.1 Contexto y justificación del estudio 13
1.2 Objetivos del trabajo 15
1.3 Metodología empleada 15
1.4 Estructura del documento 16
2. Marco teórico 18
2.1 Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) 18
2.1.1 De la aeronave al sistema 18
2.1.2 Evolución tecnológica 18
2.1.3 Aplicaciones civiles relevantes 19
2.2 Marco regulatorio del espacio aéreo UAS 20
2.2.1 El Reglamento (UE) 2019/947 y las categorías operacionales 20
2.2.2 El Real Decreto 517/2024 20
2.2.3 Otras normas relevantes 21
2.3 El concepto U-Space y sus servicios 21
2.3.1 Origen y motivación 21
2.3.2 El paquete reglamentario europeo (2021) 21
2.3.3 La arquitectura USSP / CISP 23
2.4 La metodología SORA 23
2.4.1 Fundamentos y trayectoria 23
2.4.2 Pasos del proceso 24
2.4.3 Limitaciones de la metodología 25
2.5 Automatización en operaciones UAS: estado del arte 25
2.6 Limitaciones tecnológicas y operacionales actuales 27
3. Caso de uso agrícola: aplicación de fitosanitarios en Lorca (Murcia) 28
3.1 Definición del caso de uso 28
3.2 Entorno operacional y características de la operación 28
3.2.1 Descripción del entorno rural 28
3.2.2 Condiciones meteorológicas y ventana operativa 29
3.2.3 Restricciones regulatorias aplicables 29
3.3 El modelo convencional: operador de drones agrícolas actual 30
3.3.1 Descripción del operador de referencia 30

3.3.2 Operativa del modelo convencional 31
3.3.3 Limitaciones estructurales del modelo convencional 32
3.4 Descripción del sistema UAS propuesto 32
3.4.1 Selección y justificación de la plataforma 32
3.4.2 Capacidades de automatización del sistema 35
3.4.3 Integración con herramientas digitales de gestión 35
3.5 Desarrollo operativo de la misión 36
3.5.1 Fase 1: Planificación 36
3.5.2 Fase 2: Operación 37
3.5.3 Fase 3: Cierre 37
3.6 El modelo con integración U-Space 37
3.6.1 Qué es U-Space y por qué es relevante para este modelo 37
3.6.2 Servicios U-Space aplicables a este caso de uso 38
3.6.3 Situación actual en España y hoja de ruta 38
3.7 Análisis SORA de la operación con drones 38
3.7.1 Concepto de Operaciones (ConOps) 38
3.7.2 Paso 1 — iGRC intrínseco 39
3.7.3 Paso 2 — GRC final 39
3.7.4 Paso 3 — ARC inicial 40
3.7.5 Paso 4 — ARC residual 40
3.7.6 Paso 5 — SAIL 40
3.7.7 Paso 6 — OSOs aplicables (SAIL II) 40
3.7.8 Paso 7 — TMPR 40
3.7.9 Paso 8 — Consideraciones de seguridad complementarias 40
3.7.10 Implicaciones económicas del SORA 41
3.8 Modelo de negocio 41
3.8.1 Estructura de la empresa y personal 41
3.8.2 Servicios y tarifas 41
3.8.3 Propuesta de valor frente al modelo convencional 42
4. Caso de uso ferroviario: inspección del corredor Murcia–Águilas 43
Hipótesis de trabajo y limitaciones técnicas del modelo 43
4.1 Justificación y entorno operacional 44
4.1.1 Contexto y justificación del caso de uso 44
4.1.2 El problema de la inspección ferroviaria convencional 44
4.1.3 El corredor Murcia–Águilas como entorno de referencia 45
4.2 El modelo convencional: inspección manual de infraestructura ferroviaria 46

4.2.1 Descripción del modelo actual 46
4.2.2 Rendimiento operativo y limitaciones 46
4.3 Descripción del sistema UAS propuesto 47
4.3.1 Justificación del enfoque 47
4.3.2 Arquitectura del sistema 47
4.3.3 Gestión del espacio aéreo 49
4.4 Desarrollo operativo de la misión 51
4.4.1 Fase 1: Planificación 52
4.4.2 Fase 2: Operación 53
4.4.3 Fase 3: Cierre e informe 54
4.5 El modelo con integración U-Space 54
4.5.1 U-Space como habilitador del modelo remoto 54
4.5.2 Servicios U-Space aplicables 55
4.5.3 DJI FlightHub 2 como plataforma de gestión 55
4.5.4 Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo (DAR) 55
4.6 Análisis SORA 2.5 de la operación ferroviaria 57
4.6.1 Concepto de Operaciones (ConOps) 57
4.6.2 Paso 1 — iGRC intrínseco 57
4.6.3 Paso 2 — GRC final tras mitigaciones 58
4.6.4 Paso 3 — ARC inicial 59
4.6.5 Paso 4 — ARC residual tras mitigaciones estratégicas 59
4.6.6 Paso 5 — SAIL 60
4.6.7 Paso 6 — OSOS aplicables (SAIL II) 61
4.6.8 Paso 7 — TMPR 61
4.6.8 Implicaciones económicas del SORA 63
4.7 Modelo de negocio ferroviario 64
5. Análisis coste-beneficio 65
5.1 Marco metodológico de comparación 65
5.2 Análisis económico del caso agrícola 66
5.2.1 Inversión inicial (CAPEX) 66
5.2.2 Costes operativos anuales (OPEX) 67
5.2.3 Capacidad operativa e ingresos 68
5.2.4 Escenarios de rentabilidad y payback 69
5.3 Análisis económico del caso ferroviario 70
5.3.1 Inversión inicial (CAPEX) 70
5.3.2 Costes operativos anuales (OPEX) 71

5.3.3 Modelo de ingresos 72
5.3.4 Punto de equilibrio 73
5.3.5 Payback y rentabilidad 74
5.4 Sensibilidad y limitaciones del modelo económico 75
5.4.1 Análisis de sensibilidad 75
5.4.2 Limitaciones del modelo económico 76
5.5 Análisis de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) 76
6. Comparativa entre modelos operacionales 78
6.1 Complejidad operacional y regulatoria 78
6.2 Impacto de la automatización sobre la gestión operacional 79
6.3 Escalabilidad y sostenibilidad 80
6.4 Aplicabilidad de SORA a arquitecturas U-Space futuras 81
7. Conclusiones 83
7.1 Conclusiones principales 83
7.2 Cumplimiento de los objetivos 84
7.2 La hipótesis tecnológica del caso ferroviario 85
7.3 Limitaciones del estudio 86
7.4 Líneas futuras de investigación 86
Referencias bibliográficas 88
Anexo A. Acrónimos y abreviaturas 92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Servicios obligatorios del U-Space y su función esencial 22
Tabla 2 Matriz de determinación del iGRC intrínseco 25
Tabla 3. Parámetros de cálculo del iGRC intrínseco del caso agrícola 39
Tabla 4. Objetivos de seguridad operacional aplicables al caso agrícola 40
Tabla 5. Costes regulatorios y de documentación SORA del caso agrícola 41
Tabla 6. Parámetros de cálculo del iGRC intrínseco del caso ferroviario 58
Tabla 7. Objetivos de seguridad operacional aplicables al caso ferroviario 61
Tabla 8. Costes regulatorios y de documentación SORA del caso ferroviario 63
Tabla 9. CAPEX comparado del caso agrícola: modelo convencional frente a nuevo modelo 66
Tabla 10. Sensibilidad del CAPEX agrícola al sobrecoste de integración U-Space 67

Tabla 11. OPEX anual comparado del caso agrícola 68
Tabla 12. Umbral de equilibrio del caso agrícola según el coste de U-Space 69
Tabla 13. Escenarios de rentabilidad y payback del caso agrícola 70
Tabla 14. CAPEX del caso ferroviario 71
Tabla 15. OPEX fijo anual del caso ferroviario 72
Tabla 16. Coste regulatorio U-Space y DAR por inspección completa 72
Tabla 17. Ingreso anual según frecuencia de inspección 73
Tabla 18. Punto de equilibrio del caso ferroviario 73
Tabla 19. Beneficio antes de impuestos según frecuencia y escenario regulatorio 74
Tabla 20. Sensibilidad al coste de los servicios regulatorios 75
Tabla 21. Sensibilidad a la disponibilidad de la flota 75
Tabla 22. VAN y TIR por escenario regulatorio 77
Tabla 23. Comparativa de parámetros clave entre el modelo agrícola y el ferroviario 78
Tabla 24. Acrónimos y abreviaturas 93

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Arquitectura de prestación de servicios U-Space 23
Ilustración 2. Esquema del modelo convencional agrícola con dos plataformas DJI Agras T50 . 31
Ilustración 3. DJI Agras T50 31
Ilustración 4. Esquema del sistema UAS propuesto con DJI Agras T100 33
Ilustración 5. DJI Agras T100 en operación de pulverización 33
Ilustración 6. DJI Agras T100 sobre cultivo arbóreo 34
Ilustración 7. Flujo operacional del modelo agrícola con DJI Agras T100 34
Ilustración 8. Flujo operacional del modelo agrícola con DJI Agras T100 36
Ilustración 9. Esquema del corredor Murcia–Águilas: sectorización por drones y puntos kilométricos 45
Ilustración 10. Estación DJI Dock 2 49
Ilustración 11. Estructura del espacio aéreo en el entorno de la ATZ Murcia/Alcantarilla 50
Ilustración 12. Espacio aéreo de la Región de Murcia 51
Ilustración 13. Flujo operacional del modelo ferroviario sobre el corredor Murcia–Águilas 52

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del estudio

Durante la última década, los sistemas de aeronaves no tripuladas (Unmanned Aircraft Systems, UAS) han experimentado una expansión sostenida que ha desbordado el ámbito puramente militar en el que se gestaron. La convergencia de tres factores explica este fenómeno: la miniaturización de los sensores inerciales y de las unidades de procesamiento embarcado, el abaratamiento de los componentes electrónicos derivado del sector del automóvil eléctrico y, en paralelo, la consolidación de redes de comunicación móvil de alta capacidad (Floreano y Wood, 2015). Como consecuencia, las aeronaves remotamente pilotadas han pasado a desempeñar funciones civiles tan diversas como la agricultura de precisión, la inspección de infraestructuras críticas, la vigilancia ambiental, la cartografía o la logística de última milla (Pereira-Carvalho et al., 2024).

El mercado europeo de drones presenta proyecciones de crecimiento sostenido: la revisión del sector publicada por la EASA en 2023 estima más de 1,3 millones de aeronaves sin tripulación registradas en Europa y proyecta su integración progresiva en el espacio aéreo de baja altitud a lo largo de la década (EASA, 2023). Las estimaciones más ambiciosas, de las que el estudio U-Space Blueprint de la SESAR JU (2017) fue precursor, apuntaban a un impacto económico de entre 10.000 y 15.000 millones de euros anuales en 2035, sustentado mayoritariamente en operaciones civiles de baja altitud. Este crecimiento, sin embargo, choca con un modelo de gestión del tráfico aéreo que fue diseñado en los años cincuenta del siglo pasado para aeronaves tripuladas, con una densidad de tráfico moderada y bajo supervisión humana directa (Barrado et al., 2020). Trasladar dicho modelo a un entorno donde decenas o cientos de UAS pueden operar simultáneamente en una misma celda de espacio aéreo resulta inviable tanto desde el punto de vista de la seguridad operacional como del coste marginal de supervisión.

La respuesta europea a este reto se denomina U-Space. Bajo este paraguas conceptual, la Unión Europea ha articulado un conjunto de servicios digitales que permiten autorizar, supervisar y coordinar operaciones UAS de manera automatizada, manteniendo un nivel de seguridad equivalente al de la aviación tripulada. El marco regulatorio se materializa en el Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664, complementado por los Reglamentos 2021/665 y 2021/666 (Comisión Europea, 2021a, 2021b, 2021c), y se inspira en el concepto de Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) desarrollado en paralelo por la NASA y la Federal Aviation Administration (Kopardekar et al., 2016). Aunque el marco normativo está parcialmente desplegado, su éxito depende todavía de la madurez de los proveedores de servicios U-Space (USSP), de los

proveedores comunes de información (CISP) y, sobre todo, de la capacidad de automatizar la coordinación táctica entre múltiples aeronaves (Barrado et al., 2020).

La automatización emerge, por tanto, como factor estructuralmente necesario. A medida que el número de operaciones simultáneas crece, los modelos de supervisión basados exclusivamente en intervención humana se enfrentan a un techo de escalabilidad bien documentado en la literatura sobre factores humanos en sistemas complejos (Endsley, 2017). El coste marginal de cada operación adicional, en términos de carga cognitiva del operador y de recursos humanos cualificados, crece casi linealmente con la actividad. Por el contrario, una arquitectura parcialmente automatizada permite absorber buena parte de ese crecimiento sin un incremento proporcional de la plantilla, siempre que se mantenga al operador en el bucle de las decisiones críticas (Sheridan, 1992).

Sobre este telón de fondo, este trabajo aborda una pregunta concreta: ¿en qué medida la automatización del tráfico UAS dentro del entorno U-Space modifica la viabilidad operacional y económica de modelos de negocio reales basados en drones? Para responderla se han seleccionado dos casos de uso ubicados en la Región de Murcia, donde la combinación de una intensa actividad agrícola y una red ferroviaria con tramos relativamente aislados ofrece un escenario representativo. El primer caso es la aplicación periódica de tratamientos fitosanitarios sobre explotaciones de regadío en el municipio de Lorca; el segundo, la inspección sistemática del corredor ferroviario Murcia–Águilas (línea 322 ADIF), de 111,7 km de longitud (ADIF, 2024).

La elección de estos dos escenarios no es arbitraria. Ambos comparten la repetitividad y la planificación previa que favorecen la automatización, pero difieren significativamente en su densidad operacional, en la criticidad de la infraestructura afectada y en el marco regulatorio aplicable. Esta heterogeneidad permite poner a prueba el modelo conceptual de U-Space en dos extremos del espectro de complejidad y, como resultado, extraer conclusiones generalizables más allá de la mera anécdota técnica.

Finalmente, el trabajo desarrolla para el caso ferroviario un modelo de inspección UAS basado en plataformas comercialmente disponibles desde 2023–2024: el dron DJI Matrice 3TD de DJI Enterprise integrado con estaciones de recarga automática DJI Dock 2, con una autonomía operativa de hasta 50 minutos por carga y una velocidad de inspección de 5 m/s, que permite dimensionar el modelo de negocio con datos de producto verificables.

1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo general de este trabajo consiste en evaluar cómo el grado de automatización del tráfico UAS, en el marco del entorno U-Space, condiciona la viabilidad técnica, operacional y económica de modelos de negocio civiles basados en drones, tomando como referencia dos casos de uso de complejidad creciente en la Región de Murcia.

De ese objetivo general se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el estado del arte normativo y técnico del entorno U-Space europeo, identificando los servicios definidos por el Reglamento (UE) 2021/664 y las capacidades requeridas a los proveedores USSP y CISP.
- Aplicar la metodología SORA, en la versión consolidada por la EASA, a operaciones UAS reales sobre dos casos de uso (agrícola y ferroviario), obteniendo los niveles GRC, ARC y SAIL correspondientes y los Objetivos de Seguridad Operacional (OSO) derivados.
- Comparar el modelo convencional de operación con drones frente al nuevo modelo propuesto en cada caso de uso, cuantificando el impacto de la automatización progresiva sobre la eficiencia operativa y la rentabilidad.
- Proponer y justificar técnicamente un sistema UAS orientado a la inspección ferroviaria BVLOS basado en plataformas comerciales disponibles, identificando los subsistemas críticos, las limitaciones operativas actuales y las líneas de investigación abiertas.
- Construir un modelo coste-beneficio simplificado que permita comparar la operación tradicional, la basada en UAS comerciales y la sustentada por una arquitectura U-Space parcialmente automatizada, estimando el periodo de retorno de la inversión.
- Comparar transversalmente ambos casos para extraer conclusiones sobre escalabilidad, sostenibilidad económica y madurez tecnológica del sector, así como recomendar líneas futuras de investigación.

1.3 Metodología empleada

El trabajo combina tres aproximaciones metodológicas. La primera es una revisión de la literatura científica y la normativa vigente, centrada en cuatro bloques temáticos: U-Space y UTM, metodología SORA, tecnologías UAS aplicadas a agricultura de precisión e inspección de infraestructuras, y economía de operaciones con drones. La búsqueda se realizó en Scopus, Web of Science y Google Scholar con combinaciones de los términos U-Space, UTM, SORA, precision agriculture, railway inspection y BVLOS, restringiendo los resultados al periodo 2015–2026. La búsqueda inicial arrojó más de 400 resultados combinados; tras aplicar criterios de inclusión (artículos en inglés o español, peer-reviewed o fuentes institucionales primarias, directamente relacionados con los cuatro bloques temáticos) y de exclusión (trabajos sin acceso al texto

completo, estudios no aplicables al contexto europeo o anteriores a 2015 salvo referencias fundacionales), se seleccionaron 28 referencias académicas para revisión completa, complementadas con 18 fuentes regulatorias e institucionales primarias. Las fuentes regulatorias se obtuvieron del Diario Oficial de la UE y de los portales oficiales de EASA, AESA y ENAIRE.

La segunda aproximación es analítica. Para cada caso de uso se define el concepto operacional, se construye el diagrama de flujo y se aplica la metodología SORA 2.5 siguiendo los nueve pasos descritos por EASA: caracterización del ConOps, cálculo del GRC, determinación del ARC y obtención del SAIL con sus OSO correspondientes. El análisis distingue entre el modelo convencional que sirve de referencia y el nuevo modelo propuesto, lo que permite evaluar el impacto de la automatización sobre el nivel de riesgo regulatorio y sobre la carga documental exigida.

La tercera aproximación es económica. Para cada caso se construye un modelo de costes e ingresos con tres magnitudes principales: CAPEX, OPEX anual y tarifa de referencia. Con esos datos se calcula el punto de equilibrio y el payback en tres escenarios de ocupación. Los datos proceden de catálogos públicos de fabricantes (DJI Agriculture, 2025a; DJI Enterprise, 2025a), estudios sectoriales y fuentes oficiales como ADIF o el Ministerio de Agricultura (MAPA, 2023). Los datos salariales utilizados para la estimación del OPEX se obtienen de la Encuesta Anual de Estructura Salarial del INE (2024) como fuente estadística primaria, complementada con datos de mercado laboral del sector UAS. Cuando ha sido necesario usar valores no publicados o estimados, se identifican explícitamente como estimaciones propias y se incorporan al análisis de sensibilidad de la sección 5.4.1 para evaluar el impacto de su variabilidad sobre los resultados.

La elección de Murcia como ámbito de referencia responde a razones concretas. Su sector agrícola representa cerca del 18% del VAB regional, con cultivos de regío intensivo donde los drones de aplicación tienen una demanda real y creciente (MAPA, 2023). El corredor ferroviario Murcia–Águilas, por su parte, es una línea convencional de ADIF con tramos rurales de baja densidad de población, lo que lo hace adecuado para probar operaciones BVLOS sin interferencias críticas con el espacio aéreo. En ambos casos, la Región de Murcia actúa como entorno de referencia, no como límite geográfico: los modelos propuestos están diseñados para ser replicables en otros entornos similares.

1.4 Estructura del documento

El trabajo se divide en siete capítulos. Este primero fija el contexto, los objetivos y la metodología. El capítulo 2 desarrolla el marco teórico: regulación UAS, servicios U-Space y metodología SORA 2.5. Los capítulos 3 y 4 abordan cada caso de uso, con su diagrama de flujo operativo, el análisis SORA y el modelo de negocio correspondiente. El capítulo 5 compara

económicamente los dos casos. El 6 cruza los resultados de ambos y saca conclusiones sobre automatización y escalabilidad. El 7 cierra con las conclusiones, las limitaciones del estudio y las líneas de trabajo futuro.

2. Marco teórico

Este capítulo recoge los fundamentos conceptuales, normativos y metodológicos sobre los que se sustentan los análisis posteriores. Se ha optado por una exposición orientada al lector experto en aviación pero no necesariamente familiarizado con la jerga de los UAS, evitando la yuxtaposición de definiciones aisladas y privilegiando el hilo argumental: de la aeronave al sistema, del sistema al marco regulatorio y, finalmente, del marco regulatorio a la metodología de evaluación del riesgo que vertebra los capítulos 3 y 4.

2.1 Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)

2.1.1 De la aeronave al sistema

El término popular «dron» resulta operativamente insuficiente. La normativa internacional empezando por el Anexo 2 al Convenio de Chicago y siguiendo por las definiciones consolidadas en el Reglamento (UE) 2019/947 distingue entre el vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) y el sistema completo que lo soporta (UAS). Este último engloba, además de la aeronave, la estación de control en tierra, el enlace de mando y control (C2 link), los sensores embarcados y los procedimientos operacionales que disciplinan la misión (Austin, 2010). Esta distinción es relevante porque la seguridad operacional rara vez depende de la plataforma considerada aisladamente: lo que falla, normalmente, es el sistema en total.

Como resultado, cualquier análisis riguroso del riesgo asociado a una operación UAS debe considerar las interacciones entre cinco subsistemas que muestran fuerte acoplamiento: la plataforma aérea (con su planta motora, sus sistemas de control de vuelo y su aviónica), el segmento terrestre (estación de control y operador remoto), el segmento de comunicaciones (enlace C2 y enlace de carga útil), el segmento de navegación (típicamente GNSS multiconstelación con o sin corrección RTK/PPK) y, cada vez más, el segmento digital de servicios de gestión del tráfico (USSP/CISP) (Barrado et al., 2020).

2.1.2 Evolución tecnológica

La trayectoria histórica de los UAS civiles puede describirse en tres olas. La primera, hasta aproximadamente 2005, estuvo dominada por aplicaciones militares y por una transferencia limitada al mercado civil debido al coste y el peso de los componentes. La segunda ola, entre 2005 y 2015, se caracterizó por la democratización de las plataformas multirrotor, impulsada por la miniaturización de los IMU MEMS, la caída del precio de las baterías de polímero de litio y la aparición de controladores de vuelo open-source como Pixhawk (Floreano y Wood, 2015). La tercera ola, que sigue en curso, se distingue por el desplazamiento del valor añadido desde el hardware hacia el software y los servicios: planificación automática, fusión sensorial

avanzada, inteligencia artificial embarcada para detección de objetos y, recientemente, integración nativa con servicios U-Space (Pereira-Carvalho et al., 2024).

Esta evolución tiene implicaciones directas sobre el alcance del presente estudio. Las plataformas comerciales utilizadas en los casos analizados DJI Agras T50 para aplicación agrícola y DJI Matrice 3TD para inspección pertenecen a la tercera ola y, en ese sentido, representan el estado del arte comercial accesible en el momento de redactar este trabajo (DJI Agriculture, 2025a; DJI Enterprise, 2025a). Los desarrollos en curso sobre motorización con pila de hidrógeno y autonomía operacional certificada apuntan a una posible cuarta ola que, aunque fuera del alcance de este trabajo, condiciona las líneas de investigación identificadas en las conclusiones.

2.1.3 Aplicaciones civiles relevantes

Entre el catálogo cada vez más amplio de aplicaciones civiles, este trabajo se centra en dos verticales que comparten una característica esencial: el carácter repetitivo y programable de las misiones.

En la agricultura de precisión, los drones se emplean para mapeo multiespectral, aplicación de fitosanitarios y biocontrol mediante liberación de auxiliares biológicos (Guebsi et al., 2024). Se trata ya de una práctica consolidada entre los operadores profesionales en España: la Agencia Estatal de Seguridad Aérea contabilizaba a comienzos de 2026 más de 250 autorizaciones vigentes para operaciones fitosanitarias destinadas a combatir plagas, enfermedades y malezas en cultivos, en un contexto de crecimiento general del sector en el que el número total de operadores de drones registrados en España pasó de 5.975 en 2020 a 150.332 a finales de 2025 (Escuela de Ingenierías Agrarias-UNEX, 2026, con datos de AESA).

En inspección de infraestructuras lineales, los UAS se han impuesto progresivamente para el seguimiento de líneas eléctricas, gasoductos, oleoductos y vías ferroviarias, con reducciones documentadas del tiempo de inspección comprendidas entre el 60 % y el 70 % respecto a los métodos tradicionales basados en cuadrillas a pie o vehículos especializados (Aela et al., 2024). En el contexto ferroviario específico, Aela et al. (2024) sistematizan 47 estudios publicados entre 2016 y 2023 sobre aplicaciones UAV en infraestructura ferroviaria, identificando tres categorías principales de uso: inspección visual de vía y obra civil (63 % de los estudios), detección de defectos de carril mediante imagen multiespectral (21 %) e inventario de vegetación y gálibos (16 %). La revisión concluye que los sistemas UAV permiten incrementar la frecuencia de inspección entre 4 y 8 veces respecto al modelo de cuadrillas convencionales para el mismo presupuesto operativo, dato que respalda empíricamente la hipótesis de partida del caso ferroviario. El grado de madurez comercial de esta aplicación varía notablemente según el país, como se detalla en el capítulo 4.

La elección de un caso agrícola y un caso de inspección lineal no es casual. Ambos escenarios comparten el componente programable y permiten una comparación limpia del impacto de la automatización, pero difieren en la complejidad regulatoria y en la criticidad de la infraestructura supervisada. Esta heterogeneidad controlada es deliberada y constituye el armazón comparativo sobre el que se construyen los capítulos 3 y 4 de este trabajo.

2.2 Marco regulatorio del espacio aéreo UAS

2.2.1 El Reglamento (UE) 2019/947 y las categorías operacionales

La regulación europea de operaciones UAS se articula sobre dos textos básicos. El Reglamento Delegado (UE) 2019/945 fija los requisitos de producto aplicables a las aeronaves no tripuladas y a los accesorios asociados (Comisión Europea, 2019a), mientras que el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, modificado en sucesivas ocasiones la última mediante el Reglamento (UE) 2024/1108, define las reglas y procedimientos operacionales (Comisión Europea, 2019b, 2024). Ambos textos introducen una clasificación operacional basada en el riesgo en tres categorías: open, specific y certified.

La categoría open agrupa operaciones de bajo riesgo estructuradas en tres subcategorías: A1 (aeronaves de clase C0 o C1, con peso máximo al despegue inferior a 250 g o 900 g respectivamente, admitidas sobre personas con restricciones), A2 (aeronaves clase C2, hasta 4 kg, con distancias de seguridad respecto a personas) y A3 (aeronaves de hasta 25 kg en zonas alejadas de personas). Todas las subcategorías requieren vuelo VLOS y altura máxima de 120 m AGL. La categoría specific cubre las operaciones que, sin alcanzar la criticidad de la aviación tripulada certificada, exceden los límites de la categoría open. Su autorización se obtiene mediante uno de tres caminos: (i) escenarios estándar predefinidos (STS), (ii) autorización de operador de bajo riesgo (LUC) o (iii) la aplicación de la metodología SORA descrita en la sección 2.4 (EASA, 2025). La categoría certified se reserva a operaciones equiparables a las de aviación tripulada, principalmente transporte aéreo de personas y mercancías, y exige certificación de tipo de producto plena.

Los dos casos analizados en este trabajo se sitúan en la categoría specific. El caso agrícola con el DJI Agras T100, debido a su MTOM de 101,6 kg con carga útil completa, queda fuera de la categoría open (DJI Agriculture, 2025a). El caso ferroviario, aunque utiliza el Matrice 3TD integrado con el DJI Dock 2 con un MTOM inferior, requiere operación BVLOS sobre tramos extensos y la coordinación con un gestor de infraestructura, lo que también lo desplaza a specific. Esta clasificación condiciona los requisitos de autorización y motiva la aplicación posterior de la metodología SORA.

2.2.2 El Real Decreto 517/2024

En el ámbito español, el Real Decreto 517/2024, de 4 de junio, por el que se aprueba el Reglamento del uso civil de las aeronaves no tripuladas y se modifican el Real Decreto 1036/2017 y el Real Decreto 750/2014, completa el marco europeo desarrollando los aspectos delegados a los Estados miembros: la definición y publicación de zonas geográficas UAS, los procedimientos de autorización ante AESA y los requisitos específicos aplicables a operaciones

sobre infraestructuras críticas (Jefatura del Estado, 2024). El texto entró en vigor el 1 de enero de 2025 y derogó el anterior Real Decreto 1036/2017.

Para los objetivos de este trabajo conviene retener tres aspectos. Primero, el RD 517/2024 sistematiza las zonas geográficas UAS (UGZ) en cuatro tipologías: prohibidas, restringidas con limitaciones operacionales, restringidas con autorización previa y libres con condiciones informativas (artículo 8). Segundo, el reglamento clasifica explícitamente las infraestructuras ferroviarias como esenciales para la comunidad, lo que implica restricciones de sobrevuelo y la necesidad de obtener autorización del titular de la infraestructura (artículo 14, en relación con el anexo II). Tercero, el reglamento articula la coordinación con los Servicios de Tránsito Aéreo (ATS) y con los proveedores U-Space previsibles para las zonas urbanas de alta densidad operacional (capítulo IV).

2.2.3 Otras normas relevantes

Además de los textos citados, son aplicables a los escenarios analizados las decisiones ejecutivas de EASA AMC y GM al Reglamento 2019/947 en particular su última revisión consolidada (EASA, 2025) y los reglamentos que regulan el U-Space, que se examinan en la sección siguiente. En el caso ferroviario interviene además la normativa sectorial específica: la Ley 38/2015 del sector ferroviario y los reglamentos técnicos publicados por ADIF para inspecciones aéreas sobre infraestructura en explotación.

2.3 El concepto U-Space y sus servicios

2.3.1 Origen y motivación

El concepto U-Space fue articulado por primera vez en 2017 por la SESAR Joint Undertaking, a iniciativa de la Comisión Europea, mediante el documento de visión U-Space Blueprint (SESAR Joint Undertaking, 2017). Su posterior traslación al derecho positivo europeo se produjo mediante el paquete reglamentario de 2021. La filosofía es sencilla en el enunciado y compleja en la ejecución: definir un conjunto de servicios digitales que permitan integrar de manera segura, eficiente y escalable un volumen creciente de operaciones UAS, en su mayoría a baja altitud y a menudo en escenarios donde la separación tradicional ATC resulta ineficaz por su coste marginal. La aproximación es funcional, no geográfica: U-Space no es un espacio aéreo físicamente delimitado, sino un conjunto de servicios que pueden activarse sobre áreas concretas mediante declaración de los Estados miembros.

2.3.2 El paquete reglamentario europeo (2021)

El marco normativo materializó esa visión en abril de 2021 mediante tres reglamentos que entraron en vigor el 26 de enero de 2023. El Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 establece

la base jurídica del U-Space, define la figura del USSP y enumera cuatro servicios obligatorios y otros complementarios (Comisión Europea, 2021a). El Reglamento 2021/665 modifica el 2017/373 para asegurar la coordinación entre proveedores ATS y USSP en espacios aéreos controlados (Comisión Europea, 2021b). Finalmente, el Reglamento 2021/666 modifica el 923/2012 (SERA), introduciendo obligaciones de visibilidad electrónica para aeronaves tripuladas que vuelan dentro de un volumen declarado U-Space (Comisión Europea, 2021c).

Servicio	**Función esencial**
Identificación en red (Network Identification Service)	Difusión periódica de la identidad y la posición de la aeronave a las partes autorizadas.
Geo-conciencia (Geo-awareness)	Información sobre zonas geográficas UAS y restricciones aplicables al volumen operacional.
Autorización de vuelo UAS (UAS Flight Authorisation)	Tramitación digital del permiso de vuelo y desconflictado estratégico entre operaciones.
Información de tráfico (Traffic Information)	Provisión a las aeronaves no tripuladas de información sobre tráfico aéreo conocido en su volumen.

Tabla 1. Servicios obligatorios del U-Space y su función esencial

A los cuatro servicios obligatorios la regulación añade otros opcionales que los Estados miembros pueden requerir en función de la complejidad del entorno: información meteorológica, conformance monitoring, conflict resolution táctico, supervisión de la operación o coordinación con servicios de emergencia (Comisión Europea, 2021a, art. 5).

La validación técnica de estos servicios avanza actualmente mediante demostradores a gran escala impulsados por SESAR. Destaca SPATIO, que aborda la separación táctica y estratégica entre UAS bajo liderazgo de ENAIRE y con 23 socios de 10 países, y que en 2025 validó por primera vez en vuelo real su servicio de gestión dinámica de capacidad. Destaca también ENSURE, centrado en definir una interfaz común y un modelo de datos estandarizado entre U-space y la gestión del tráfico aéreo tripulado, con demostraciones de reconfiguración dinámica del espacio aéreo para operaciones prioritarias y de emergencia. CORUS-XUAM no es, en cambio, un demostrador: es el marco conceptual de referencia del sector, cuya cuarta edición del Concept of Operations (Barrado et al., 2024) sintetiza los resultados de estos y otros proyectos en un modelo operacional común para U-space.

2.3.3 La arquitectura USSP / CISP

Operativamente, el U-Space descansa sobre dos actores. El proveedor de servicios U-Space (USSP) es la entidad certificada que presta los servicios anteriores a los operadores UAS. El proveedor común de servicios de información (CISP, o Common Information Service Provider) actúa como agregador de la información compartida entre múltiples USSP y entre estos y los proveedores ATS, garantizando la coherencia de los datos sobre el espacio aéreo. Ambas figuras pueden ser públicas, privadas o mixtas, y su designación corresponde a los Estados miembros (Comisión Europea, 2021a, arts. 6 y 7). En España, AESA aprobó en 2024 las primeras directrices de certificación para USSP, con los primeros operadores en proceso de certificación al cierre de este trabajo (AESA, 2024).

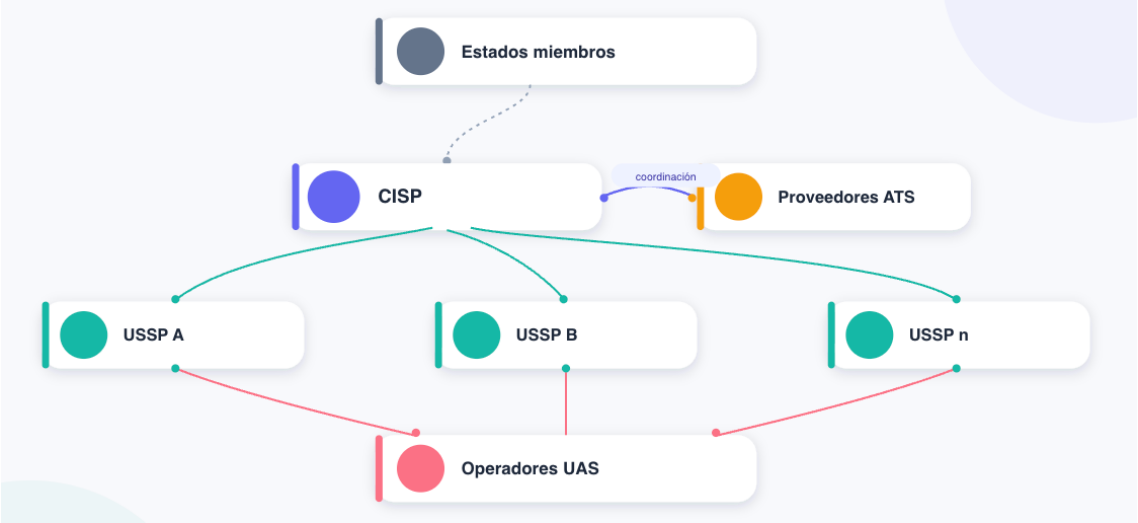


Ilustración 1. Arquitectura de prestación de servicios U-Space

2.4 La metodología SORA

2.4.1 Fundamentos y trayectoria

El Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 define el UAS Flight Authorisation Service como el servicio U-Space encargado de tramitar y conceder la autorización de vuelo dentro de un volumen U-Space declarado (Comisión Europea, 2021a, art. 5). Sin embargo, este servicio no evalúa por sí mismo el riesgo de la operación: se limita a verificar la compatibilidad del plan de vuelo con el resto del tráfico aéreo conocido y a comprobar que el operador dispone de la autorización operacional exigida por el marco general de la categoría específica. Esa autorización operacional, regulada por el artículo 11 del Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, exige que el operador acredite ante la autoridad competente (en España, AESA) que ha realizado una evaluación del riesgo de la operación y que ha adoptado las mitigaciones necesarias para reducirlo a un nivel aceptable (Comisión Europea, 2019b).

La metodología SORA, descrita en este apartado, es precisamente el instrumento técnico que permite cumplir con ese requisito: constituye un Medio Aceptable de Cumplimiento (Acceptable Means of Compliance, AMC1) reconocido por EASA para satisfacer el artículo 11, distinto de una

norma jurídica propiamente dicha (EASA, 2025). En consecuencia, antes de que un operador pueda obtener la autorización de vuelo a través del USSP correspondiente, debe haber completado previamente un proceso SORA (o, alternativamente, acogerse a un escenario estándar STS o a una autorización LUC) que demuestre que el riesgo de la operación es aceptable. Esta es la transición que vertebra el resto del capítulo: del marco regulador U-Space, centrado en la gestión digital del tráfico, a la metodología de evaluación del riesgo que condiciona si esa autorización puede concederse.

2.4.2 Pasos del proceso

La metodología SORA se articula en nueve pasos secuenciales que culminan con la definición de los Objetivos de Seguridad Operacional (Operational Safety Objectives, OSO) aplicables a la operación. En los capítulos 3 y 4 se utiliza una numeración condensada que agrupa el cálculo del GRC final con sus mitigaciones (Pasos 2 y 3 de la nomenclatura oficial) y el ARC con sus mitigaciones tácticas (Pasos 4, 5 y 6), siendo coherente con los resultados finales de SAIL y OSO. Los pasos según la estructura oficial de JARUS (2024) son los siguientes:

Paso 1. Definición del concepto operacional (ConOps) que recoge el tipo de operación, las plataformas empleadas, el entorno y los procedimientos previstos.

Paso 2. Determinación del Ground Risk Class (GRC) intrínseco a partir de la dimensión característica de la aeronave y de la densidad de población del área operacional.

Paso 3. Determinación del Final GRC tras aplicar mitigaciones estratégicas (M1A sheltering, M1B restricciones operacionales) y tácticas (M1C observación) y técnicas (M2 reducción de la energía del impacto).

Paso 4. Determinación del Air Risk Class (ARC) inicial a partir de la caracterización del entorno aéreo.

Paso 5. Aplicación de mitigaciones estratégicas del ARC.

Paso 6. Aplicación de mitigaciones tácticas (Tactical Mitigation Performance Requirements, TMPR) y determinación del ARC residual.

Paso 7. Determinación del nivel SAIL combinando el GRC final y el ARC residual mediante la matriz oficial.

Paso 8. Identificación de los OSO aplicables y de su nivel de robustez (bajo, medio o alto).

Paso 9. Identificación de las consideraciones de seguridad complementarias.

Densidad poblac. (pers/km²)	**1 m / 25 m/s**	**3 m / 35 m/s**	**8 m / 75 m/s**	**20 m / 120 m/s**	**40 m / 200 m/s**
Área controlada	1	1	2	3	3
< 5	2	3	4	5	6
< 50	3	4	5	6	7
< 500	4	5	6	7	8
< 5.000	5	6	7	8	9
< 50.000	6	7	8	9	10
> 50.000	7	8	—	—	—

Tabla 2 Matriz de determinación del iGRC intrínseco

La tabla recoge la matriz que permite determinar el iGRC intrínseco de una operación. Las columnas representan combinaciones de la dimensión característica de la aeronave, en metros, y su velocidad máxima de operación, en m/s, ordenadas de menor a mayor energía cinética potencial. Las filas representan la densidad de población del área operacional, expresada en habitantes por km². El valor resultante de cruzar la columna correspondiente a la plataforma empleada con la fila correspondiente a la densidad de población del entorno es el iGRC intrínseco, que constituye el punto de partida del análisis de riesgo en tierra desarrollado en los capítulos 3 y 4. Las celdas marcadas con un guion (—) indican combinaciones de tamaño, velocidad y densidad de población para las que el método GRC simplificado no proporciona un valor directo, al exceder sus límites de aplicabilidad.

2.4.3 Limitaciones de la metodología

SORA no está exenta de críticas. La literatura ha señalado que su aplicación presenta cierto grado de subjetividad en la valoración de las mitigaciones, especialmente las relacionadas con el sheltering y la observación visual del operador (Capitán et al., 2021). Del mismo modo, la versión actual ofrece todavía un tratamiento limitado de las operaciones BVLOS sobre infraestructuras lineales y de las operaciones multi-UAV coordinadas, escenarios que precisamente protagonizan este trabajo. Esta limitación se manifiesta concretamente en el caso ferroviario (sección 4.6), donde la evaluación del riesgo en el tramo próximo a la Base Aérea de Alcantarilla ha requerido la aplicación de mitigaciones ad hoc no contempladas explícitamente en los documentos de orientación de EASA para SORA 2.5. La versión 2.5 introduce mejoras en la cuantificación del riesgo en el aire mediante el concepto de Encounter Category, pero su impacto sobre operaciones agrícolas VLOS en espacio aéreo no controlado es marginal (EASA, 2025).

2.5 Automatización en operaciones UAS: estado del arte

La automatización del tráfico UAS puede cuantificarse: la carga cognitiva del operador remoto crece de manera no lineal con el número de aeronaves supervisadas simultáneamente (Cummings y Mitchell, 2007). Un estudio con expertos en sistemas no tripulados encontró que un operador experimentado puede supervisar eficazmente hasta 15 UAS con niveles moderados de automatización, pero el número se reduce a un máximo de tres sistemas cuando el operador debe ejercer control activo sobre la misión y la carga útil de cada uno (Porat et al., 2016). Más allá de ese umbral, la única vía para sostener la actividad sin degradar la seguridad consiste en

delegar funciones rutinarias a sistemas automatizados, conservando el operador en el bucle de las decisiones críticas mediante el paradigma Human-on-the-loop (Sheridan, 1992; Cummings, 2014).

Esta delegación se concreta en dos planos. En el plano táctico, los sistemas Detect and Avoid (DAA) automatizan la separación entre aeronaves utilizando información cooperativa (ADS-B, Remote ID, FLARM) y no cooperativa (radar, cámaras EO/IR, LiDAR ligero). En el plano estratégico, los servicios U-Space realizan la gestión estratégica del conflicto entre planes de vuelo antes del despegue mediante algoritmos de gestión de demanda y capacidad. Ambos planos se integran en una arquitectura jerárquica que ha sido modelada en proyectos europeos como BUBBLES (Pastor et al., 2022), DACUS, centrado en el equilibrio entre demanda y capacidad del espacio aéreo urbano, y su continuación SPATIO, orientada a la gestión de la separación táctica y estratégica entre UAS, así como CORUS-XUAM (Barrado et al., 2024).

En operaciones multi-UAV la coordinación adquiere una dimensión adicional. Más allá de la simple gestión del conflicto, el sistema debe distribuir tareas, redistribuir cobertura cuando una aeronave abandona temporalmente la misión por recarga o avería y, eventualmente, reorganizar el patrón de vuelo ante cambios meteorológicos. Las aproximaciones algorítmicas más extendidas son las basadas en optimización por algoritmos genéticos (Roberge et al., 2018), por enjambres de partículas (PSO; Kennedy y Eberhart, 1995) y, más recientemente, por aprendizaje por refuerzo profundo (Yan et al., 2022). En este trabajo no se entra en el detalle algorítmico que excede los objetivos del Grado en Gestión Aeronáutica, pero sí se asume que cualquier escenario avanzado multi-UAV requiere un Fleet Coordination System (FCS) capaz de ejecutar estos algoritmos en tiempo real. Un desarrollo tecnológico de especial relevancia para los dos casos de uso de este trabajo es el paradigma drone-in-a-box (DiB), también denominado remote drone infrastructure o estación de anidamiento autónomo. Esta arquitectura, en la que el dron reside, recarga y despega desde una estación fija sin intervención humana, fue introducida comercialmente por Percepto (Israel) en 2017 y ha sido adoptada posteriormente por fabricantes como Skydio (EE.UU.), DJI con el sistema Dock, Hextronics y Fotokite, entre otros. Su aplicación a la inspección de infraestructura lineal está documentada en el contexto ferroviario: el proyecto piloto de Network Rail (Reino Unido) con la plataforma Percepto Arc en 2022 demostró la viabilidad de inspeccionar secciones de vía de 10–15 km por jornada desde una única estación fija sin operario (Percepto, 2022, citado en Aela et al., 2024); el proyecto VoloDrone de Volocopter y Deutsche Bahn en Alemania, si bien orientado a carga logística ferroviaria, validó el marco operativo BVLOS sobre infraestructura ferroviaria en el año 2023 (Deutsche Bahn / Volocopter, 2023, citado en Aela et al., 2024). En el ámbito español, el proyecto piloto de Ineco y HelixNorth sobre la red de ADIF (Ineco, 2025) representa el antecedente más directo del modelo propuesto en el capítulo 4, si bien en fase experimental y sin contrato comercial activo al cierre de este trabajo. Esta convergencia entre el paradigma DiB y la operación BVLOS sobre infraestructura lineal define el espacio de soluciones en el que se inscribe el caso ferroviario propuesto. El DJI Dock 2 representa la implementación comercialmente más madura de este paradigma en el segmento de drones de inspección de menos de 25 kg, con más de 2.000 unidades desplegadas en proyectos industriales a escala global en 2025 según datos del fabricante (DJI Enterprise, 2025a). Esta madurez reduce significativamente el riesgo tecnológico del modelo propuesto respecto a las generaciones

anteriores de estaciones de anidamiento, cuya fiabilidad operativa en entornos exteriores no climatizados era inferior.

2.6 Limitaciones tecnológicas y operacionales actuales

Cualquier discusión realista sobre el futuro del sector debe partir del reconocimiento de las restricciones todavía vigentes. Cuatro merecen atención particular en el contexto de este trabajo

Autonomía energética. Las baterías de litio-polímero comerciales ofrecen densidades energéticas en torno a 250–280 Wh/kg, claramente insuficientes para misiones BVLOS prolongadas con plataformas multirrotor (Boukoberine et al., 2019). Las pilas de combustible de hidrógeno alcanzan 1.000–2.000 Wh/kg considerando el tanque, pero presentan aún limitaciones de coste unitario, infraestructura de repostaje y certificación.

Detect and Avoid no cooperativo. La detección y evitación de aeronaves tripuladas que no transmiten ADS-B sigue siendo un reto, y se agrava con la presencia de aves. Un UAS pequeño puede ser percibido por un ave como amenaza o como presa, con reacciones difíciles de prever (SKYbrary Aviation Safety, 2025). El problema afecta a varias tecnologías de sensor por igual: en el radar, la sección y la firma micro-Doppler de un pájaro planeando y de un dron de rotores de plástico son casi indistinguibles (Torvik et al., 2016), y en sistemas basados en escáner láser, discriminar aves de drones mediante el análisis de la polarización del eco óptico sigue siendo, según sus propios desarrolladores, un reto fundamental para minimizar las falsas alarmas (Wojtanowski et al., 2021). Las cámaras EO/IR con visión artificial y los receptores acústicos ofrecen mejoras parciales, pero ninguna tecnología sustituye todavía con garantías al observador humano en operaciones BVLOS sobre rutas habituales de aviación general, ni separa con fiabilidad la fauna del tráfico aéreo real (Yu y Zhang, 2015).

Robustez de las comunicaciones. La pérdida del enlace C2 es uno de los modos de fallo más frecuentes y debe abordarse mediante redundancia. La combinación de redes 4G/5G públicas, enlaces dedicados Sub-1 GHz y comunicaciones satelitales LEO emerge como solución híbrida, aunque encarece el coste por aeronave.

Madurez de los USSP. Aunque el marco regulatorio europeo está vigente desde 2023, el número de USSP certificados sigue siendo limitado y la cobertura geográfica está concentrada en áreas piloto. Esta es probablemente la limitación más relevante para los escenarios avanzados discutidos en este trabajo.

Estas limitaciones no son barreras infranqueables, pero condicionan la viabilidad inmediata de los escenarios avanzados descritos en los capítulos 3 y 4. Cada limitación se discute en su contexto operacional al hilo del análisis posterior.

3. Caso de uso agrícola: aplicación de fitosanitarios en Lorca (Murcia)

3.1 Definición del caso de uso

El primer caso de uso tiene por objeto presentar un nuevo modelo de negocio basado en la prestación de servicios de fumigación agrícola mediante drones en la Región de Murcia. La propuesta no describe una empresa existente ni replica un modelo ya establecido, sino que parte del análisis de los operadores que actualmente desarrollan esta actividad en España para identificar sus limitaciones estructurales y proponer un modelo evolucionado que las supere mediante la incorporación progresiva de automatización y digitalización.

La Región de Murcia se adopta como entorno de referencia por razones objetivas: con apenas el 2,2 % de la superficie nacional concentra cerca del 17 % de las exportaciones agroalimentarias españolas (MAPA, 2023), con una elevada superficie de regío intensivo dedicada a cultivos como cítricos, frutales de hueso, hortícolas de ciclo corto y almendro. Esta combinación de alta densidad de cultivo, diversidad agronómica y demanda contrastada de servicios fitosanitarios especializados convierte a la región en un escenario idóneo para validar el modelo. Sin embargo, la propuesta está concebida desde su origen para ser escalable y replicable en otras zonas agrícolas de España con características similares.

La actividad nuclear del nuevo modelo es la aplicación aérea de productos fitosanitarios legalmente autorizados en España, utilizando como plataforma el DJI Agras T100, el dron agrícola de mayor capacidad y rendimiento disponible comercialmente en 2026. Frente al operador convencional, que opera con procedimientos manuales, escasa digitalización y una fuerte dependencia del trabajo humano en todas las fases del proceso, el nuevo modelo incorpora automatización en las fases de mayor carga operativa: la planificación y ejecución del vuelo, la gestión administrativa de autorizaciones y la generación de registros de tratamiento. El objetivo no es eliminar al operador humano sino transformar su rol, pasando de pilotar activamente a supervisar y tomar decisiones críticas, lo que permite atender un mayor volumen de operaciones con menos personal y a un coste unitario inferior.

La comparación que articula este caso de uso se establece, por tanto, entre dos modelos empresariales basados ambos en el uso de drones: el modelo convencional, representado por el perfil típico de un operador español que ya fumiga con drones pero sin automatización significativa, y el nuevo modelo propuesto, que incorpora herramientas digitales disponibles en el mercado para optimizar la operativa y escalar el negocio sin incrementar la plantilla de forma proporcional.

3.2 Entorno operacional y características de la operación

3.2.1 Descripción del entorno rural

Las operaciones objeto de este caso de uso se desarrollan sobre entornos rurales de baja densidad de población, característicos de las zonas de regío intensivo de la Región de Murcia. Las parcelas presentan geometría rectangular o trapezoidal, con superficies comprendidas entre 5 y 30 ha, separadas por caminos agrícolas, acequias y lindes con vegetación arbustiva de altura moderada. El terreno es mayoritariamente llano o con pendientes suaves inferiores al 5 %, lo

que favorece el vuelo a baja altura sobre el cultivo. Los cultivos objetivo más representativos de la región son brócoli, lechuga, alcachofa, cítricos, frutales de hueso como albaricoquero y melocotonero, y almendro, con diferentes ciclos estacionales que permiten distribuir la carga de trabajo a lo largo de prácticamente todo el año.

La densidad de población del área operacional es inferior a 50 habitantes por km², lo que corresponde al descriptor «ligeramente poblado» de la metodología SORA (JARUS, 2024). La presencia ocasional de trabajadores agrícolas en las parcelas y en los caminos colindantes constituye el principal factor de riesgo en tierra, que se gestiona mediante coordinación previa con el titular de la explotación y delimitación de la zona operacional antes del despegue.

3.2.2 Condiciones meteorológicas y ventana operativa

La Región de Murcia se caracteriza por un clima semiárido mediterráneo con veranos cálidos y secos, lo que favorece la disponibilidad de ventanas operativas prolongadas durante los meses de campaña. No obstante, la aplicación de fitosanitarios impone restricciones meteorológicas específicas: se descarta el vuelo cuando la velocidad del viento supera los 5 m/s en el nivel del cultivo (para evitar deriva del producto), cuando la temperatura supera los 30 °C (para prevenir la degradación fotolítica del producto activo) y cuando existe probabilidad de precipitación en las dos horas siguientes al tratamiento.

En la práctica, la ventana operativa óptima en verano se sitúa entre las 06:00 y las 10:00 horas, y eventualmente entre las 19:00 y las 21:00 horas, coincidiendo con las condiciones de menor viento y temperatura moderada. En primavera y otoño la ventana operativa se amplía significativamente, permitiendo jornadas de hasta seis horas efectivas de trabajo continuo. Se estima una disponibilidad operativa de aproximadamente 200 días al año, considerando festivos, condiciones meteorológicas adversas y periodos de mantenimiento planificado. Esta estimación es conservadora respecto a la disponibilidad meteorológica bruta del área: la Región de Murcia registra una media de 300 días de sol al año y una frecuencia de episodios de viento superior a 5 m/s del 18 % de los días del año según los datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2023), lo que implica que la restricción operativa por viento reduce la disponibilidad teórica en aproximadamente 54 días al año, quedando una ventana operativa bruta de ~246 días, de los cuales el modelo descuenta 46 días adicionales por festivos, mantenimiento y restricciones fitosanitarias estacionales hasta alcanzar los 200 días utilizados en el análisis económico.

3.2.3 Restricciones regulatorias aplicables

Desde el punto de vista regulatorio, la operación con el DJI Agras T100 se encuadra en la categoría específica del Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, dado que el MTOM de la plataforma con carga líquida supera ampliamente los 25 kg que delimitan la categoría abierta (Comisión Europea, 2019b). La autorización operacional se obtiene ante la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) mediante la aplicación de la metodología SORA, que se desarrolla en la sección 3.7 de este capítulo.

Las zonas de operación se sitúan en espacio aéreo no controlado por debajo de los 30 m sobre el nivel del terreno. Con carácter general, las zonas rurales de regío de la Región de Murcia no

presentan restricciones UAS publicadas que afecten a este tipo de operaciones agrícolas, conforme a la información disponible en el geoportal de zonas geográficas UAS de AESA (AESA, 2024), sin perjuicio de la verificación caso a caso mediante la herramienta ENAIRE Drones antes de cada campaña.

Adicionalmente, la aplicación aérea de productos fitosanitarios está sujeta a las disposiciones del Real Decreto 1311/2012, que establece el marco de actuación para el uso sostenible de productos fitosanitarios en España y regula las aplicaciones aéreas como excepción justificada. El operador deberá contar con autorización expresa de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia para cada campaña, estar inscrito en el Registro Oficial de Productores y Operadores (ROPO) en la categoría de tratamientos fitosanitarios, y disponer del carné de piloto aplicador de fitosanitarios con drones exigido por el artículo 18 del citado Real Decreto. Los registros de tratamiento generados automáticamente por el sistema del DJI Agras T100 son compatibles con las obligaciones documentales del cuaderno de campo digital requerido por la normativa de condicionalidad de la PAC.

3.3 El modelo convencional: operador de drones agrícolas actual

3.3.1 Descripción del operador de referencia

El modelo convencional que sirve de línea base en este caso de uso corresponde al perfil típico de una empresa española que ya presta servicios de fumigación agrícola con drones en la actualidad. Esta caracterización se apoya en una visita realizada a las instalaciones de Transal Lorca, empresa de servicios con drones agrícolas ubicada en el propio municipio de Lorca, donde mantuve una conversación con su gerente sobre la operativa diaria, la estructura de costes y los márgenes reales del negocio. Esta visita permitió contextualizar y validar cualitativamente la caracterización del modelo convencional presentada en este apartado, si bien los datos cuantitativos empleados en el análisis económico del capítulo 5 (tarifas, rendimientos, estructura de OPEX) proceden de fuentes de mercado y catálogos de fabricantes, y no de cifras específicas de esta empresa. Corresponde al tipo de empresa que hoy opera realmente en este mercado en España, caracterizada por disponer de una flota de drones agrícolas de gama media-alta, contar con pilotos certificados e inscritos en el ROPO, y operar con los procedimientos habituales del sector sin incorporar herramientas significativas de automatización o digitalización más allá de las que ofrecen de serie los propios equipos.

La flota de referencia del modelo convencional se compone de dos plataformas DJI Agras T50, el dron agrícola de pulverización más extendido entre los operadores profesionales españoles en 2025–2026. Con una capacidad de depósito de 40 litros de líquido, sistema de pulverización dual y un rendimiento operativo de entre 10 y 16 ha/h en condiciones de campo, el T50 representa el estado del arte comercial accesible para un operador de tamaño medio. La estructura de personal se compone de dos pilotos a tiempo completo, cada uno responsable de una plataforma, que asumen también las funciones de mantenimiento de equipos, gestión comercial y administración del negocio.



Ilustración 2. Esquema del modelo convencional agrícola DJI Agras T50



Ilustración 3. DJI Agras T50

3.3.2 Operativa del modelo convencional

El ciclo operativo del operador convencional es esencialmente manual en todas sus fases. La planificación de cada misión se realiza en campo el mismo día de la operación, configurando manualmente los parámetros de vuelo en el controlador del dron. La tramitación de las declaraciones de vuelo ante AESA se gestiona de forma individual para cada operación, sin integración con sistemas digitales de gestión. Los registros de tratamiento se cumplimentan en papel o mediante hojas de cálculo genéricas, sin trazabilidad automática.

Durante la operación cada piloto supervisa activamente su dron, gestionando manualmente los ciclos de recarga de batería y depósito de producto, y ajustando la trayectoria si las condiciones de viento o la geometría de la parcela lo requieren. La capacidad operativa queda por tanto limitada por el número de pilotos disponibles: con dos pilotos y dos drones T50, el rendimiento conjunto se sitúa entre 100 y 160 ha por jornada de cinco horas efectivas en función de las condiciones de campo y la geometría de las parcelas. Para el análisis económico se utiliza el valor de referencia de 150 ha/jornada, correspondiente al extremo alto del rango (15 ha/h por plataforma) alcanzable en condiciones de parcelas de geometría regular, lo que equivale a una capacidad máxima anual de aproximadamente 30.000 ha considerando 200 días operativos al año.

3.3.3 Limitaciones estructurales del modelo convencional

Este modelo presenta una serie de limitaciones que condicionan su competitividad y su capacidad de crecimiento. La primera es la dependencia lineal entre volumen de operaciones y plantilla: cada nueva parcela o cliente adicional que supere la capacidad de los dos pilotos exige contratar más personal, incrementando los costes fijos de forma proporcional. La segunda es la ausencia de trazabilidad digital: sin registros automáticos de cada tratamiento, la empresa no puede ofrecer a sus clientes informes de calidad ni demostrar el cumplimiento normativo de forma ágil. La tercera es la carga administrativa manual: la gestión de autorizaciones, declaraciones de vuelo y registros fitosanitarios consume tiempo productivo que en el nuevo modelo queda automatizado. Finalmente, la multifuncionalidad de los pilotos, que asumen simultáneamente roles operativos, comerciales y administrativos, genera una dependencia crítica de personas clave y limita la escalabilidad del negocio.

3.4 Descripción del sistema UAS propuesto

3.4.1 Selección y justificación de la plataforma

El dron elegido para el nuevo modelo es el DJI Agras T100, la plataforma agrícola de mayor capacidad disponible en el mercado en 2026. La elección se fundamenta en tres criterios técnicos cuantificables: mayor volumen de carga útil (100 litros frente a los 40 del T50), rendimiento horario hasta 2,5 veces superior y menor número de interrupciones por recarga por jornada.



Ilustración 4. Esquema del sistema UAS propuesto con DJI Agras T100



Ilustración 5. DJI Agras T100 en operación de pulverización



Ilustración 6. DJI Agras T100 sobre cultivo arbóreo



Ilustración 7. Flujo operacional del modelo agrícola con DJI Agras T100

El T100 cuenta con un depósito de 100 litros de líquido, más del doble que el T50 del modelo convencional, lo que reduce significativamente el número de interrupciones por recarga durante una misión. Su sistema de pulverización de cuatro boquillas cubre un ancho de trabajo de entre 8 y 10 metros, y su rendimiento operativo en condiciones de campo se sitúa entre 30 y 40 ha/h, frente a las 10–16 ha/h del T50. El sistema de radar omnidireccional y el sensor LiDAR de

seguimiento de terreno permiten mantener una altura de vuelo constante sobre el cultivo sin intervención manual del piloto, lo que es especialmente relevante en parcelas con irregularidades del terreno.

3.4.2 Capacidades de automatización del sistema

A diferencia del modelo convencional, donde el piloto gestiona activamente cada fase del vuelo, el DJI Agras T100 incorpora de serie un conjunto de funcionalidades que hacen posible el nivel de automatización propuesto en este modelo. En primer lugar, la ejecución autónoma de rutas preprogramadas: una vez cargada la misión desde el software de planificación, el dron despega, ejecuta la ruta completa y aterriza sin intervención del piloto. En segundo lugar, el retorno automático a la base cuando el depósito se vacía o la batería baja del umbral configurado, con reanudación automática desde el punto exacto donde se interrumpió la misión. En tercer lugar, la gestión del vuelo mediante radar omnidireccional y LiDAR que ajusta automáticamente la altura sobre el cultivo sin intervención del piloto.

Estas capacidades permiten que un único piloto supervisor gestione el T100 de forma autónoma, transformando su rol de piloto activo a supervisor de operaciones. El piloto interviene únicamente para autorizar el despegue, gestionar las recargas físicas de batería y producto en campo, y tomar decisiones ante cualquier incidencia que el sistema no pueda resolver de forma autónoma.

3.4.3 Integración con herramientas digitales de gestión

El nuevo modelo incorpora una capa de software de gestión que conecta la operativa de vuelo con la gestión administrativa y la entrega de resultados al cliente. La planificación de misiones se realiza con antelación mediante DJI Terra, que genera automáticamente las rutas optimizadas para cada parcela a partir de la cartografía disponible. La tramitación de las declaraciones de vuelo se integra con la plataforma ENAIRE Drones, reduciendo la carga administrativa manual que en el modelo convencional recae sobre los pilotos. Tras cada operación, el sistema genera automáticamente un registro de tratamiento georreferenciado que incluye la superficie cubierta, el volumen de producto aplicado, la hora y las condiciones de vuelo, documento que se entrega al cliente como parte del servicio y que es compatible con las obligaciones del cuaderno de campo digital de la PAC.

3.5 Desarrollo operativo de la misión

3.5.1 Fase 1: Planificación

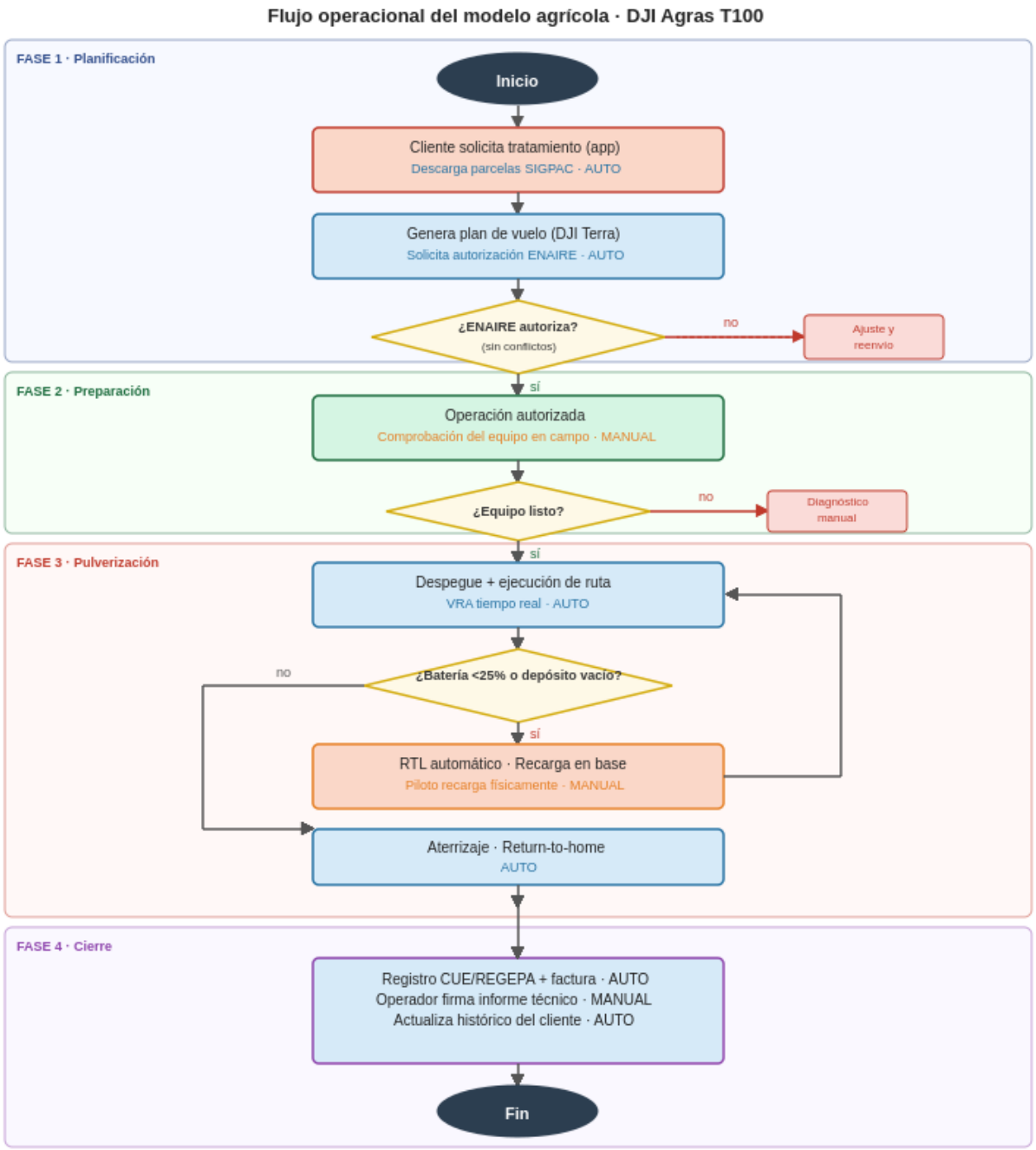


Ilustración 8. Flujo operacional del modelo agrícola con DJI Agras T100

El ciclo operativo se inicia con la solicitud del cliente a través de la plataforma de gestión del operador. A partir de los datos de la parcela, el software DJI Terra genera automáticamente las rutas de vuelo optimizadas, calculando la trayectoria, la dosis de aplicación y la hora óptima en función de las condiciones meteorológicas previstas. La declaración de vuelo se tramita

automáticamente a través de ENAIRE Drones, eliminando la carga administrativa manual que en el modelo convencional consume tiempo productivo del piloto.

Frente a esto, en el modelo convencional la planificación se realiza en campo el mismo día de la operación, el piloto configura manualmente los parámetros de vuelo en el controlador y tramita la declaración de vuelo de forma individual para cada operación, sin integración digital.

3.5.2 Fase 2: Operación

Una vez en campo, el piloto del nuevo modelo realiza la única intervención activa de toda la misión: autorizar el despegue. A partir de ese momento el DJI Agras T100 ejecuta la ruta de forma autónoma, manteniendo la altura de vuelo constante sobre el cultivo mediante el sensor LiDAR y ajustando la dosificación automáticamente. Cuando el depósito se vacía o la batería baja del umbral configurado, el dron regresa automáticamente al punto de base, el piloto realiza la recarga física de batería y producto, y el sistema reanuda la misión desde el punto exacto donde se interrumpió, sin necesidad de reconfigurar nada manualmente.

En el modelo convencional cada piloto supervisa activamente su propio dron durante todo el vuelo, gestiona manualmente cada ciclo de recarga y marca de forma manual el punto de reanudación, lo que genera tiempos improductivos significativos y limita la capacidad operativa a un único dron por piloto.

3.5.3 Fase 3: Cierre

Al finalizar la misión, el sistema del T100 genera automáticamente un registro de tratamiento georreferenciado con la superficie cubierta, el volumen de producto aplicado, la hora y las condiciones de vuelo. Este documento se entrega al cliente como parte del servicio y es compatible con las obligaciones del cuaderno de campo digital de la PAC, aportando trazabilidad completa sin trabajo adicional del operador.

En el modelo convencional el registro se cumplimenta en papel o Excel y la entrega al cliente se realiza de forma verbal o por correo electrónico, sin trazabilidad automática ni formato estandarizado.

3.6 El modelo con integración U-Space

3.6.1 Qué es U-Space y por qué es relevante para este modelo

Tal como se ha descrito en el capítulo 2, U-Space es el marco europeo de gestión digital del tráfico de drones definido por el Reglamento (UE) 2021/664. En el contexto del nuevo modelo agrícola propuesto, la integración U-Space aporta valor operativo inmediato: permite sustituir la tramitación manual de declaraciones de vuelo por un proceso automatizado a través del USSP,

recibir información de tráfico en tiempo real y generar registros de vuelo conformes con los requisitos regulatorios sin intervención adicional del operador.

3.6.2 Servicios U-Space aplicables a este caso de uso

De los servicios obligatorios definidos en el artículo 5 del Reglamento (UE) 2021/664, los que resultan directamente aplicables a las operaciones agrícolas del nuevo modelo son los siguientes. El Network Identification Service garantiza que tanto el operador como el DJI Agras T100 están correctamente identificados ante el USSP y difunden su posición en tiempo real durante el vuelo. El UAS Flight Authorisation Service permite tramitar automáticamente el plan de vuelo ante el USSP, que verifica la compatibilidad con el resto del tráfico y emite la autorización o deniega el vuelo si existe conflicto, sin intervención manual del piloto más allá de la confirmación final. El Traffic Information Service permite al USSP proporcionar al operador información sobre tráfico aéreo conocido en su volumen operacional, facilitando la detección temprana de conflictos potenciales. Finalmente, el Geo-awareness Service proporciona al operador información actualizada sobre las restricciones del espacio aéreo en la zona de operación, evitando incursiones involuntarias en espacios restringidos (Comisión Europea, 2021a, art. 5).

3.6.3 Situación actual en España y hoja de ruta

En España, el despliegue de la infraestructura U-Space está actualmente en fase de implementación, con ENAIRE como proveedor de referencia de los servicios de base. La plataforma ENAIRE Drones ya permite la notificación y gestión de vuelos UAS en tiempo real, y constituye el punto de entrada al ecosistema U-Space para los operadores españoles. El nuevo modelo propuesto adopta esta plataforma como herramienta principal de gestión de vuelos desde la fase de arranque, lo que asegura compatibilidad con los requisitos regulatorios actuales y posiciona a la empresa para aprovechar los servicios avanzados U-Space a medida que estén disponibles comercialmente.

3.7 Análisis SORA de la operación con drones

El análisis de riesgo de la operación se realiza aplicando la metodología SORA en su versión 2.5, incorporada por EASA como AMC1 al artículo 11 del Reglamento (UE) 2019/947 mediante la Decisión Ejecutiva ED Decision 2025/018/R (EASA, 2025). Se documentan los cinco bloques principales: ConOps, GRC, ARC, SAIL y OSO.

3.7.1 Concepto de Operaciones (ConOps)

Operación de aplicación aérea de productos fitosanitarios legalmente autorizados sobre parcelas agrícolas en entorno rural de la Región de Murcia. Se opera con un DJI Agras T100 en régimen VLOS, a una altura máxima de 10 m sobre el cultivo y altura absoluta máxima de 30 m

sobre el terreno. La velocidad de operación es de entre 5 y 8 m/s. El MTOM del T100 con carga líquida completa es de 101,6 kg (DJI Agriculture, 2025a). La densidad de población es inferior a 50 hab/km².

3.7.2 Paso 1 — iGRC intrínseco

Con el DJI Agras T100 (MTOM = 101,6 kg con carga completa; MTOM en vacío ∼51 kg; DJI Agriculture, 2025a) operando sobre zona escasamente poblada (<50 hab/km²) en régimen VLOS, la asignación de columna en la tabla iGRC de SORA 2.5 se justifica como sigue. La dimensión característica del sistema de rotores del T100 es de aproximadamente 2,9 m; se adopta la columna «3–8 m» de forma conservadora, dado que la envergadura total del sistema en configuración operativa (incluyendo brazos de pulverización desplegados) supera los 3 m. La energía cinética de impacto a la velocidad máxima de operación de 8 m/s es de ∼3.251 J (E = ½mv² = 0,5 × 101,6 × 64), muy superior al umbral de la columna «3–8 m» y coherente con una plataforma de clase energética alta. Conforme a la tabla iGRC del SORA 2.5 —columna 3–8 m / velocidad ≤8 m/s, fila <50 hab/km²—: iGRC intrínseco = 5 (JARUS, 2024). Esta elección conservadora evita subestimar el riesgo de impacto de una plataforma de más de 100 kg.

Parámetro	**Valor**
MTOM	101,6 kg (con carga completa)
Energía cinética	Alta (>34 J)
Área	Rural, <50 hab/km²
Operación	VLOS, zona controlada
iGRC intrínseco	5

Tabla 3. Parámetros de cálculo del iGRC intrínseco del caso agrícola

3.7.3 Paso 2 — GRC final

M1B (restricción operacional de trayectoria): perímetro de seguridad de 30 m con señalización y coordinación previa con el titular de la explotación; robustez media, ya que el operador puede garantizar la restricción en la parcela tratada pero no la ausencia de personas en parcelas colindantes fuera de su control directo; reducción de 1 punto. M2 (reducción de la energía del impacto): vuelo a máx. 10 m AGL sobre el cultivo; robustez baja. Conforme a la tabla de Final GRC de SORA 2.5, la mitigación M2 a nivel de robustez baja no produce una reducción del GRC, ya que no alcanza el umbral mínimo de robustez media requerido para la bonificación correspondiente, se documenta en el Safety Portfolio sin aplicar reducción. La única reducción aplicada es la de M1B (−1 punto). GRC final = 4 ≤ 7. Se puede continuar con el proceso SORA.

3.7.4 Paso 3 — ARC inicial

Espacio aéreo no controlado clase G, por debajo de 30 m AGL, entorno rural alejado de aeródromos. ARC inicial = ARC-a (riesgo aéreo muy bajo).

3.7.5 Paso 4 — ARC residual

Restricción geográfica a polígonos predefinidos con separación mínima de 500 m a aeródromos; robustez media. ARC residual = ARC-a. No se requieren mitigaciones tácticas adicionales.

3.7.6 Paso 5 — SAIL

GRC final = 4 + ARC residual = ARC-a: SAIL = II. Conforme a la Decisión ED 2025/018/R de EASA, las operaciones VLOS SAIL II se benefician de requisitos de documentación reducidos, lo que es favorable para el modelo propuesto.

3.7.7 Paso 6 — OSOs aplicables (SAIL II)

OSO	Descripción	Robustez
OSO#01	El UAS es apto para la operación prevista	Baja
OSO#02	Operador competente y autorizado	Baja
OSO#03	Procedimientos operacionales documentados	Baja
OSO#05	Planificación de vuelo adecuada	Baja
OSO#06	Restricción geográfica activa	Baja
OSO#13	Capacidad de aterrizaje de emergencia	Baja

Tabla 4. Objetivos de seguridad operacional aplicables al caso agrícola

3.7.8 Paso 7 — TMPR

Con ARC residual = ARC-a no se requieren capacidades DAA. El piloto mantiene VLOS en todo momento, lo que constituye la mitigación táctica suficiente.

3.7.9 Paso 8 — Consideraciones de seguridad complementarias.

Las consideraciones de seguridad complementarias identificadas para esta operación son las siguientes. Primero, la compatibilidad electromagnética: dado que la operación se desarrolla sobre cultivos tratados con productos fitosanitarios y en proximidad a instalaciones de riego por goteo, se verificará que las emisiones del sistema de telemetría del T100 no interfieren con los sistemas de control del riego automatizado existentes en las explotaciones. Segundo, el impacto del rotor wash sobre el cultivo: a 10 m AGL el rotor wash del T100 puede causar deriva del producto por encima del umbral de 5 m/s en condiciones de viento cruzado; el sistema de sensores de viento embarcados activa automáticamente el RTL cuando se supera el límite

establecido en el ConOps, sin necesidad de intervención del piloto. Tercero, el protocolo de pérdida de enlace C2: ante una pérdida de señal superior a 10 segundos, el T100 ejecuta automáticamente la secuencia de aterrizaje de emergencia en el punto de base más próximo previamente configurado, en coherencia con el OSO#13.

3.7.10 Implicaciones económicas del SORA

Concepto	Coste estimado	Periodicidad
Autorización AESA (cat. específica)	0 € (tramitación gratuita)	Por campaña
Formación piloto categoría específica (STS-01)	500 – 1.200 €	Cada 5 años
Seguro RC para RPAS agrícola	400 – 900 €/año	Anual
Carné aplicador fitosanitarios	300 – 500 €	Cada 5 años
ConOps y documentación SORA	1.500 – 3.000 €	Una vez
Mantenimiento Safety Portfolio	500 – 1.000 €/año	Anual

Tabla 5. Costes regulatorios y de documentación SORA del caso agrícola

3.8 Modelo de negocio

3.8.1 Estructura de la empresa y personal

El nuevo modelo de negocio se articula en torno a una organización reducida en su fase de arranque pero diseñada desde el inicio para crecer de forma modular. En la Fase 1 (años 1–2) la plantilla la componen un director de operaciones que ejerce también de piloto senior y asume la gestión comercial, y un operario de campo a tiempo completo responsable de las recargas físicas y del apoyo logístico en campo. Las funciones de procesado de datos y administración se externalizan parcialmente hasta que el volumen de actividad justifique su internalización.

A partir de la Fase 2 (años 2–4), conforme crece la cartera de clientes, se incorpora un segundo piloto y se internalizan las funciones administrativas. La clave del modelo es que los costes de estructura no crecen de forma proporcional al volumen de operaciones, lo que permite mejorar el margen progresivamente sin necesidad de duplicar la plantilla.

3.8.2 Servicios y tarifas

La actividad principal del modelo es la aplicación aérea de productos fitosanitarios legalmente autorizados mediante el DJI Agras T100, prestada a cooperativas agrícolas y explotaciones individuales en régimen de contrato de campaña. La tarifa de referencia es de 42 €/ha, superior a la del operador convencional (35 €/ha), diferencia justificada por el valor añadido que aporta el nuevo modelo: entrega de un informe de tratamiento georreferenciado con trazabilidad

completa, compatible con las obligaciones del cuaderno de campo digital de la PAC, y mayor capacidad de respuesta ante ventanas de tratamiento urgentes.

3.8.3 Propuesta de valor frente al modelo convencional

El nuevo modelo se diferencia del operador convencional en tres dimensiones. En primer lugar, la eficiencia operativa: con un único T100 supervisado por un solo piloto se pueden atender entre 30 y 40 ha/h frente a las 10–16 ha/h de un T50 con piloto activo, lo que permite servir más superficie con menos personal. En segundo lugar, la calidad del servicio: la trazabilidad automática del tratamiento y la entrega de informes digitales posicionan al nuevo modelo en un segmento de mayor valor percibido por el cliente. En tercer lugar, la escalabilidad: la arquitectura del modelo permite crecer hacia nuevas zonas geográficas sin duplicar los costes de estructura, lo que lo convierte en una base sólida para construir una empresa de servicios UAS agrícolas con presencia regional y posteriormente nacional. Los resultados de este análisis se cuantifican en el capítulo 5, donde se demuestra que el nuevo modelo supera al convencional en rentabilidad en todos los escenarios de ocupación evaluados.

4. Caso de uso ferroviario: inspección del corredor Murcia–Águilas

Hipótesis de trabajo y limitaciones técnicas del modelo

El modelo de inspección ferroviaria propuesto en este capítulo descansa sobre dos hipótesis de trabajo que reconocen limitaciones técnicas actuales del sistema y que condicionan su implementación comercial inmediata. Ambas se refieren a capacidades que la tecnología disponible no ofrece todavía en su configuración comercial, pero que se inscriben en las líneas de desarrollo que los fabricantes vienen recorriendo, y se declaran de forma explícita para delimitar con honestidad el alcance de la propuesta.

La primera hipótesis concierne al emparejamiento entre dron y estación de carga. En su configuración actual, el sistema DJI Dock 2 establece un vínculo fijo entre cada estación y el dron que tiene asignado, de modo que una aeronave no puede recargar en una estación distinta a la suya. La documentación técnica del fabricante señala que esta restricción depende del firmware vigente y remite a sucesivas actualizaciones, lo que apunta a una limitación de software y no a una barrera física del sistema. El modelo propuesto necesita superar esa restricción para que los drones puedan recargar en cualquier estación del corredor a medida que avanzan en la inspección, en particular en la estación de Lorca, que ambos sectores comparten. Se asume, por tanto, que el emparejamiento dinámico entre dron y estación es alcanzable mediante una actualización del sistema de gestión de flota.

La segunda hipótesis concierne a la autonomía efectiva del Matrice 3TD. En su configuración actual la plataforma declara una autonomía máxima de cincuenta minutos en condiciones óptimas, lo que a la velocidad de inspección de 5 m/s adoptada por el modelo equivale a un alcance aproximado de quince kilómetros por ciclo de batería. Este alcance queda muy por debajo de la separación entre las estaciones de carga del corredor, cuyo tramo más extenso, el comprendido entre Murcia y Lorca, alcanza los 62 km. El modelo asume, por tanto, una plataforma de autonomía ampliada capaz de recorrer ese tramo de 62 km en un único ciclo de batería y sin recarga intermedia. Se trata de una hipótesis de carácter prospectivo, coherente con la evolución que vienen mostrando los fabricantes de plataformas UAS de inspección en materia de densidad energética y gestión de baterías, y constituye la condición técnica que hace posible cubrir el corredor completo con solo tres estaciones de carga.

Ambas hipótesis constituyen líneas de desarrollo tecnológico abiertas cuya resolución es condición necesaria para la implementación comercial del modelo. Su declaración explícita delimita el carácter prospectivo de la propuesta y separa con nitidez lo que la tecnología actual permite de lo que el modelo anticipa para un horizonte próximo.

4.1 Justificación y entorno operacional

4.1.1 Contexto y justificación del caso de uso

El segundo caso de uso analizado en este trabajo propone un nuevo modelo de negocio basado en la prestación de servicios de inspección periódica de infraestructura ferroviaria mediante drones en el corredor Murcia–Águilas (línea 322 ADIF), de 111,7 km de longitud. A diferencia del caso agrícola, donde ya existen operadores comerciales que prestan servicios con drones aunque con escasa automatización, el mercado de inspección ferroviaria con drones en España no cuenta actualmente con ninguna empresa que ofrezca este servicio de forma comercial y sistemática. Los proyectos existentes, como el piloto de Telefónica, Ineco, ADIF y Huawei en Galicia (Ourense y Pontevedra) o el proyecto de drones-nido de Ineco y HelixNorth, son iniciativas de investigación y desarrollo en fase experimental, con autorización restringida de AESA, y no representan un servicio comercializado accesible para ADIF como cliente (Ineco, 2025; Red.es, 2022).

La ausencia de operadores comerciales en un segmento con demanda documentada representa la oportunidad de mercado que este modelo pretende materializar. La viabilidad técnica de la solución está respaldada por los proyectos experimentales mencionados y por trabajos académicos recientes como el de Medina Torres (2025), que demuestra mediante un modelo de optimización basado en programación lineal que es posible cubrir redes ferroviarias extensas con un número reducido de drones en una sola jornada operativa.

4.1.2 El problema de la inspección ferroviaria convencional

La inspección y el mantenimiento de la infraestructura ferroviaria son actividades esenciales para garantizar la seguridad de la circulación y la fiabilidad del servicio. Tradicionalmente, estas tareas se realizan mediante cuadrillas de operarios que recorren la vía a pie o con vehículos especializados, inspeccionando el estado de los carriles, las traviesas, los aparatos de vía y las obras de paso. Es un método preciso pero lento, caro y con riesgos reales para los trabajadores: jornadas nocturnas con poca visibilidad, trabajo junto a una vía en servicio y acceso a zonas de difícil orografía.

Según datos documentados en proyectos piloto nacionales, un técnico de vía puede encargarse del mantenimiento de hasta 250 km de trazado, con una frecuencia de inspección de una o dos veces al año (Red.es, 2022). Esta baja frecuencia limita la capacidad de detección temprana de anomalías y obliga a planificar intervenciones correctivas de mayor coste que las preventivas. La sustitución parcial de este modelo por inspecciones más frecuentes, rápidas y sistemáticas mediante drones permitiría reducir los tiempos de respuesta ante incidencias, mejorar la planificación del mantenimiento preventivo y reducir la exposición de los operarios a situaciones de riesgo.

4.1.3 El corredor Murcia–Águilas como entorno de referencia

El corredor ferroviario Murcia–Águilas, correspondiente a la línea 322 de la red de interés general gestionada por ADIF, tiene una longitud de 111,7 km y conecta la capital regional con el puerto de Águilas, en el sur de la Región de Murcia, atravesando los municipios de Murcia, Alcantarilla, Librilla, Alhama de Murcia, Totana, Lorca y Puerto Lumbreras, e introduciéndose brevemente en el municipio de Pulpí (Almería) antes de alcanzar Águilas (ADIF, 2024). Se trata de una línea convencional de vía única y sin electrificar, destinada al tráfico de viajeros y mercancías, con tramos significativos en entorno rural y semirural de baja densidad de población a lo largo de su mayor parte, especialmente en la zona comprendida entre Librilla y Lorca. Esta combinación de longitud, carácter lineal y baja densidad de población en los tramos intermedios la convierte en un escenario representativo y favorable para la operación BVLOS en categoría específica conforme al Reglamento (UE) 2019/947. Los tramos próximos a los núcleos urbanos de Lorca y Alcantarilla presentan mayor densidad operacional y requieren las coordinaciones de espacio aéreo descritas en la sección 4.3.3.

La elección del corredor Murcia–Águilas como entorno de referencia responde a los mismos criterios que motivaron la elección de la Región de Murcia en el caso agrícola: representatividad respecto a la red convencional española, adecuación operativa para la operación BVLOS y posibilidad de generalización del modelo a otros corredores de características similares. El modelo de negocio propuesto no está limitado a este corredor concreto, sino que está diseñado para ser replicable en otros tramos de características similares, lo que amplía significativamente el mercado potencial del servicio.



Ilustración 9. Esquema del corredor Murcia–Águilas: sectorización por drones y puntos kilométricos

4.2 El modelo convencional: inspección manual de infraestructura ferroviaria

4.2.1 Descripción del modelo actual

El modelo convencional de inspección ferroviaria que se utiliza como línea base en este caso de uso corresponde al procedimiento que ADIF aplica actualmente para el mantenimiento preventivo de su red convencional. A diferencia del caso agrícola, donde la línea base era una empresa que ya operaba con drones, en este caso el modelo convencional no incorpora drones en absoluto: la inspección se realiza mediante cuadrillas de técnicos de vía que recorren el trazado a pie o a bordo de vehículos especializados de inspección, apoyados puntualmente por trenes de auscultación equipados con sensores para el análisis de la geometría de la vía.

El ciclo operativo típico de una inspección convencional sobre el corredor Murcia–Águilas incluye las siguientes fases: planificación de la campaña con semanas de antelación para coordinarse con las ventanas de corte de circulación nocturnas, desplazamiento de la cuadrilla hasta el punto de inicio del tramo a inspeccionar, recorrido a pie o en vehículo de inspección a velocidad reducida, registro manual o semiautomático de anomalías detectadas, y elaboración posterior del informe de inspección en oficina. Todo el proceso se realiza habitualmente de noche, en ventanas de entre dos y cuatro horas, cuando la circulación de trenes comerciales está interrumpida, lo que limita severamente la productividad de cada jornada y expone a los operarios a condiciones de trabajo adversas.

4.2.2 Rendimiento operativo y limitaciones

El rendimiento de una cuadrilla de inspección a pie se sitúa entre 2 y 4 km por jornada efectiva, lo que significa que la inspección completa del corredor Murcia–Águilas de 111,7 km requiere entre 28 y 56 jornadas nocturnas. Con una frecuencia de inspección de una o dos veces al año, como documenta Red.es (2022), el mantenimiento preventivo del corredor queda limitado a una cobertura temporal muy baja, lo que dificulta la detección temprana de anomalías antes de que se conviertan en defectos que exijan intervenciones correctivas de mayor coste y urgencia.

A estas limitaciones de productividad se añaden los riesgos inherentes al trabajo en vía: los operarios deben trabajar en condiciones de baja visibilidad, con equipos de protección individual pesados y en proximidad a elementos peligrosos de la infraestructura. La línea 322 es de vía única y sin electrificar en la práctica totalidad de su recorrido, por lo que la presencia de catenaria se circunscribe al entorno de la estación de Murcia del Carmen, nodo compartido con otras líneas electrificadas. El riesgo dominante en los tramos intermedios no procede, por tanto, de la catenaria sino de la circulación de material rodante diésel con escasa visibilidad en condiciones nocturnas y del trabajo en entornos de orografía compleja entre Librilla y Lorca. La sustitución de parte de esta operativa por sistemas de inspección aérea reduce directamente la exposición de los operarios al riesgo, permite programar las inspecciones con mayor flexibilidad sin depender exclusivamente de las ventanas nocturnas de corte de circulación, e incrementa la

frecuencia de inspección posible dentro del mismo presupuesto operativo. El análisis económico detallado de ambos modelos se desarrolla en el capítulo 5 de este trabajo.

4.3 Descripción del sistema UAS propuesto

4.3.1 Justificación del enfoque

El sistema UAS propuesto para el caso ferroviario adopta un enfoque significativamente más avanzado que el caso agrícola, lo que lo sitúa en el extremo de mayor complejidad técnica y potencial económico del espectro analizado en este trabajo. A diferencia del modelo agrícola, donde un piloto supervisor está presente en campo, el modelo ferroviario elimina la presencia humana en campo: nadie se desplaza al corredor durante la inspección. Toda la misión se gestiona desde una estación de control fija situada en Lorca, en el punto central del corredor Murcia–Águilas, desde donde un único operador supervisa simultáneamente los dos drones que inspeccionan el corredor completo de 111,7 km, conforme a las hipótesis de trabajo descritas en la sección 4.1.4.

Este nivel de automatización responde a la naturaleza lineal del corredor ferroviario: a diferencia de las parcelas agrícolas, que requieren presencia física para la carga del producto fitosanitario, la inspección ferroviaria no implica ninguna intervención material sobre la infraestructura. El dron únicamente captura imágenes, lo que permite eliminar completamente la presencia humana en campo y gestionar toda la operación de forma remota.

4.3.2 Arquitectura del sistema

El sistema se compone de tres elementos principales. En primer lugar, la estación de control remota ubicada en la estación de Lorca (pk 62), desde la que el operador supervisa en tiempo real la posición, la telemetría y el estado de ambos drones a través de la plataforma DJI FlightHub 2, y desde la que puede intervenir en cualquier momento para pausar, redirigir o abortar la misión. En segundo lugar, tres estaciones de carga automática DJI Dock 2 distribuidas a lo largo del corredor, una en Murcia (pk 0), una en Lorca (pk 62) y una en Águilas (pk 111,7). Estas estaciones permiten el despegue, el aterrizaje y la recarga de los drones de forma completamente automática y sin presencia de operario en campo, y son también el lugar donde cada dron permanece resguardado entre operaciones. Con esta distribución ningún tramo entre estaciones consecutivas supera los 62 km, de modo que cada dron alcanza su punto de recarga dentro del radio de operación previsto. En tercer lugar, dos plataformas UAS de inspección DJI Matrice 3TD (DJI Enterprise, 2025a), la variante del Matrice 3 Series equipada con cámara visible de 48 MP y cámara térmica radiométrica de resolución hasta 1280×1024 píxeles. Esta configuración permite la captura simultánea de imagen visible e infrarroja, requisito esencial para la detección de anomalías térmicas, defectos de la vía y vegetación intrusiva en el corredor. El MTOM de la plataforma es de aproximadamente 1.610 g. La velocidad de inspección se fija en 5 m/s para mantener un solapamiento suficiente entre fotogramas, de al menos un 80 % lateral y un 70 % frontal, con la distancia focal y la altura de vuelo de 30 m AGL definidas en el

ConOps. Velocidades superiores reducirían el solapamiento por debajo del umbral de calidad fotogramétrica requerido para la detección de defectos de anchura reducida.

La asignación de sectores es la siguiente. El Dron 1 cubre el tramo Murcia–Lorca (pk 0–62), con apoyo en las estaciones de Murcia (pk 0) y Lorca (pk 62). El Dron 2 cubre el tramo Lorca–Águilas (pk 62–111,7), con apoyo en las estaciones de Lorca (pk 62) y Águilas (pk 111,7). La estación de Lorca actúa como punto de recarga común a ambos sectores y como frontera entre ellos. Ambos drones operan de forma simultánea, y su capacidad de partir de una estación y recargar en la contigua, con independencia de cuál sea su estación de origen, responde a las hipótesis de emparejamiento dinámico y de autonomía planteadas al inicio del capítulo.

Para validar la viabilidad temporal de cubrir el corredor completo en una sola jornada se parte de los parámetros del Matrice 3TD integrado con el DJI Dock 2. La autonomía declarada por el fabricante es de 50 minutos en condiciones óptimas. Bajo la hipótesis de autonomía ampliada que adopta el modelo, cada dron dispone de un alcance por carga suficiente para recorrer su sector completo sin recarga intermedia, dado que el tramo más extenso entre estaciones es de 62 km. El tiempo de recarga automática en estación DJI Dock 2 es de aproximadamente 30 minutos, que cada plataforma emplea en su estación de destino una vez concluida la pasada. A una velocidad de inspección de 5 m/s, equivalente a 18 km/h, el dron recorre cada kilómetro de corredor en 3 minutos y 20 segundos.

El Dron 1 inspecciona los 62 km de su sector volando de Murcia a Lorca sin paradas intermedias, con un tiempo de vuelo de 62 km a 18 km/h equivalente a 3 h 27 min. El Dron 2 inspecciona los 49,7 km de su sector volando de Lorca a Águilas, también de una sola carga, con un tiempo de vuelo de 2 h 46 min. Añadiendo un margen de 15 minutos para el posicionamiento inicial, el Dron 1 marca el cierre de la jornada en torno a 3 h 42 min, plazo ampliamente compatible con una jornada operativa de 8 horas y que deja un margen de contingencia superior a cuatro horas ante incidencias meteorológicas o técnicas.



Ilustración 10. Estación DJI Dock 2

4.3.3 Gestión del espacio aéreo

La operación sobre el corredor Murcia–Águilas requiere tres coordinaciones previas obligatorias. La primera es la autorización de ADIF como titular de la infraestructura ferroviaria, que en el marco del contrato de servicio recurrente se obtiene como parte del propio acuerdo comercial, sin necesidad de tramitación individual por inspección. La segunda es la tramitación del plan de vuelo ante ENAIRE, que se realiza de forma automática a través de la plataforma ENAIRE Drones con antelación suficiente para cada campaña de inspección. La tercera, y más específica de este corredor, es la coordinación con la Base Aérea de Alcantarilla (LERI) para el tramo inicial pk 0–8.

Conforme al AIP España (ENAIRE, 2026), el tramo inicial del corredor discurre dentro de la ATZ MURCIA/ALCANTARILLA, la zona de tránsito de aeródromo de la base militar de Alcantarilla (LERI), de 8 km de radio y bajo la responsabilidad de Alcantarilla TWR. Dado que el dron de inspección opera a baja altura desde la superficie, queda dentro de ese volumen, por lo que cualquier vuelo en ese tramo requiere coordinación con la torre de control de Alcantarilla.

El modelo propuesto adopta como mecanismo de coordinación los servicios de Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo (Dynamic Airspace Reconfiguration, DAR), definidos en el artículo 4 del Reglamento (UE) 2021/664 y desarrollados en el punto ATS.TR.237 del Reglamento (UE) 2017/373, modificado por el Reglamento (UE) 2021/665. El DAR consiste en la suspensión temporal, parcial o total, del volumen U-space declarado sobre el tramo pk 0–8, para acomodar cambios a corto plazo en la demanda de tráfico tripulado de la base. Alcantarilla TWR solicita la reconfiguración cuando necesita liberar el espacio para sus propias operaciones, el USSP del

operador recibe y reconoce esa solicitud, y notifica a Alcantarilla TWR una vez implementada. Estos servicios se encuentran actualmente en fase de demostración tecnológica a través de proyectos como SPATIO (véase sección 4.5.4), y el modelo asume su madurez operativa para el horizonte temporal en que se plantea la implementación real del servicio.

Adicionalmente, la presencia del helipuerto privado de Rotorsun en Águilas requiere que el operador establezca una coordinación directa con su gestor para el tramo final del corredor, de forma independiente al contrato con ADIF. A diferencia de la coordinación con la Base Aérea de Alcantarilla, esta no se beneficia del mecanismo de DAR, dado que Rotorsun no dispone de zona de tránsito de aeródromo ni de servicio de control de tránsito aéreo, por lo que la coordinación se resuelve mediante acuerdo directo entre operadores.

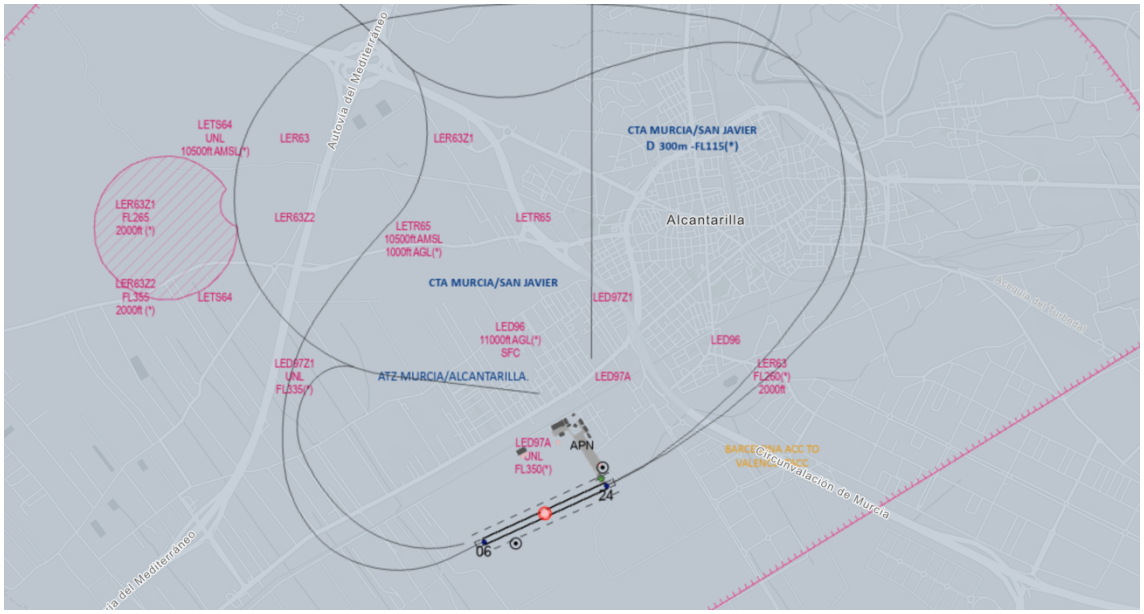


Ilustración 11. Estructura del espacio aéreo en el entorno de la ATZ Murcia/Alcantarilla

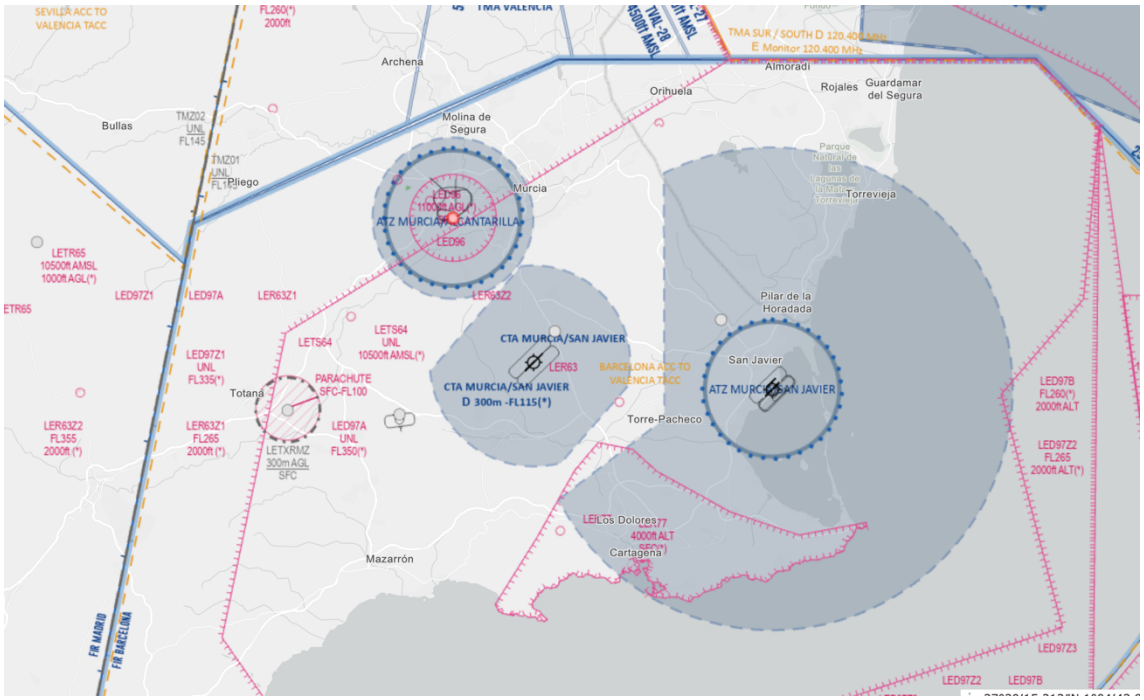


Ilustración 12. Espacio aéreo de la Región de Murcia

4.4 Desarrollo operativo de la misión4.4.1

Fase 1: Planificación

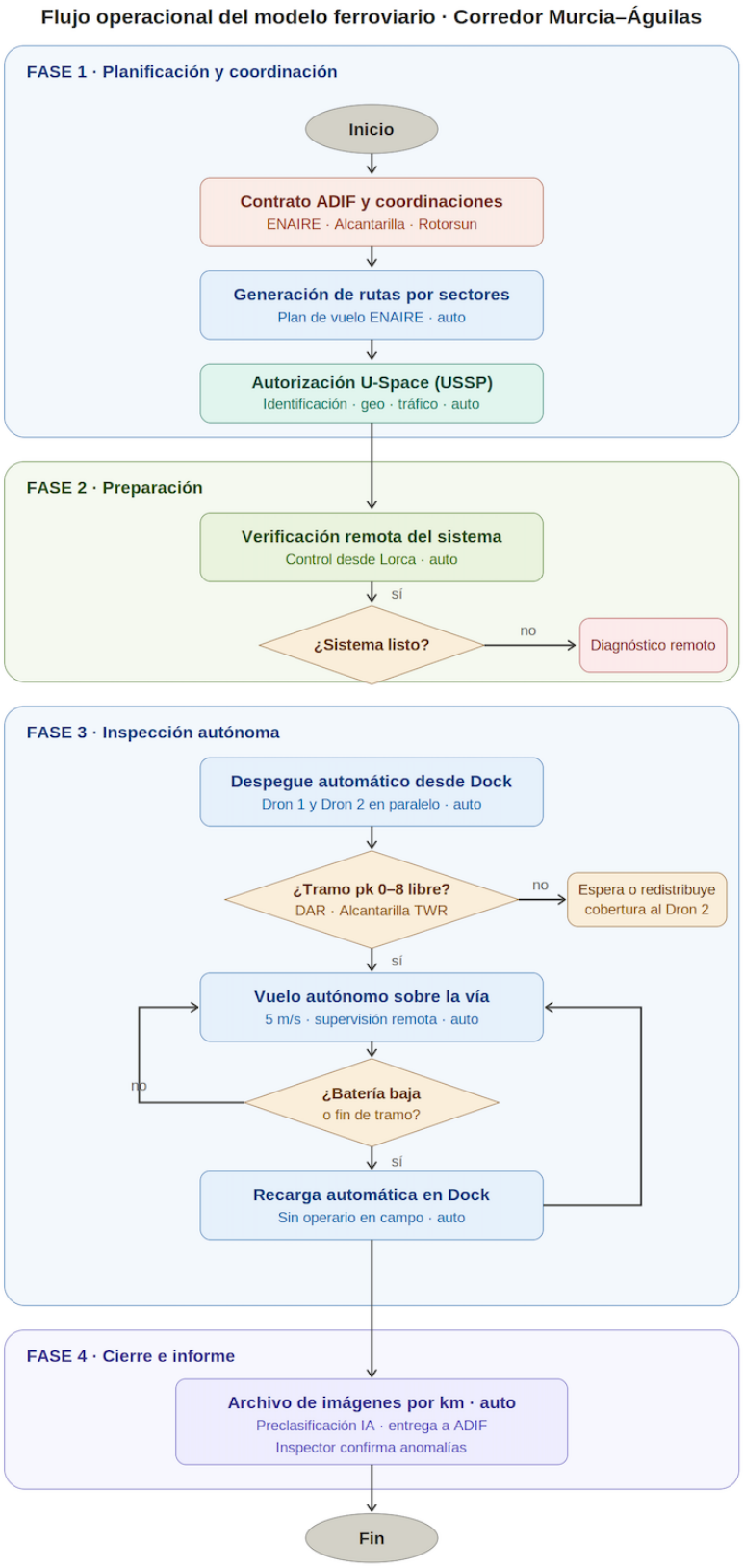


Ilustración 13. Flujo operacional del modelo ferroviario sobre el corredor Murcia–Águilas

El proceso operativo del nuevo modelo ferroviario se inicia con la planificación anticipada de la misión de inspección. A partir de la cartografía del corredor Murcia–Águilas disponible en los sistemas de ADIF, el software de planificación genera automáticamente las rutas de vuelo para cada dron, segmentando los 111,7 km del corredor en los sectores asignados a cada plataforma y asociando cada tramo a la estación DJI Dock 2 correspondiente a lo largo del trazado. La declaración de vuelo se tramita automáticamente a través de ENAIRE Drones, y se verifica la compatibilidad con las zonas geográficas particulares de ADIF conforme al documento de requisitos publicado por el administrador de infraestructuras (ADIF, 2024). Antes del despegue, el proveedor de servicios U-Space (USSP) concede la autorización de la operación tras verificar la identificación de las aeronaves, la geoconciencia y la situación de tráfico en el volumen solicitado, conforme al modelo descrito en la sección 4.5. En la Figura 4.1 se representa el flujo operacional completo del modelo, con sus cuatro fases.

En el modelo convencional esta fase equivale a la coordinación semanal o mensual entre el jefe de vía y el centro de control para reservar ventanas nocturnas de corte de circulación, proceso que puede llevar varios días y que limita la flexibilidad operativa.

4.4.2 Fase 2: Operación

La operación se inicia de forma completamente remota desde la estación de control de Lorca, sin desplazamiento de personal al corredor. El operador autoriza el despegue automático de ambos drones desde sus respectivas estaciones DJI Dock 2. A partir de ese momento cada plataforma ejecuta autónomamente su ruta preprogramada, volando a 5 m/s a una altura constante de 30 m sobre la vía, velocidad determinada por el requisito de solapamiento fotogramétrico mínimo del 80 % con la óptica del Matrice 3TD, y capturando imágenes RGB y térmicas geolocalizadas de forma continua. Cuando la batería alcanza el umbral mínimo configurado, el dron regresa automáticamente a la estación DJI Dock 2 más próxima, donde recarga de forma autónoma sin intervención humana, y el sistema reanuda después la misión desde el punto exacto donde se interrumpió.

En el tramo inicial pk 0–8, comprendido dentro del espacio aéreo controlado de la Base Aérea de Alcantarilla, la operación está sujeta al mecanismo de Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo descrito en la sección 4.5.4. Antes de inspeccionar ese tramo, el sistema comprueba si el volumen permanece disponible. Si Alcantarilla TWR ha solicitado liberar el espacio para sus propias operaciones, el dron correspondiente espera o redistribuye la cobertura hasta que el volumen vuelve a estar disponible, sin que ello afecte a la inspección del resto del corredor.

El operador supervisa simultáneamente los dos drones desde la estación de control, interviniendo únicamente ante incidencias que el sistema no pueda resolver de forma autónoma: presencia inesperada de un tren, condiciones meteorológicas adversas o anomalía técnica del equipo. Esta misma capacidad de detección de trenes, necesaria por motivos de seguridad, genera un subproducto con valor comercial: la posición y el instante en que cada dron detecta un tren quedan registrados automáticamente. Esto abre la posibilidad de ofrecer a ADIF o a Renfe un servicio complementario de localización de trenes en tiempo real sobre el corredor, que se desarrolla como línea de ingresos adicional en la sección 4.7. Esta operativa

contrasta radicalmente con el modelo convencional, donde los técnicos recorren físicamente la vía a pie en condiciones nocturnas, con exposición directa al riesgo ferroviario.

4.4.3 Fase 3: Cierre e informe

Al finalizar la misión, el sistema genera automáticamente un archivo de imágenes geolocalizadas ordenadas por kilómetro de vía, con metadatos de posición, hora y condiciones de vuelo para cada fotograma. Antes de la revisión humana, un sistema de clasificación automática basado en visión artificial analiza el conjunto de imágenes y señala aquellas con mayor probabilidad de contener anomalías, reduciendo el volumen que el inspector necesita revisar manualmente; la literatura reciente documenta numerosos sistemas de este tipo, con precisiones de clasificación de entre el 91 % y el 98 % según la técnica empleada (Kumar y Harsha, 2024). Este archivo, ya preclasificado, se entrega al inspector técnico de ADIF, quien revisa las imágenes señaladas desde oficina y confirma las anomalías que requieren intervención. La inspección visual del corredor completo, que en el modelo convencional requería la presencia física de operarios durante semanas, se convierte así en una tarea de revisión de imágenes preseleccionadas realizable en pocas horas desde un puesto de trabajo convencional.

En el modelo convencional el registro de anomalías se realiza manualmente en campo, con anotaciones en papel o dispositivos portátiles, y el informe se elabora posteriormente en oficina sin trazabilidad geoespacial sistemática. La diferencia en calidad, frecuencia y coste del dato generado constituye un factor relevante en la comparación entre modelos, cuya magnitud real, incluyendo los costes de implementar estas capacidades, se cuantifica en el capítulo siguiente.

4.5 El modelo con integración U-Space

4.5.1 U-Space como habilitador del modelo remoto

El modelo ferroviario propuesto no sería técnicamente viable sin la integración con el ecosistema U-Space. A diferencia del caso agrícola, donde la integración U-Space aporta principalmente eficiencia administrativa y trazabilidad, en el caso ferroviario constituye un requisito estructural. Una operación BVLOS sin presencia de personal en campo, con dos drones volando simultáneamente sobre un corredor de 111,7 km, solo puede realizarse de forma segura y legal dentro de los servicios U-Space definidos en el Reglamento (UE) 2021/664.

Este reglamento establece cuatro servicios obligatorios que todo proveedor de servicios U-Space certificado (USSP) debe prestar a las operaciones que se desarrollan en un espacio aéreo U-Space. El servicio de identificación de red proporciona de forma continua la identidad del operador y la posición y trayectoria de cada dron durante todo el vuelo. El servicio de geoconsciencia facilita la información actualizada sobre las limitaciones del espacio aéreo y las zonas geográficas UAS aplicables al corredor. El servicio de autorización de vuelo garantiza que la operación queda libre de conflictos en el espacio y en el tiempo con cualquier otra operación notificada en el mismo volumen. Por último, el servicio de información sobre el tráfico alerta al operador sobre la presencia de otras aeronaves, tripuladas o no, en las proximidades de los drones.

La operación remota desde la estación de control de Lorca requiere que el operador tenga en todo momento una imagen completa y actualizada del espacio aéreo en el que operan los drones, con información sobre otros usuarios del espacio aéreo, restricciones activas y posibles conflictos. Esta imagen solo puede obtenerse de forma fiable a través de los servicios de geoconsciencia e información sobre el tráfico prestados por los USSP, lo que convierte al U-Space en el habilitador imprescindible de la operación.

4.5.2 Servicios U-Space aplicables

Los servicios U-Space que resultan directamente aplicables al modelo ferroviario van más allá de los utilizados en el caso agrícola. Además de los servicios obligatorios de autorización de vuelo, identificación de red e información sobre el tráfico, el modelo ferroviario se apoya de forma intensiva en los servicios de geoconsciencia para el seguimiento continuo de las restricciones del espacio aéreo a lo largo del corredor. La nomenclatura U1/U2/U3 empleada en algunos estudios previos procede del U-Space Blueprint de SESAR (2017) y no está recogida en la regulación vigente. En este trabajo se utiliza exclusivamente la terminología del Reglamento (UE) 2021/664, que diferencia entre servicios obligatorios y servicios opcionales requeribles por los Estados miembros según la complejidad del entorno operacional. Estos servicios son especialmente relevantes en el tramo inicial del corredor, donde la proximidad a la Base Aérea de Alcantarilla genera una densidad de tráfico aéreo superior a la del resto del corredor.

La integración con el USSP permite al operador desde Lorca recibir alertas automáticas en tiempo real cuando otro usuario del espacio aéreo se aproxima a la zona de operación, lo que le permite tomar decisiones de forma anticipada sin necesidad de estar físicamente en campo. Esta capacidad es precisamente la que diferencia el modelo ferroviario del agrícola y lo posiciona en el nivel más avanzado de integración U-Space contemplado en este trabajo.

4.5.3 DJI FlightHub 2 como plataforma de gestión

La plataforma de gestión de operaciones del modelo ferroviario es DJI FlightHub 2, que actúa como interfaz entre el operador remoto, los drones y los servicios U-Space. Desde esta plataforma el operador visualiza en tiempo real la posición de ambos drones sobre el mapa del corredor, recibe alertas de telemetría, gestiona las misiones de cada DJI Dock 2 y puede intervenir remotamente en cualquier fase de la operación. La integración de DJI FlightHub 2 con los USSP certificados en España permite la tramitación automática de los planes de vuelo y la recepción de información de tráfico en tiempo real, completando así el ciclo de automatización del modelo.

4.5.4 Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo (DAR)

El tramo pk 0–8 del corredor, al discurrir bajo el CTR MURCIA/Alcantarilla (véase sección 4.3.3), constituye el único punto del modelo ferroviario en el que la operación U-Space debe coordinarse con un proveedor de servicios de tránsito aéreo (ATC) en espacio aéreo controlado. El mecanismo regulado para esta coordinación es la Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo (Dynamic Airspace Reconfiguration, DAR), definida en el artículo 4 del Reglamento de Ejecución

(UE) 2021/664 y desarrollada en el punto ATS.TR.237 del Reglamento de Ejecución (UE) 2017/373, tal como quedó modificado por el Reglamento de Ejecución (UE) 2021/665.

El DAR consiste en la suspensión temporal, parcial o total, de un volumen U-Space declarado dentro de espacio aéreo controlado, para dar prioridad puntual al tráfico tripulado cuando lo requiera el proveedor ATC. El flujo operativo es el siguiente. Alcantarilla TWR, como proveedor de servicios de tránsito aéreo del tramo, solicita la reconfiguración cuando necesita liberar el volumen de espacio aéreo para sus propias operaciones. El USSP contratado por el operador recibe y reconoce la solicitud, suspende de forma automática la disponibilidad del volumen U-Space afectado, y notifica a Alcantarilla TWR una vez completada la reconfiguración. Mientras dura la suspensión, los drones del tramo pk 0–8 no pueden operar, y el sistema de planificación de vuelo del modelo redistribuye temporalmente la cobertura hacia el Dron 2, o retrasa la inspección de ese tramo hasta que el volumen queda liberado de nuevo.

A diferencia de una autorización puntual tramitada manualmente, el DAR está pensado para automatizarse mediante el intercambio de mensajes entre el sistema ATC y el USSP, sin intervención humana directa en cada solicitud. Esta automatización es, precisamente, el objeto de los proyectos de demostración del programa SESAR mencionados en la sección 2.5. DACUS sentó las bases conceptuales del equilibrio entre demanda y capacidad en espacio aéreo controlado, y su continuación, SPATIO, liderada por ENAIRE a través de su filial CRIDA con más de veinte socios europeos, ha validado en entorno real servicios avanzados de gestión dinámica de la capacidad y de separación entre aeronaves, todavía en fase de demostración tecnológica y no como servicio comercial desplegado de forma generalizada. ENSURE, por su parte, desarrolla la interfaz común y el modelo de datos necesarios para que estas reconfiguraciones se intercambien de forma estandarizada entre USSP y proveedores ATC.

Conviene destacar que el procedimiento DAR ya ha sido validado en condiciones reales en España. En el marco del proyecto U-ELCOME, la torre de control del aeropuerto de A Coruña-Alvedro interactuó en tiempo real con operaciones de drones mediante la interfaz ATM/UTM desarrollada por ENAIRE, aplicando el procedimiento DAR para suspender temporalmente las operaciones no tripuladas ante la necesidad de tráfico tripulado. De forma análoga, en Zaragoza se demostró una coordinación civil-militar en la que la aproximación de un helicóptero policial activó una reconfiguración dinámica del espacio aéreo que obligó a los drones a aterrizar de forma segura. Estos precedentes confirman la viabilidad operativa del mecanismo en el que se apoya la coordinación con Alcantarilla TWR.

El modelo de negocio propuesto en este trabajo adopta el DAR como mecanismo de coordinación con Alcantarilla TWR, integrado en la plataforma DJI FlightHub 2 (sección 4.5.3), asumiendo la madurez operativa que demuestran proyectos como U-ELCOME y SPATIO para el horizonte temporal en que se plantea la implementación real del servicio.

4.6 Análisis SORA 2.5 de la operación ferroviaria

4.6.1 Concepto de Operaciones (ConOps)

Operación de inspección visual aérea mediante imágenes geolocalizadas sobre el corredor ferroviario Murcia–Águilas (línea 322, ADIF), de 111,7 km de longitud. Se opera con dos plataformas UAS en régimen BVLOS, sin presencia de personal en campo, controladas remotamente desde una estación fija en Lorca (pk 62). El despegue, el aterrizaje y la recarga se realizan de forma automática mediante cinco estaciones DJI Dock 2 situadas en Murcia (pk 0), Alhama de Murcia (pk 22), Lorca (pk 62), Almendricos (pk 90) y Águilas (pk 111,7). La altura operativa de misión es de 30 m AGL, determinada por los requisitos de solapamiento fotogramétrico. La altura máxima declarada en el ConOps es de 50 m AGL, correspondiente al techo autorizado y a la altura de seguridad adoptada ante la detección de material rodante (véase consideraciones de seguridad, sección 4.6.8). La velocidad de inspección es de 5 m/s. La operación requiere autorización previa de ADIF, coordinación con ENAIRE y coordinación específica con la Base Aérea de Alcantarilla (LERI) para el tramo pk 0–8, que se encuentra dentro de la ATZ MURCIA/ALCANTARILLA, la zona de tránsito de aeródromo de la base militar de Alcantarilla (LERI), bajo la responsabilidad de Alcantarilla TWR (AIP España AD 2-LERI, AMDT 405/26; ENAIRE, 2026)

4.6.2 Paso 1 — iGRC intrínseco

El Matrice 3TD presenta una masa máxima al despegue de 1.610 g, muy por debajo del umbral de 25 kg, y una dimensión característica máxima inferior a 1 m, correspondiente a la distancia máxima entre las puntas de las hélices del multirrotor. De acuerdo con la Tabla 2 de SORA 2.5, esta dimensión sitúa la operación en la columna de 1 m, a la que la metodología asocia una velocidad máxima de 25 m/s. La selección de columna se realiza con la velocidad máxima de diseño de la aeronave, no con la velocidad de la misión, y la velocidad máxima del Matrice 3TD queda por debajo de ese umbral de 25 m/s, por lo que la columna de 1 m es la aplicable. La velocidad de inspección del modelo se fija muy por debajo, en 5 m/s, por motivos de calidad fotogramétrica.

El corredor Murcia–Águilas discurre mayoritariamente por entornos rurales y semirrurales de baja densidad de población, inferior a 50 habitantes por kilómetro cuadrado en la mayor parte de su trazado, especialmente en el tramo comprendido entre Librilla y Lorca. Aplicando la Tabla 2 de SORA 2.5 con la columna de dimensión característica de 1 m y la fila de densidad de población inferior a 50 habitantes por kilómetro cuadrado, se obtiene un valor de Ground Risk Class intrínseco de 3 (JARUS, 2024).

Parámetro	**Valor**
MTOM	1.610 g (inferior al umbral de 25 kg)
Dimensión característica	Inferior a 1 m (distancia entre puntas de hélice)
Tipo de operación	BVLOS, vuelo lineal sobre corredor ferroviario
Velocidad de inspección	5 m/s (límite de columna: 25 m/s)
Área de operación	Mixta: rural y semirrural, con proximidad a la Base Aérea de Alcantarilla
Densidad de población	Inferior a 50 hab/km² en la mayor parte del trazado
iGRC intrínseco	3

Tabla 6. Parámetros de cálculo del iGRC intrínseco del caso ferroviario

4.6.3 Paso 2 — GRC final tras mitigaciones

Partiendo de un iGRC intrínseco de 3, se aplica la mitigación M1(B) de restricciones operacionales prevista en la Tabla 5 de SORA 2.5. La operación se circunscribe a un corredor de 100 m de ancho centrado en el eje de la vía, definido como volumen operacional, que excluye los núcleos urbanos y las áreas de concentración de personas a lo largo del trazado. Esta restricción reduce de forma efectiva la población en riesgo respecto a la del entorno general del corredor. La coordinación con ADIF como titular de la infraestructura, junto con el carácter vallado de buena parte de la plataforma ferroviaria, refuerza el control del espacio operacional y limita el acceso de terceros no autorizados al volumen de operación. A esta mitigación se le asigna una robustez media, dado que el operador controla el corredor mediante procedimientos y coordinación con el administrador, si bien no puede excluir por completo la presencia de trabajadores de vía autorizados.

La aplicación de la mitigación M1(B) con robustez media supone una reducción de un punto sobre el iGRC, conforme a la Tabla 5 de SORA 2.5. El resultado es un GRC final de 2, valor inferior al límite de 7 que delimita el ámbito de aplicación de la metodología, por lo que el proceso puede continuar.

GRC final = 2.

No se aplican mitigaciones adicionales de reducción de energía de impacto (M2), dado que la plataforma no incorpora sistemas técnicos específicos para ello, como un paracaídas. La asignación de un GRC final de 2 mediante una única mitigación operacional constituye un planteamiento conservador, coherente con la naturaleza BVLOS de la operación sin presencia de personal en campo, en la que la capacidad de intervención directa del operador sobre el área sobrevolada es limitada.

4.6.4 Paso 3 — ARC inicial

La operación se desarrolla en espacio aéreo de clase G no controlado en la mayor parte del corredor, correspondiente a los tramos pk 8–111,7. En este entorno rural y a baja altura, la probabilidad de encuentro con aeronaves tripuladas es baja pero no despreciable, y las maniobras de evitación se basan principalmente en un descenso rápido a una altitud donde no se espera la presencia de tráfico tripulado, lo que sitúa esta porción del corredor en la categoría ARC-b conforme a SORA 2.5.

El tramo inicial pk 0–8 discurre dentro del CTR MURCIA/Alcantarilla, espacio aéreo controlado de clase D asociado a la Base Aérea de Alcantarilla (véase sección 4.3.3), donde la densidad de tráfico aéreo potencial es superior. Para gestionar este tramo, el modelo adopta como mecanismo de coordinación con Alcantarilla TWR los servicios de Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo (DAR), desarrollados en el Reglamento (UE) 2021/665 y descritos en la sección 4.5.4. Mediante este mecanismo, el dron únicamente opera en el tramo pk 0–8 cuando el volumen U-Space permanece activo y libre de tráfico tripulado. Cuando Alcantarilla TWR necesita el espacio para sus propias operaciones, solicita la reconfiguración y el dron deja de operar en ese tramo hasta que el volumen vuelve a estar disponible. De este modo, el dron y las aeronaves tripuladas de la base no comparten el espacio aéreo en el mismo instante, lo que mantiene baja la probabilidad de encuentro también en el tramo controlado.

Dado que la coordinación mediante DAR garantiza la segregación temporal entre la operación no tripulada y el tráfico tripulado de la base, la probabilidad de encuentro se mantiene en un nivel bajo a lo largo de todo el corredor. En consecuencia, se asigna un ARC inicial de ARC-b al conjunto de la operación.

ARC inicial = ARC-b.

4.6.5 Paso 4 — ARC residual tras mitigaciones estratégicas

Sobre el ARC inicial de ARC-b se valoran las mitigaciones estratégicas de riesgo aéreo disponibles. La coordinación con la Base Aérea de Alcantarilla mediante el mecanismo de Reconfiguración Dinámica del Espacio Aéreo (sección 4.5.4) garantiza la segregación temporal entre la operación no tripulada y el tráfico de la base en el tramo pk 0–8. La coordinación directa con el helipuerto de Rotorsun cubre el tramo final del corredor. La restricción geográfica de la operación a un corredor de 100 m de ancho centrado en el eje de la vía limita el volumen de espacio aéreo efectivamente ocupado por los drones.

Conforme a la metodología SORA 2.5, las mitigaciones estratégicas de riesgo aéreo no pueden reducir el Air Risk Class hasta ARC-a, categoría reservada al espacio aéreo atípico o segregado en el que por su propia naturaleza no se espera la presencia de aeronaves tripuladas. Dado que el corredor discurre por espacio aéreo de clase G y, en su tramo inicial, por espacio controlado de clase D, las mitigaciones aplicadas mantienen pero no reducen por debajo del nivel ARC-b la clasificación del riesgo aéreo. En consecuencia, el ARC residual de la operación es ARC-b.

ARC residual = ARC-b.

4.6.6 Paso 5 — SAIL

La determinación del SAIL consolida los análisis de riesgo en tierra y en aire. Con un GRC final de 2 y un ARC residual de ARC-b, la Tabla 7 de la metodología SORA 2.5 (JARUS, 2024) asigna a la operación un nivel SAIL II.

Este resultado refleja que el conjunto de mitigaciones aplicadas a lo largo del análisis, la restricción del corredor a un ancho de 100 m, el empleo de una plataforma ligera de masa inferior a 25 kg, la coordinación con Alcantarilla mediante DAR y la coordinación directa con Rotorsun, sitúa una operación intrínsecamente compleja, BVLOS y sin presencia de personal en campo, en un nivel de garantía e integridad bajo dentro de la escala SORA, que comprende seis niveles de I a VI. Los requisitos de robustez de los objetivos de seguridad operacional asociados a un SAIL II son moderados y proporcionados a la naturaleza de la operación, sustancialmente menores que los exigibles a una operación equivalente clasificada en niveles superiores de la escala.

SAIL = II.

4.6.7 Paso 6 — OSOS aplicables (SAIL II)

La metodología SORA 2.5 asocia a cada nivel SAIL un conjunto de objetivos de seguridad operacional (OSO) con un nivel de robustez determinado, conforme a la Tabla 14. Para un SAIL II, los objetivos aplicables y su robustez recomendada son los siguientes.

OSO	Descripción	Robustez
OSO#01	El operador es competente y/o está acreditado	Baja
OSO#03	El UAS es mantenido por una entidad competente y/o acreditada	Baja
OSO#06	Las características del enlace C3 son adecuadas para la operación	Baja
OSO#07	Verificación de conformidad de la configuración del UAS	Baja
OSO#08	Procedimientos operacionales definidos, validados y respetados	Media
OSO#09	Tripulación remota formada y con vigencia	Baja
OSO#13	Los servicios externos que apoyan la operación son adecuados	Baja
OSO#16	Coordinación entre varios tripulantes	Baja
OSO#17	La tripulación remota está en condiciones aptas para operar	Baja
OSO#20	Evaluación de factores humanos y adecuación de la interfaz hombre-máquina	Baja
OSO#23	Condiciones ambientales para una operación segura, definidas y medibles	Baja

Tabla 7. Objetivos de seguridad operacional aplicables al caso ferroviario

El único objetivo que requiere robustez media es el OSO#08, relativo a la definición y validación de los procedimientos operacionales, lo que resulta coherente con una operación BVLOS automatizada en la que la fiabilidad de los procedimientos preprogramados es determinante para la seguridad. El resto de los objetivos aplicables se satisfacen con robustez baja, lo que confirma el carácter proporcionado de los requisitos asociados a un SAIL II.

4.6.8 Paso 7 — TMPR

Con un ARC residual de ARC-b, la tabla de la metodología SORA 2.5 exige un requisito de prestación de mitigación táctica (Tactical Mitigation Performance Requirement, TMPR) de robustez baja. Este requisito responde a un entorno en el que la probabilidad de encuentro con tráfico tripulado es baja pero no despreciable, y en el que las maniobras de evitación se basan

principalmente en un descenso rápido a una altitud donde no se espera la presencia de aeronaves tripuladas.

El modelo satisface este TMPR de robustez baja mediante la integración de DJI FlightHub 2 con el USSP, que proporciona al operador alertas de tráfico en tiempo real, combinada con las maniobras automáticas de evitación que ejecuta la plataforma ante la presencia de otro usuario del espacio aéreo. Esta combinación de conciencia situacional y respuesta automática cubre las funciones de detección y evitación requeridas para una operación BVLOS con TMPR bajo.

Consideraciones de seguridad complementarias

Más allá del TMPR, se han identificado cuatro consideraciones de seguridad adicionales para la operación ferroviaria, pensadas para cubrir situaciones que no quedan resueltas únicamente con el nivel de riesgo calculado.

La primera es la coordinación con el Centro de Control de Circulación (CCC) de ADIF. Aunque la inspección no requiere cortar la circulación de trenes, el operador remoto necesita acceso en tiempo real al cuadro de marcha del corredor durante toda la jornada. Si aparece un tren no programado o adelantado respecto al horario previsto, el sistema asciende automáticamente a una altura de seguridad de 80 m AGL, muy por encima del gálibo libre del material rodante de la línea, y mantiene esa posición hasta que se confirma el paso del tren.

La segunda es la pérdida del enlace de mando y control (C2) en una operación BVLOS. Si la señal se pierde durante más de quince segundos, el Matrice 3TD ejecuta de forma automática una maniobra de Return-to-Home hacia la estación DJI Dock 2 más cercana, sin necesidad de intervención del operador.

La tercera es la cobertura de comunicaciones. El corredor incluye tramos con cobertura 4G limitada, especialmente entre Librilla y el entorno de la Sierra de Espuña. Para cubrir esos huecos, el sistema combina un enlace primario por red 4G con un enlace de respaldo mediante radio dedicada Sub-1 GHz de largo alcance.

La cuarta es el protocolo de contingencia ante un aterrizaje fuera de las estaciones DJI Dock 2. Si el dron se ve obligado a aterrizar de emergencia fuera de una estación, por pérdida prolongada de comunicaciones o batería crítica, el sistema registra automáticamente las coordenadas GPS del punto de aterrizaje y el operador remoto activa el protocolo de recuperación física del equipo.

Estas cuatro medidas funcionan de forma independiente entre sí en la mayoría de los casos, pero conviene considerar también su interacción cuando se activan a la vez. El escenario más exigente es que la pérdida del enlace C2 coincida con la detección de un tren no programado. Dado que ambas reacciones son automáticas y se ejecutan a bordo del propio dron sin depender del enlace, el sistema da prioridad a la maniobra de evitación del tren. El dron asciende y mantiene posición a una altura de 80 m AGL durante el tiempo que dure la pérdida de señal, y solo inicia la maniobra de Return-to-Home una vez recuperado el enlace C2 o, si la pérdida persiste más allá de un umbral de seguridad adicional, tras confirmar mediante el último dato de posición conocido que el tren ha superado la zona.

Estas cuatro medidas se incorporan como parte integral del modelo propuesto. Algunas de ellas, en particular las relativas a la evitación de tráfico y a la respuesta ante la pérdida del enlace, contribuyen directamente a satisfacer el TMPR de robustez baja exigido por la operación, mientras que las restantes refuerzan la seguridad operacional más allá del mínimo requerido por la metodología.

4.6.8 Implicaciones económicas del SORA

El resultado SAIL II implica exigencias de robustez mayoritariamente bajas en los OSOS correspondientes, con un único objetivo de robustez media (OSO#08, procedimientos operacionales), lo que se traduce en costes de certificación y documentación moderados. Dado que la especificación técnica del DAR todavía está en desarrollo a través de proyectos como ENSURE (sección 4.5.4), y que su integración con la plataforma DJI FlightHub 2 requiere coordinación con DJI, con el proveedor USSP y validación regulatoria, se estima una carga de trabajo de entre 200 y 400 horas de desarrollo especializado a una tarifa de 45 € por hora, resultando en un coste de integración técnica de entre 9.000 y 18.000 €.

Concepto	Coste estimado	Periodicidad
Autorización operacional AESA (BVLOS)	0 € (tramitación gratuita en sede electrónica)	Por campaña
Integración técnica del DAR (USSP–DJI FlightHub 2)	9.000 – 18.000 €	Una vez
Seguro de responsabilidad civil (SAIL II)	300 – 600 €/año	Anual
Certificación BVLOS del operador	1.000 – 2.000 €	Una vez
ConOps y documentación SORA	1.500 – 3.000 €	Una vez
Mantenimiento del Safety Portfolio	500 – 1.000 €/año	Anual

Tabla 8. Costes regulatorios y de documentación SORA del caso ferroviario

El nivel SAIL II, es relativamente bajo dentro de la escala de seis niveles de la metodología, mantiene estos costes en un rango contenido. La partida más significativa y con mayor incertidumbre es la integración técnica del mecanismo DAR, cuyo coste depende de la madurez que alcancen las especificaciones en desarrollo y de la complejidad de la coordinación con el proveedor USSP. El resto de las partidas corresponden a conceptos consolidados y de cuantía conocida en el sector de las operaciones UAS en categoría específica.

4.7 Modelo de negocio ferroviario

El modelo de negocio se estructura como contrato anual de inspección con ADIF o con empresas del Grupo Renfe especializadas en infraestructura, con SLAs vinculados al número de pasadas anuales y al tiempo de entrega de los informes de inspección. La oferta principal cubre cuatro servicios: inspección visual de vía y obra civil, inspección térmica de catenaria, inventario LiDAR de gálibos y vegetación intrusiva, y mapeo periódico para detección de asentamientos y deformaciones de plataforma. Los precios de referencia en el mercado europeo se sitúan entre 800 y 1.800 € por kilómetro inspeccionado en función de la profundidad del análisis (Aela et al., 2024). El extremo superior del rango corresponde a servicios de análisis avanzado, inventario LiDAR y mapeo de deformaciones, y constituye una estimación propia basada en los servicios de mayor valor añadido no contemplados explícitamente en la muestra de Aela et al. (2024).

La diferenciación competitiva en este sector descansa menos en el precio y más en la capacidad de procesamiento posterior. La estimación de OPEX del modelo incluye 11.000 €/año en software y licencias, partida que incorpora el coste de las plataformas de gestión de datos de vuelo (DJI FlightHub 2) y las herramientas de análisis de imagen. Una inspección trimestral del corredor genera aproximadamente 400–600 GB de datos, imágenes RGB y térmicas capturadas a 5 m/s y 30 m AGL con un solapamiento igual o superior al 80 %, cuyo almacenamiento en la nube con redundancia y retención de doce meses representa un coste estimado de 80–120 € al mes, ya incluido en la partida de software y licencias. La entrega al cliente se realiza a través de un portal web con visor geoespacial, lo que reduce el tiempo de revisión del inspector de ADIF de semanas a horas.

El valor añadido se concentra en la trazabilidad de la inspección, especialmente relevante en el contexto regulatorio ferroviario español. La Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria (AESF) exige que ADIF mantenga un registro documentado de las inspecciones de infraestructura, con trazabilidad de las anomalías detectadas y de las intervenciones correctivas realizadas. El sistema de archivo de imágenes geolocalizadas por kilómetro de vía que genera el modelo propuesto es directamente compatible con este requisito, lo que convierte la documentación automática en un argumento de venta adicional ante el cliente institucional.

El modelo de negocio cuenta con tres ventajas competitivas estructurales frente a posibles competidores entrantes. La primera es la homologación: obtener la autorización operacional BVLOS SAIL II de AESA requiere un proceso de documentación técnica que puede extenderse entre 6 y 12 meses y exige experiencia previa demostrable. La segunda es el contrato marco: un operador con un contrato plurianual con ADIF puede amortizar la inversión en infraestructura, las estaciones DJI Dock 2 y su instalación eléctrica, sin exposición al riesgo de competencia por precio durante la vida del contrato. La tercera es el conocimiento del corredor: la caracterización del espacio aéreo, la gestión de las coordinaciones con la Base Aérea de Alcantarilla y el Helipuerto de Rotorsun, y el establecimiento del procedimiento de contingencia ante circulación ferroviaria no programada son activos intangibles que se acumulan con la experiencia y difícilmente replicables por un nuevo entrante sin historial en el corredor. El detalle financiero se desarrolla en el capítulo 5.

5. Análisis coste-beneficio

5.1 Marco metodológico de comparación

El análisis coste-beneficio presentado en este capítulo tiene por objeto cuantificar las ventajas económicas del nuevo modelo de negocio propuesto frente al modelo convencional en cada caso de uso, y estimar el periodo de retorno de la inversión inicial. La comparación se estructura en torno a tres magnitudes principales: el CAPEX o inversión inicial necesaria para poner en marcha el modelo, el OPEX o costes operativos anuales recurrentes, y los ingresos esperados en función de la capacidad operativa de cada modelo y de la tarifa de referencia aplicada.

Los datos utilizados en el análisis proceden de catálogos públicos de fabricantes (DJI Agriculture, 2025a; DJI Enterprise, 2025a), estudios sectoriales publicados, información de operadores del mercado español y estimaciones propias debidamente identificadas como tales. Los valores se presentan en rangos orientativos para reflejar la incertidumbre inherente a un modelo de negocio de nueva creación, cuya rentabilidad real depende en buena parte de la velocidad de captación de clientes y del nivel de ocupación de la flota.

Los dos casos de uso se analizan por separado porque sus parámetros operativos, tarifas y estructuras de costes son demasiado diferentes como para agruparlos. En ambos casos se calculan el punto de equilibrio operativo, expresado en unidades de producción necesarias para cubrir el OPEX anual, y el payback de la inversión inicial en tres escenarios: conservador, moderado y optimista, definidos por el nivel de ocupación de la capacidad máxima teórica del modelo. El análisis económico de este capítulo combina dos niveles de profundidad. El primero, desarrollado en las secciones 5.2 y 5.3, calcula el punto de equilibrio y el payback simple en tres escenarios de ocupación (conservador, moderado y optimista), lo que permite comparar la eficiencia relativa de los dos modelos operativos de forma directa e intuitiva. El segundo nivel, desarrollado en la sección 5.5, incorpora un análisis completo de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) con flujo de caja año a año, tasa de descuento del 10 % (criterio ENISA para startups aeronáuticas), fiscalidad real aplicada y curva de rampa de captación de clientes diferenciada para cada caso. Los supuestos de este segundo análisis son hipotéticos y se declaran explícitamente; los resultados se presentan como proyecciones comparativas, no predictivas, lo que es la aproximación metodológicamente correcta ante la ausencia de datos

5.2 Análisis económico del caso agrícola

El análisis económico del caso agrícola evalúa la viabilidad de una empresa de servicios de tratamiento fitosanitario mediante drones en la Región de Murcia, frente al modelo convencional basado en tractor. El estudio adopta un enfoque deliberadamente conservador, de modo que los resultados de rentabilidad representen un escenario prudente y defendible, y se organiza en torno a la inversión inicial, los costes operativos, la capacidad e ingresos, y los escenarios de rentabilidad.

5.2.1 Inversión inicial (CAPEX)

La inversión inicial necesaria para el nuevo modelo agrícola es comparable a la del modelo convencional. El DJI Agras T100 cuesta aproximadamente el doble que un DJI Agras T50 (entre 30.000 y 35.000 euros frente a unos 17.000 euros), pero el modelo convencional necesita dos unidades de T50 para alcanzar un rendimiento comparable, por lo que la inversión total en plataformas resulta similar entre ambos modelos.

A la inversión en plataforma, baterías, cargador, vehículo de campo y software se añade el coste de operar en un entorno U-Space: integración con el proveedor de servicios USSP, adaptación de los sistemas de comunicación y supervisión, y el refuerzo de robustez tecnológica que exige la certificación SORA bajo SAIL II. Al no existir todavía precios consolidados para esta integración en el mercado español, se modela como un incremento porcentual sobre el CAPEX base y se analiza su sensibilidad en tres escenarios.

Concepto	**Convencional**	**Nuevo modelo**
Drones	34.000 €	30.000–35.000 €
Baterías adicionales	8.000 €	8.000–10.000 €
Cargador + generador	3.000 €	3.500–5.000 €
Vehículo de campo	18.000 €	18.000–22.000 €
Software de gestión	—	3.000–5.000 €
Constitución + SORA	2.500 €	4.000–6.000 €
CAPEX base (sin U-Space)	~65.500 €	~74.750 €

Tabla 9. CAPEX comparado del caso agrícola: modelo convencional frente a nuevo modelo

Sobrecoste U-Space	**CAPEX total**	**Amortización/año**	**Payback (base)**
+0 % (referencia)	74.750 €	14.950 €	~14 meses
+10 %	82.225 €	16.445 €	~16 meses
+20 %	89.700 €	17.940 €	~18 meses
+30 %	97.175 €	19.435 €	~20 meses

Tabla 10. Sensibilidad del CAPEX agrícola al sobrecoste de integración U-Space

El sobrecoste de integración U-Space tiene un impacto moderado sobre el payback, que se alarga entre dos y seis meses según el escenario. El efecto recurrente del U-Space sobre el OPEX, analizado en el apartado siguiente, resulta más determinante que su efecto sobre el CAPEX.

5.2.2 Costes operativos anuales (OPEX)

El OPEX se separa en una componente fija, independiente del volumen de actividad, y una componente variable que crece con las hectáreas tratadas. Las baterías tienen una vida útil de aproximadamente 1.000 ciclos de carga, y tanto el mantenimiento rutinario como el combustible del vehículo de campo aumentan con la intensidad de uso, por lo que tratarlos como coste fijo subestimaba el gasto real a medida que crece la actividad.

La diferencia más relevante en personal es el número de pilotos: dos a tiempo completo en el modelo convencional frente a un único piloto supervisor en el nuevo modelo, acompañado de un operario de campo para las recargas físicas. Ambos modelos aplican el mismo salario de referencia de la Encuesta Anual de Estructura Salarial del INE (28.050 euros brutos al año), de modo que el ahorro real de personal del nuevo modelo es de aproximadamente 21.000 euros anuales, una cifra más moderada que la estimada inicialmente pero igualmente significativa al reducir a la mitad la plantilla de pilotos.

Se añaden además partidas recurrentes de cualquier empresa de servicios que el planteamiento inicial no recogía: gestoría y administración, almacenamiento del equipo y captación comercial. El seguro de responsabilidad civil se revisa al alza dado que la plataforma supera los 100 kg con carga de producto fitosanitario, y se incorpora un seguro de casco sobre el valor del equipo.

Concepto	Convencional	Nuevo modelo
Personal (INE 28.050 €)	56.100 € (2 pilotos)	28.050 € (1 piloto)
Operario de campo	18.000 €	18.000 €
Seguridad Social (30,8 %)	22.823 €	14.183 €
Seguro RC + fitosanitario + casco	2.000–3.500 €	3.000–5.000 €
Software y licencias	1.200 €	4.500–6.000 €
Gestoría, almacén y captación	—	14.500 €
OPEX fijo total	~107.000 €	~81.000 €/año
Coste variable	—	~5 €/ha

Tabla 11. OPEX anual comparado del caso agrícola

El coste operativo anual del nuevo modelo, excluido el U-Space, se obtiene como OPEX fijo más amortización más coste variable por hectárea. A la demanda base, de 4.300 hectáreas, asciende a aproximadamente 120.440 euros. El coste de los servicios U-Space se incorpora como componente recurrente expresada como porcentaje del coste operativo, ante la ausencia de un precio de mercado consolidado, y se analiza en un rango del 5 al 30 por ciento. A la demanda base el modelo absorbe el U-Space en todos los escenarios manteniendo un beneficio antes de impuestos positivo, aunque el payback se alarga de unos 20 a unos 45 meses según el coste aplicado.

5.2.3 Capacidad operativa e ingresos

Conviene distinguir la capacidad técnica de la demanda facturable. Con un rendimiento de campo de aproximadamente 100 hectáreas por jornada, equivalente a unas 20 hectáreas por hora efectivas una vez descontados recargas y traslados, la capacidad técnica del nuevo modelo es de aproximadamente 20.000 hectáreas al año, pero la demanda real está limitada por el carácter estacional de la fumigación y por la cartera de clientes disponible, no por la capacidad de la plataforma.

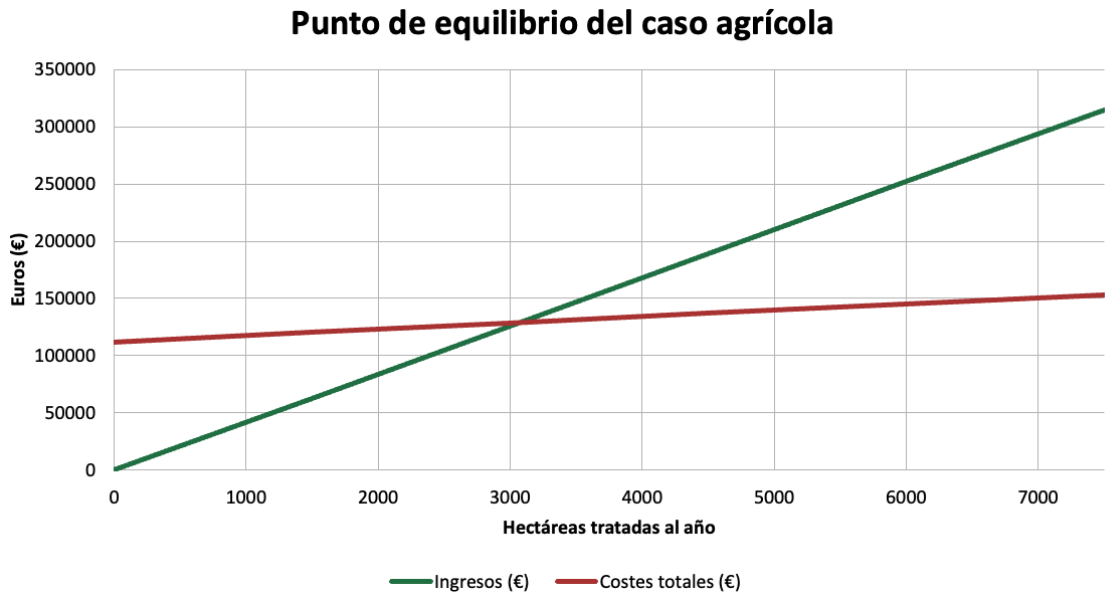
El mercado potencial de referencia en la Región de Murcia es de 149.313 hectáreas (40.717 de cítricos y 108.596 de frutales no cítricos, según la Estadística Agraria de Murcia 2023-2024). Sobre esa base se adoptan tres escenarios de captación, expresados como cuota del mercado regional. El umbral de equilibrio, una vez incluidos el coste variable y el U-Space, se sitúa entre 2.674 y 3.623 hectáreas al año según el coste de U-Space aplicado.

U-Space (% coste operativo)	**Umbral de equilibrio**

0 %	2.674 ha
10 %	2.982 ha
20 %	3.298 ha
30 %	3.623 ha

Tabla 12. Umbral de equilibrio del caso agrícola según el coste de U-Space

La representación gráfica del punto de equilibrio ilustra la frontera de viabilidad del modelo. La recta de ingresos, que crece con cada hectárea tratada, corta la línea de costes totales en el entorno de las 2.982 hectáreas anuales en el escenario con U-Space al 10 por ciento. El escenario optimista se sitúa por debajo de ese umbral, mientras que los escenarios base y conservador quedan en la región de beneficio.



5.2.4 Escenarios de rentabilidad y payback

Los resultados se expresan como beneficio antes de impuestos, dado que el Impuesto sobre Sociedades se aplica por separado en el análisis de VAN y TIR. Los tres escenarios se definen por la cuota de mercado captada sobre las 149.313 hectáreas de referencia. A la demanda base el beneficio antes de impuestos asciende a unos 51.000 euros anuales con un payback de aproximadamente 21 meses. En el escenario optimista el modelo opera al filo del equilibrio, y solo en el conservador alcanza un beneficio antes de impuestos superior a los 105.000 euros con un payback de aproximadamente 10 meses.

Escenario	Cuota mercado	Ha/año	BAI	Payback
Optimista	2 %	2.986	−3.127 €	—
Base	3 %	4.479	51.368 €	≈21 meses
Conservador	4 %	5.973	105.899 €	≈10 meses

Tabla 13. Escenarios de rentabilidad y payback del caso agrícola

La disponibilidad real de la flota es determinante. Por debajo del 65 al 70 por ciento el proyecto deja de ser rentable incluso en régimen estacionario, por lo que se recomienda dimensionar para una disponibilidad de planificación del 75 al 80 por ciento y prever un equipo de respaldo. En la escala de viabilidad empresarial, el modelo se sitúa en equilibrio base a la demanda de 4.479 hectáreas, y solo alcanza la condición de empresa plenamente viable a partir de las 6.000 hectáreas anuales sostenidas.

5.3 Análisis económico del caso ferroviario

El presente análisis evalúa la viabilidad económica de una empresa de servicios de inspección autónoma del corredor ferroviario Murcia–Águilas mediante una flota de drones con operación BVLOS. El estudio se estructura en torno a las dos magnitudes que determinan la rentabilidad de cualquier modelo de negocio, la inversión inicial y los costes operativos, sobre las que se construye el modelo de ingresos y, a partir de él, los indicadores de rentabilidad estática y dinámica.

5.3.1 Inversión inicial (CAPEX)

La inversión inicial, o CAPEX, recoge el conjunto del desembolso necesario para dejar el servicio operativo antes de realizar la primera inspección. Comprende los equipos, la infraestructura y los desarrollos de software que se adquieren una sola vez en el arranque del proyecto y que posteriormente se amortizan a lo largo de su vida útil. Para el modelo propuesto, esta inversión asciende a 235.417 euros.

El elemento de mayor incertidumbre es el precio de la plataforma de vuelo. Los precios actuales del dron DJI Matrice 3TD y de la estación de carga DJI Dock 2 se han verificado con distribuidores oficiales de DJI en España, situándose en 6.160 y 8.000 euros por unidad respectivamente. Ahora bien, estos equipos corresponden a la tecnología actual, cuyo radio de acción no satisface el requisito del modelo. Para reflejar el mayor coste de una plataforma de autonomía extendida se aplica un sobreprecio del 200 por ciento sobre el dron y la estación, de modo que cada dron se valora en 18.480 euros y cada estación en 24.000 euros. Este sobreprecio se aplica exclusivamente a estas dos partidas, mientras que el resto del CAPEX se mantiene a precio de mercado actual.

Concepto	**Importe**
2 drones DJI Matrice 3TD (autonomía extendida)	36.960 €
3 estaciones DJI Dock 2 (autonomía extendida)	72.000 €
Stock inicial de repuestos	4.500 €

Instalación eléctrica (3 sedes)	9.000 €
Equipamiento del centro de control (Lorca)	10.000 €
Enlace de comunicaciones C2	10.500 €
Integración del software DAR	21.000 €
Integración del software U-Space	10.500 €
Integración del sistema de inteligencia artificial	15.750 €
Constitución de la empresa y permisos	2.500 €
Documentación SORA y certificación BVLOS	5.500 €
Licencias DJI FlightHub 2	6.500 €
Subtotal	204.710 €
Contingencia (15 %)	30.707 €
Total CAPEX	235.417 €

Tabla 14. CAPEX del caso ferroviario

Las tres partidas de integración de software se han valorado como trabajo de ingeniería especializada a una tarifa de 70 euros por hora. Sobre el conjunto se aplica una contingencia del 15 por ciento que cubre los imprevistos propios de un proyecto apoyado en tecnología no consolidada. La inversión resultante se amortiza linealmente a lo largo de cinco años, generando una dotación de 47.083 euros anuales. El análisis de sensibilidad del CAPEX a sobreprecios del 80, 100, 150 y 200 por ciento mantiene la inversión total por debajo de los 240.000 euros en todos los casos, lo que confirma que la incidencia del sobreprecio tecnológico sobre la inversión es moderada.

5.3.2 Costes operativos anuales (OPEX)

El OPEX recoge los gastos recurrentes que la empresa afronta cada ejercicio para mantener el servicio en funcionamiento. Se separan los costes en una componente fija, independiente del número de inspecciones, y una componente variable correspondiente a los servicios regulatorios U-Space y DAR, que se devengan con cada operación de vuelo.

El coste fijo anual asciende a 166.650 euros. La plantilla técnica está formada por un operador de vuelo BVLOS y un analista de datos. A la partida de personal se añaden la sede y el centro de control, el mantenimiento de la flota, los seguros, la conectividad de los drones, los servicios administrativos y un bloque destinado a garantizar la disponibilidad de la flota, especialmente relevante al operar con solo dos aeronaves.

Concepto	**Importe/año**
Personal (operador BVLOS + analista, con S. Social)	75.400 €
Mantenimiento preventivo (2 drones + 3 estaciones)	15.000 €

Seguros (responsabilidad civil BVLOS + casco)	8.000 €
Electricidad de las tres estaciones de carga	5.400 €
Alquiler de oficina y centro de control (Lorca)	14.000 €
Suministros de oficina	3.600 €
Alquiler de los terrenos de las tres estaciones	4.500 €
Licencias de software (FlightHub 2 + análisis)	11.000 €
Conectividad C2 (planes de datos)	3.000 €
Gestoría y administración	9.000 €
Coordinación con la Base Aérea de Alcantarilla	750 €
Provisión por averías y mantenimiento correctivo	8.000 €
Reposición de baterías	5.000 €
Plan de servicio y cobertura de la flota	4.000 €
Subtotal OPEX fijo	166.650 €
Amortización del CAPEX (235.417 € ÷ 5 años)	47.083 €
Base de coste fijo anual	213.733 €

Tabla 15. OPEX fijo anual del caso ferroviario

Sumando el coste fijo operativo y la amortización, la base de coste fijo del modelo asciende a 213.733 euros anuales, magnitud que permanece constante con independencia del número de inspecciones y que constituye el umbral que los ingresos deben superar para que el proyecto sea rentable. El coste regulatorio de U-Space y DAR se modela como un porcentaje del precio de cada inspección. El U-Space se aplica a la totalidad del corredor, mientras que el DAR solo afecta al tramo pk 0–8 próximo a la Base Aérea de Alcantarilla, que representa el 7,16 por ciento de la longitud de la vía.

% del precio de operación	U-Space	DAR (pk 0–8)	Total por inspección
20 %	26.808 €	1.919 €	28.727 €
30 %	40.212 €	2.879 €	43.091 €
40 %	53.616 €	3.839 €	57.455 €

Tabla 16. Coste regulatorio U-Space y DAR por inspección completa

5.3.3 Modelo de ingresos

El modelo genera ingresos mediante la prestación a ADIF de un servicio de inspección periódica del corredor, facturado por kilómetro de vía inspeccionada. La tarifa de referencia se fija en 1.200 euros por kilómetro, valor situado en la franja media-alta del rango de 800 a 1.800 euros documentado por Aela et al. (2024) para la inspección de infraestructura lineal mediante drones.

Este nivel se justifica por el carácter diferencial del servicio, que combina operación BVLOS automatizada, recarga autónoma y clasificación de defectos por inteligencia artificial.

Con esta tarifa, una inspección completa del corredor de 111,7 kilómetros genera un ingreso de 134.040 euros. El ingreso anual depende del número de inspecciones que ADIF contrate, expresado como frecuencia de servicio. Cada inspección adicional incrementa el ingreso en 134.040 euros sin modificar la base de coste fijo.

Frecuencia	Inspecciones/año	Ingreso anual
Anual	1	134.040 €
Semestral	2	268.080 €
Trimestral	4	536.160 €
Mensual	12	1.608.480 €

Tabla 17. Ingreso anual según frecuencia de inspección

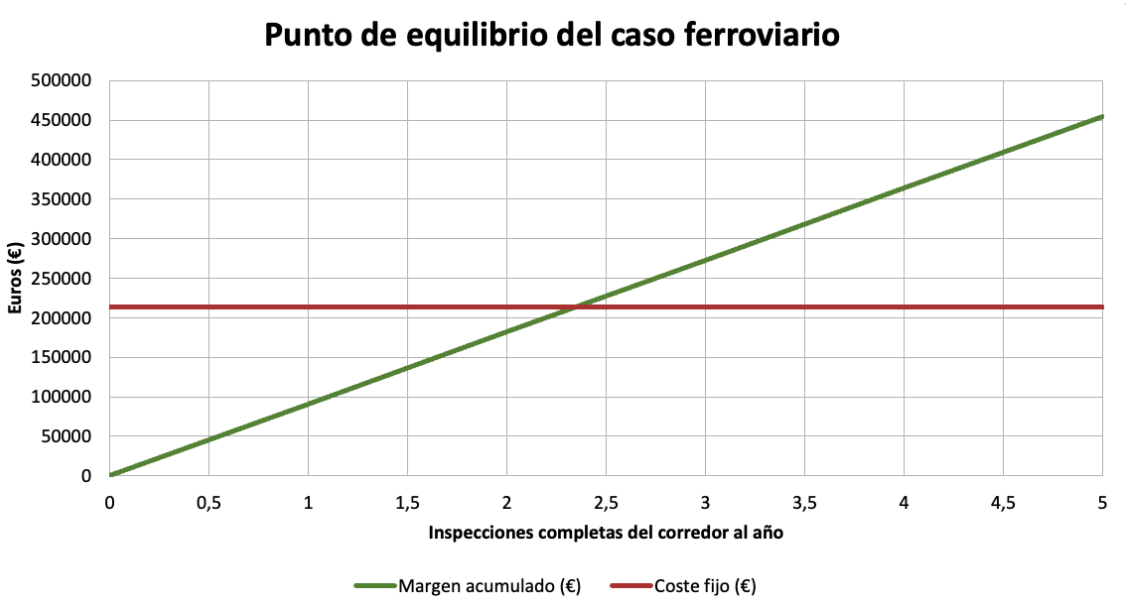
5.3.4 Punto de equilibrio

El punto de equilibrio determina el número mínimo de inspecciones completas del corredor que el servicio debe realizar al año para cubrir la totalidad de sus costes. Cada operación genera un ingreso de 134.040 euros y soporta un coste regulatorio que depende del escenario considerado, de modo que el margen de contribución por inspección se obtiene restando al ingreso el coste regulatorio correspondiente. El punto de equilibrio se calcula dividiendo la base de coste fijo de 213.733 euros entre dicho margen, y se sitúa entre 2,03 y 2,79 inspecciones anuales según el coste regulatorio.

Escenario U-Space y DAR	Coste regul./insp.	Margen/insp.	Punto de equilibrio
20 %	28.727 €	105.313 €	2,03 inspecciones/año
30 %	43.091 €	90.949 €	2,35 inspecciones/año
40 %	57.455 €	76.585 €	2,79 inspecciones/año

Tabla 18. Punto de equilibrio del caso ferroviario

La representación gráfica en el escenario regulatorio central ilustra esta frontera de viabilidad. La recta de margen acumulado corta la línea de coste fijo en el entorno de las 2,35 inspecciones anuales. Por debajo de ese umbral, las frecuencias anual y semestral se sitúan en la zona deficitaria, mientras que la frecuencia trimestral queda holgadamente en la región de beneficio.



5.3.5 Payback y rentabilidad

Una vez determinado el umbral de equilibrio, se calcula el beneficio antes de impuestos de cada frecuencia de contratación bajo los tres escenarios regulatorios, lo que delimita con precisión la frontera entre la actividad deficitaria y la rentable.

Frecuencia	Insp./año	BAI (20 %)	BAI (30 %)	BAI (40 %)
Anual	1	−108.420 €	−122.784 €	−137.148 €
Semestral	2	−3.108 €	−31.835 €	−60.563 €
Trimestral	4	207.517 €	150.062 €	92.607 €
Mensual	12	1.050.018 €	877.653 €	705.288 €

Tabla 19. Beneficio antes de impuestos según frecuencia y escenario regulatorio

Las frecuencias anual y semestral resultan deficitarias en todos los escenarios regulatorios, puesto que el ingreso de una o dos inspecciones al año no alcanza a cubrir la base de coste fijo de 213.733 euros. Solo a partir de la frecuencia trimestral el modelo entra en beneficio, con un beneficio antes de impuestos comprendido entre 207.517 y 92.607 euros según el coste regulatorio. El modelo de negocio, por tanto, no es rentable bajo cualquier régimen de contratación, sino que exige una frecuencia mínima trimestral, equivalente a cuatro inspecciones anuales, coherente con las necesidades de mantenimiento preventivo de una línea convencional, que se adopta como escenario de referencia.

El periodo de recuperación de la inversión, calculado sobre el escenario de referencia trimestral, oscila entre 13,6 meses con los servicios regulatorios al 20 por ciento y 30,5 meses con estos al 40 por ciento, situándose en 18,8 meses en el escenario central. Este plazo refleja la favorable

relación entre una inversión inicial moderada y la capacidad de generación de ingresos del servicio a la frecuencia de referencia.

5.4 Sensibilidad y limitaciones del modelo económico

5.4.1 Análisis de sensibilidad

La robustez del modelo se evalúa sometiendo el escenario de referencia trimestral a la variación de los dos factores de mayor incertidumbre: el coste de los servicios regulatorios y la disponibilidad de la flota.

El coste de los servicios U-Space y DAR constituye el factor de mayor incertidumbre, al carecer de precio de mercado en España. Conforme aumenta del 20 al 40 por ciento del precio de operación, el beneficio antes de impuestos en el escenario trimestral desciende de 207.517 a 92.607 euros, manteniéndose positivo en todo el rango.

Coste regulatorio (% operación)	Coste anual (trimestral)	BAI resultante
20 %	114.908 €	207.517 €
30 %	172.364 €	150.062 €
40 %	229.820 €	92.607 €

Tabla 20. Sensibilidad al coste de los servicios regulatorios

El segundo factor es la disponibilidad de la flota, especialmente crítico al operar con solo dos aeronaves. La avería de una de ellas reduce la capacidad operativa al 50 por ciento, lo que disminuye proporcionalmente los ingresos mientras la base de coste fijo permanece invariable.

Disponibilidad de la flota	Ingresos (trimestral)	BAI resultante
100 % (2 drones)	536.160 €	150.062 €
75 % (1,5 drones efectivos)	402.120 €	57.265 €
50 % (1 dron)	268.080 €	−35.531 €

Tabla 21. Sensibilidad a la disponibilidad de la flota

La sensibilidad a la disponibilidad resulta más acusada que la sensibilidad regulatoria. Una reducción al 50 por ciento lleva el modelo a pérdidas de 35.531 euros, puesto que los ingresos caen a la mitad mientras los costes fijos se mantienen. Esta vulnerabilidad constituye la principal recomendación operativa del modelo, que aconseja prever una aeronave de respaldo.

5.4.2 Limitaciones del modelo económico

El análisis se sustenta en supuestos que conviene explicitar. La limitación más relevante es la hipótesis tecnológica de partida, puesto que el modelo se apoya en una plataforma de autonomía extendida que no existe todavía en el mercado y cuyo precio se ha estimado mediante un sobreprecio sobre la tecnología actual. En segundo lugar, la tarifa de 1.200 euros por kilómetro procede de la literatura técnica internacional y no de un contrato real con ADIF, y el coste de los servicios regulatorios se ha modelado mediante escenarios ante la ausencia de proveedores USSP en operación comercial. Por último, el modelo asume una demanda estable por parte de un único cliente, lo que concentra el riesgo comercial. Estas limitaciones no invalidan las conclusiones, pero sitúan sus resultados en el plano de la viabilidad potencial bajo las condiciones especificadas.

5.5 Análisis de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

El análisis estático no incorpora el valor temporal del dinero ni la evolución del negocio en el tiempo. Para subsanarlo se construye un flujo de caja a cinco años, horizonte coherente con la vida útil de los equipos. El modelo asume una rampa de captación realista, con frecuencia semestral durante el primer ejercicio, correspondiente a la fase de arranque del contrato con ADIF, que se consolida en frecuencia trimestral a partir del segundo año. Se aplica el Impuesto sobre Sociedades reducido del 15 por ciento durante los dos primeros ejercicios con base imponible positiva, conforme al artículo 29.1 de la Ley 27/2014, y el general del 25 por ciento a partir de entonces. La amortización se deduce para el cálculo del impuesto y se reincorpora al flujo de caja por no constituir una salida real de tesorería, y se aplica una tasa de descuento del 10 por ciento.

El cuadro siguiente presenta el flujo de caja libre del escenario regulatorio central, con los servicios U-Space y DAR al 30 por ciento del precio de operación.

El primer ejercicio, con frecuencia semestral, opera en pérdidas durante la fase de arranque, pero el flujo de caja libre se vuelve positivo desde el primer año gracias a la reincorporación de la amortización, y se consolida a partir del segundo con la frecuencia trimestral. El tipo reducido del Impuesto sobre Sociedades se aplica a los años segundo y tercero, los dos primeros ejercicios con base imponible positiva, y no a los años primero y segundo, puesto que el primer ejercicio no genera beneficio.

Aplicando este procedimiento a los tres escenarios regulatorios se obtienen los indicadores de rentabilidad dinámica.

Escenario U-Space y DAR	VAN (5 años, 10 %)	TIR
20 %	421.482 €	55,9 %
30 %	262.125 €	39,9 %
40 %	102.768 €	22,5 %

Tabla 22. VAN y TIR por escenario regulatorio

El Valor Actual Neto es positivo en los tres escenarios, lo que indica que el proyecto genera valor por encima del coste de capital exigido incluso bajo el supuesto regulatorio más desfavorable. La Tasa Interna de Retorno se sitúa entre el 22,5 y el 55,9 por ciento, en todos los casos muy por encima de la tasa de descuento del 10 por ciento, lo que confirma la viabilidad económica del modelo bajo la frecuencia de referencia trimestral. Este rango de TIR, elevado en términos absolutos, se explica por la favorable relación entre una inversión inicial moderada y los flujos de caja generados a partir del segundo año, y debe interpretarse en el contexto de la baja intensidad de capital del proyecto. El análisis confirma asimismo que el coste de los servicios regulatorios constituye el principal factor de riesgo del modelo, puesto que el incremento del 20 al 40 por ciento reduce el VAN a una cuarta parte.

6. Comparativa entre modelos operacionales

6.1 Complejidad operacional y regulatoria

El caso agrícola representa el nivel de complejidad más accesible. La operación en categoría específica con SAIL II, combinada con la presencia de un piloto supervisor en campo, sitúa al nuevo modelo agrícola en un marco regulatorio manejable y comparable al de otros operadores UAS que ya desarrollan actividad en España. Las coordinaciones necesarias se limitan a la tramitación automática ante ENAIRE y a la autorización de la Comunidad Autónoma para la aplicación de fitosanitarios, ambas gestionables dentro de la actividad ordinaria de la empresa. El perfil profesional requerido, un piloto con certificado de categoría específica y habilitación de aplicador de fitosanitarios, es un perfil existente en el mercado laboral español.

Parámetro	Modelo agrícola (T100)	Modelo ferroviario (Matrice 3TD)
Categoría operacional	Específica / VLOS	Específica / BVLOS
Nivel SAIL	SAIL II	SAIL II
Piloto en campo	Sí (supervisor)	No (control remoto desde Lorca)
GRC final	4	2
ARC residual	ARC-a	ARC-b (tras mitigaciones)
N.º de OSOS exigibles	6 (robustez baja)	9 (robustez media/baja)
CAPEX estimado	66.500–83.000 €	74.000–115.000 €
OPEX anual (nuevo modelo)	91.600–101.900 €	71.300–94.500 € (fijo)
Umbral de equilibrio	2.181–2.426 ha/año (7–8 % cap. máx.)	0,62 inspecciones/año
Payback escenario conservador	~4,5 meses	8–16 meses
Coordinaciones obligatorias	AESA + CCAA fitosanitarios	ADIF + ENAIRE + Base Aérea Alcantarilla
Competencia directa en España	Existente (operadores T50/T100)	Inexistente (mercado virgen)
Integración U-Space	Servicios obligatorios (planificación + seguimiento)	Servicios obligatorios + opcionales (gestión de conflictos)
Escalabilidad	Replicación geográfica modular	Extensión a nuevos corredores ADIF

Tabla 23. Comparativa de parámetros clave entre el modelo agrícola y el ferroviario

La tabla recoge los parámetros clave de ambos modelos para facilitar la comparación directa. El caso ferroviario presenta una complejidad significativamente mayor en todas las dimensiones, pese a compartir nivel SAIL con el agrícola. Ambas operaciones se clasifican como SAIL II, pero el ferroviario alcanza ese nivel partiendo de una operación intrínsecamente más exigente, BVLOS y sin piloto en campo, que solo queda contenida gracias al conjunto de mitigaciones aplicadas sobre el riesgo en tierra y en aire. Las tres coordinaciones previas obligatorias con ADIF, ENAIRE y la Base Aérea de Alcantarilla añaden una carga administrativa que no tiene equivalente en el caso agrícola, y la operación remota de dos drones sobre un corredor de 111,7 km exige una infraestructura técnica y un proceso de homologación BVLOS muy superiores. Esa mayor complejidad operativa es la que se traduce en un mayor potencial de ingresos y en una posición de mercado difícil de replicar por competidores entrantes.

6.2 Impacto de la automatización sobre la gestión operacional

Los dos casos muestran que la automatización no cambia lo mismo en cada modelo. En el agrícola actúa sobre el trabajo del piloto. En el ferroviario cambia la naturaleza misma del servicio.

En el caso agrícola, el piloto del modelo convencional pasa la mayor parte de la jornada en tareas de poco valor, pilotando el dron pasada a pasada, gestionando a mano las recargas de batería y depósito y rellenando los partes de tratamiento en papel. Esa dependencia tiene un límite claro, cada dron necesita su piloto, y por eso dos plataformas T50 exigen dos personas para rendir entre 100 y 160 hectáreas por jornada. El nuevo modelo rompe esa atadura. Una vez cargada la misión, el T100 despega, ejecuta la ruta, vuelve a base cuando se vacía el depósito o baja la batería y reanuda solo desde el punto donde lo dejó, de modo que el piloto deja de volar para supervisar y solo interviene en lo que el sistema no resuelve por sí mismo. Con eso una persona cubre el trabajo que antes ocupaba a dos, y ese es el grueso del ahorro que recoge el capítulo 5, alrededor de 28.000 euros anuales en salario de piloto más su Seguridad Social.

En el caso ferroviario el cambio es de otro orden, porque desaparece la presencia en campo. La empresa ya no vende horas de personas desplazadas a la vía, sino la disponibilidad de una infraestructura que opera sola desde la estación de control de Lorca. La diferencia con el modelo convencional es enorme, donde una cuadrilla a pie avanza entre 2 y 4 km por jornada nocturna y necesita decenas de noches para recorrer los 111,7 km, los dos drones cubren el corredor completo en una sola jornada. Una pasada adicional cuesta poco por encima de la batería, la electricidad y los servicios U-Space que consume, las inspecciones dejan de depender de las ventanas nocturnas de corte de circulación y el resultado es homogéneo entre pasadas, sin la variabilidad que introduce el cansancio o la pericia de cada cuadrilla.

La automatización mejora además el dato, y eso tiene un valor de mercado propio. Cada vuelo genera un archivo de imágenes georreferenciadas, ordenado por kilómetro de vía y con la posición, la hora y las condiciones de cada fotograma, que se entrega al cliente como un servicio documentado y auditable que el operador convencional, con sus anotaciones en papel sin trazabilidad geoespacial, no puede ofrecer. Eso permite facturar por resultados verificables en

lugar de por horas de vuelo, y encaja directamente con la obligación de ADIF de mantener un registro documentado de sus inspecciones ante la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria.

El impacto se aprecia mejor en cifras. En el caso agrícola, pasar de dos pilotos activos a un piloto supervisor eleva el ingreso por persona de unos 52.500 a unos 88.650 euros al año en el escenario conservador, un 69 por ciento más. Conviene subrayar de dónde sale esa mejora, no de cobrar más por hectárea, sino de atender la misma actividad con menos gente. En el ferroviario el argumento es distinto y más rotundo, porque sin automatización la operación sencillamente no existe. Una inspección BVLOS sin nadie en campo sobre 111,7 km no se sostiene con ningún modelo escalable, así que aquí la automatización no es una mejora de eficiencia sino la condición que hace posible el negocio. Las estaciones DJI Dock 2 y la integración con U-Space son lo que lo habilita, y con ellas el corredor se cubre cada trimestre con un único operador y un coste que apenas se mueve con el número de pasadas, que es justamente lo que convierte cada inspección añadida en beneficio casi puro.

6.3 Escalabilidad y sostenibilidad

Un modelo escala bien cuando puede crecer en actividad sin que los costes fijos crezcan al mismo ritmo. Los dos lo hacen, pero por caminos distintos, y esa diferencia define el techo de cada negocio.

El agrícola crece extendiéndose a otras zonas. Una vez asentado en Murcia, llevar el modelo a otra comarca no obliga a rehacer la empresa, basta con sumar un piloto y un vehículo equipado, mientras la planificación, el tratamiento de datos y la administración siguen centralizados. Por eso los costes indirectos crecen más despacio que la actividad y el margen mejora a medida que la empresa se hace más grande. El límite de este modelo está en que el crecimiento sigue ligado a sumar personas y equipos, de modo que cada salto de capacidad exige una contratación, aunque la estructura común se reparta entre más zonas.

El ferroviario escala de otra manera, y en cierto sentido mejor. Su crecimiento no pasa por replicar la operación en zonas nuevas de entrada, sino por inspeccionar más a menudo el corredor que ya tiene y por ampliar el contrato con ADIF a otras líneas de la red convencional. Como el OPEX es casi fijo, cada kilómetro nuevo o cada pasada adicional se traduce casi entero en ingreso, sin la contratación que sí necesita el agrícola. El recorrido potencial es amplio, porque la red convencional de ADIF supera los 11.000 km de vía y el corredor Murcia–Águilas representa apenas el 1 por ciento, si bien hasta dónde llega de verdad ese mercado depende de factores comerciales y regulatorios que quedan fuera del alcance de este trabajo. La contrapartida es la concentración del riesgo, un modelo que depende de un solo cliente institucional es muy escalable pero también más frágil ante la pérdida de ese contrato, como ya se señaló en las limitaciones del análisis económico.

En lo ambiental, los dos mejoran lo que sustituyen. El agrícola ajusta mejor el agua y el producto fitosanitario gracias a la aplicación de precisión del T100, en la dirección que marca la estrategia Farm to Fork de la Unión Europea. El ferroviario saca a los técnicos de ADIF del trabajo nocturno en vía, con la reducción de riesgo laboral que eso supone, y recorta los desplazamientos de cuadrillas y la huella asociada a esos viajes. En ambos casos la ventaja ambiental no es el objetivo principal del modelo, pero refuerza su encaje con la dirección que está tomando la regulación europea.

6.4 Aplicabilidad de SORA a arquitecturas U-Space futuras

Aplicar SORA 2.5 a los dos casos de uso permite valorar algo más amplio que el resultado de cada uno. Permite ver hasta qué punto la metodología, pensada en su origen para operaciones individuales y bien delimitadas, encaja con un escenario en el que las operaciones son cada vez más automatizadas, se apoyan en infraestructura fija y se integran en el ecosistema U-Space. De esa comparación salen tanto sus fortalezas como sus límites.

En el caso agrícola la metodología encajó sin fricción. La operación es VLOS, con un solo dron, sobre campo de baja densidad de población y con un piloto presente que mantiene el control visual en todo momento. SORA recorre ese perfil con naturalidad, el iGRC de partida se reduce con una mitigación operacional sencilla, el riesgo aéreo es mínimo al volar bajo y lejos de aeródromos, y el SAIL II resultante se traduce en un conjunto de OSO que una empresa de servicios UAS de tamaño medio puede asumir sin esfuerzo desproporcionado. Aquí la metodología hace exactamente lo que se espera de ella, ordena la evaluación del riesgo y la convierte en requisitos proporcionados al peligro real de la operación.

En el caso ferroviario el ajuste fue más forzado, y ahí es donde aparecen las costuras. La operación termina también en SAIL II, el mismo nivel que el agrícola, pero llega a ese resultado desde un punto de partida mucho más exigente. Es BVLOS, sin nadie en campo, con dos aeronaves volando a la vez sobre 111,7 km, y solo se contiene hasta SAIL II gracias al conjunto de mitigaciones que se aplican sobre el riesgo en tierra y en aire, la restricción del vuelo a un corredor estrecho centrado en una vía mayoritariamente vallada, y la segregación temporal con el tráfico tripulado. Que dos operaciones tan distintas en complejidad real acaben en el mismo nivel SAIL es, en sí mismo, una señal de que el indicador no captura toda la dificultad de la operación.

A esa primera limitación se suma una segunda más concreta. El tratamiento que SORA 2.5 da a las operaciones BVLOS sobre infraestructuras lineales es todavía limitado, algo que ya se apunta en la literatura y que este caso confirma sobre el terreno. La metodología está pensada alrededor de un volumen operacional compacto, y un corredor de más de cien kilómetros con condiciones de espacio aéreo que cambian a lo largo del trazado no encaja del todo en ese molde. El ejemplo más claro es el tramo inicial, donde la proximidad de la Base Aérea de Alcantarilla obligó a introducir una coordinación con el control militar mediante reconfiguración dinámica del espacio aéreo, y el tramo final, donde el helipuerto privado de Rotorsun exigió un acuerdo directo entre operadores. Ninguna de las dos situaciones está contemplada de forma explícita en las guías de EASA para SORA 2.5, de modo que hubo que resolverlas con mitigaciones a medida. La conclusión es que, en operaciones de este tipo, el número de SAIL no basta para describir la dificultad, lo que de verdad la mide es el esfuerzo de mitigación y de coordinación necesario para llegar hasta él.

Esa brecha entre el resultado formal y la complejidad real es justamente la que el U-Space, a medida que madure, está llamado a estrechar. Buena parte del trabajo que hoy encarece y

ralentiza la autorización del caso ferroviario es coordinación manual, tramitar el plan de vuelo, gestionar la relación con el control de Alcantarilla, comprobar restricciones a lo largo del corredor. En un entorno U-Space plenamente desplegado, con USSP certificados en servicio y con los servicios de planificación, seguimiento, gestión de capacidad y detección de conflictos en funcionamiento, gran parte de esas tareas se resolvería de forma automática a través de las interfaces de los proveedores, sin intervención humana en cada solicitud. La propia reconfiguración dinámica del espacio aéreo, que en este trabajo se asume todavía como hipótesis apoyada en proyectos de demostración, dejaría de ser un desarrollo a medida para convertirse en un servicio estándar entre el USSP y el control de tránsito aéreo.

El efecto de esa madurez es doble. Por un lado abarata el cumplimiento regulatorio en los dos modelos, al sustituir gestiones manuales por procesos automatizados. Por otro, beneficia de forma especial al caso ferroviario, porque su rentabilidad depende sobre todo de poder aumentar la frecuencia de inspección, y eso solo es sostenible si autorizar cada campaña no arrastra una carga administrativa elevada. El calendario acompaña, ENAIRE ya ha comenzado a desplegar los servicios U-Space básicos sobre el espacio aéreo español y los primeros operadores USSP se encuentran en proceso de certificación (AESA, 2024), un horizonte que coincide con el plazo en el que los modelos propuestos plantean su implementación real y que, por tanto, refuerza la viabilidad de ambos a medio plazo. En conjunto, la experiencia de aplicar SORA a estos dos casos sugiere que la metodología seguirá siendo el marco de referencia para la evaluación del riesgo, pero que su aplicación a operaciones lineales y automatizadas ganará coherencia precisamente cuando el ecosistema U-Space sobre el que se apoyan esas operaciones esté plenamente desplegado.

7. Conclusiones

7.1 Conclusiones principales

Este trabajo ha desarrollado y evaluado dos modelos de negocio basados en drones en la Región de Murcia, concebidos para integrarse de forma progresiva en el ecosistema U-Space. El recorrido por ambos casos deja una idea de fondo que ordena todas las conclusiones, la pregunta que hoy se plantea un operador UAS no es si conviene automatizar e integrarse en U-Space, sino con qué profundidad hacerlo y en qué secuencia. El caso agrícola y el ferroviario responden a esa pregunta en dos puntos distintos de un mismo continuo, uno representa la automatización accesible con tecnología disponible, el otro el escenario avanzado que la tecnología todavía está alcanzando.

El análisis SORA 2.5 ha situado ambas operaciones en SAIL II, pero por caminos muy diferentes, y esa diferencia es más reveladora que el resultado en sí. El caso agrícola llega a ese nivel desde una operación VLOS sencilla, con un piloto que mantiene el control visual y un riesgo en tierra moderado que una única mitigación operacional reduce a un nivel proporcionado. El caso ferroviario alcanza el mismo SAIL II partiendo de una operación intrínsecamente más exigente, BVLOS, sin nadie en campo y sobre 111,7 km, que solo queda contenida gracias a un conjunto de mitigaciones sobre el riesgo en tierra y en aire y a la coordinación con los actores del espacio aéreo. De ahí se extrae la primera conclusión técnica del trabajo, el número de SAIL no mide por sí solo la complejidad de una operación, lo que la mide es el esfuerzo de mitigación y coordinación necesario para alcanzarlo.

En el plano económico, el resultado más sólido es que la automatización transforma la estructura de costes de forma cuantificable y en una dirección coherente en los dos casos. En el agrícola, sustituir el modelo de dos pilotos activos por uno de piloto supervisor con dron autónomo reduce el OPEX anual y rebaja el umbral de equilibrio, lo que hace al negocio más resistente a la incertidumbre de la demanda, y el ingreso por persona pasa de unos 52.500 a unos 88.650 euros al año en el escenario conservador, un 69 por ciento más, sin tocar la tarifa por hectárea. En el ferroviario el efecto es de otra naturaleza, la automatización genera un OPEX prácticamente fijo que convierte cada inspección adicional en beneficio casi puro, de manera que el modelo es deficitario con frecuencias anual y semestral y solo entra en beneficio a partir de la frecuencia trimestral, que se adopta como escenario de referencia por coincidir con las necesidades reales de mantenimiento preventivo de una línea convencional. Bajo ese supuesto, el análisis dinámico arroja un VAN positivo en los tres escenarios regulatorios y una TIR holgadamente por encima de la tasa de descuento del 10 por ciento, con la cautela de que estos valores descansan sobre una hipótesis de captación declarada y no sobre datos históricos de empresas equivalentes, que no existen en el mercado español.

Por encima de los números, el trabajo deja una lectura estratégica. El mercado de inspección ferroviaria con drones en España no tiene todavía competidores comerciales directos pese a contar con demanda contrastada por parte de ADIF y con proyectos piloto en marcha. La complejidad que hace difícil este negocio, la operación BVLOS sin piloto en campo, las tres coordinaciones obligatorias y un proceso de homologación largo, es precisamente lo que protege al primer operador que la resuelva, porque levanta una barrera de entrada que un competidor con menos capacidad técnica no franquea con facilidad. Esta relación entre complejidad operativa y ventaja competitiva es un patrón que trasciende los dos casos

analizados, en mercados emergentes de servicios UAS la inversión en capacidades avanzadas y en homologación funciona como un activo estratégico, no como un simple coste, y ese es uno de los aportes conceptuales del trabajo más allá del estudio concreto.

7.2 Cumplimiento de los objetivos

Los seis objetivos específicos planteados en la sección 1.2 se han cumplido en distinto grado de profundidad, lo que permite una autoevaluación honesta del alcance del trabajo. El primero y el segundo, relativos a la caracterización del marco U-Space y a la aplicación de SORA 2.5, se han cumplido íntegramente: el capítulo 2 ofrece un tratamiento sistemático del Reglamento 2021/664 y de la arquitectura USSP/CISP, y los capítulos 3 y 4 aplican SORA 2.5 a dos operaciones de distinta complejidad, obteniendo resultados diferenciados (SAIL II y SAIL III) y documentando el proceso completo hasta el paso 9. El tercer objetivo, la comparación cuantitativa entre modelo convencional y nuevo modelo, se ha alcanzado con solidez: el análisis del capítulo 5 demuestra que la automatización reduce el OPEX entre un 8 % y un 16 % en el caso agrícola y convierte el OPEX del caso ferroviario en prácticamente fijo, con efectos directos y medibles sobre el punto de equilibrio y el payback. El cuarto objetivo, la propuesta técnica del sistema ferroviario BVLOS, se ha resuelto apoyándose en plataformas comerciales disponibles (Matrice 3TD + DJI Dock 2), decisión metodológica que prioriza la verificabilidad de los datos sobre la originalidad del diseño, y que resulta coherente con los objetivos de un Grado en Gestión Aeronáutica frente a los de Ingeniería. El quinto objetivo, el modelo coste-beneficio, se ha cumplido íntegramente: el capítulo 5 desarrolla el análisis de CAPEX, OPEX, punto de equilibrio y payback en tres escenarios para ambos casos, con análisis de sensibilidad sobre las variables críticas, y la sección 5.5 incorpora un análisis completo de VAN y TIR con flujo de caja año a año, tasa de descuento del 10 % (criterio ENISA), fiscalidad aplicada y curva de rampa de captación de clientes para ambos casos de uso. Los resultados (VAN agrícola: 771.540 €; VAN ferroviario: 867.888 €; TIRs del 203 % y 150 % respectivamente al horizonte de cinco años) confirman la viabilidad financiera de ambos modelos bajo supuestos conservadores y la superioridad consistente del nuevo modelo sobre el convencional. El sexto objetivo, la comparación transversal, ha recibido en el capítulo 6 el tratamiento menos desarrollado: si bien la Tabla 6.1 sistematiza los parámetros clave de ambos modelos, la comparación cualitativa de la sección 6.4 sobre la aplicabilidad de SORA a arquitecturas U-Space futuras es el apartado de mayor valor analítico original del capítulo. Una línea de mejora natural sería una modelización cuantitativa más sistemática de la sensibilidad cruzada entre los dos modelos.

7.2 La hipótesis tecnológica del caso ferroviario

El caso ferroviario merece una conclusión propia porque se ha construido de una forma distinta al agrícola, y entender esa diferencia es clave para valorar correctamente lo que el trabajo aporta. Mientras el modelo agrícola se apoya en su totalidad sobre tecnología disponible y operada hoy en España, el modelo ferroviario se ha desarrollado como un escenario prospectivo, sostenido sobre una hipótesis tecnológica explícita que conviene dejar perfectamente delimitada.

La propuesta ferroviaria, tal como se ha planteado, no es implementable con el equipamiento comercial actual sin más. Cubrir el corredor completo con tres estaciones y dos drones exige superar dos limitaciones reales de la tecnología de hoy. La primera es el emparejamiento fijo entre cada estación DJI Dock 2 y su dron, que impide que una aeronave recargue en una estación distinta a la suya, una restricción que el propio fabricante vincula al firmware y no a una barrera física. La segunda es la autonomía efectiva del Matrice 3TD, que en su configuración actual y a la velocidad de inspección adoptada queda muy por debajo de la separación entre estaciones del corredor. A estas se añaden las exigencias propias de una operación BVLOS sin presencia humana, la robustez de las comunicaciones a lo largo de tramos con cobertura desigual y la madurez de los servicios de reconfiguración dinámica del espacio aéreo, que hoy se encuentran todavía en fase de demostración.

El trabajo asume que estas capacidades estarán disponibles en un horizonte próximo, y lo hace sobre una base razonable. La trayectoria del sector apunta con claridad en esa dirección, la densidad energética de las baterías mejora de forma sostenida, el paradigma de la estación autónoma de recarga ya está comercialmente maduro con miles de unidades desplegadas a escala global, y los servicios de coordinación entre U-Space y control de tránsito aéreo se están validando en proyectos reales en España. No se trata, por tanto, de suponer un salto tecnológico improbable, sino de anticipar la consolidación de líneas de desarrollo que ya están en marcha.

Esta decisión tiene una consecuencia metodológica que debe entenderse bien. Asumir la hipótesis tecnológica no es una debilidad del estudio, sino una elección deliberada que permite responder a una pregunta que de otro modo quedaría sin respuesta, si la tecnología alcanza la madurez prevista, ¿es viable técnica y económicamente un servicio de inspección ferroviaria autónoma sobre un corredor real? El modelo construido es la herramienta que responde a esa pregunta. Define la arquitectura del sistema, dimensiona la operación sobre un corredor concreto, somete la operación a SORA y cuantifica su rentabilidad bajo supuestos declarados. Su valor no está en describir un sistema que pueda comprarse mañana, sino en ofrecer un marco de evaluación listo para aplicarse el día en que esa tecnología esté disponible, con las cifras de inversión, coste e ingreso ya estructuradas y solo pendientes de actualizar con datos reales.

Por eso el caso ferroviario debe leerse como lo que es, un modelo conceptual y prospectivo, internamente coherente y económicamente evaluado, cuya validez no depende de que el equipamiento exista hoy sino de que la dirección del desarrollo tecnológico, que el propio trabajo documenta, se mantenga. El modelo agrícola demuestra lo que la automatización aporta ya, el ferroviario anticipa hasta dónde puede llegar, y juntos cubren el continuo completo que este trabajo se propuso explorar.

7.3 Limitaciones del estudio

Las conclusiones anteriores deben leerse a la luz de las limitaciones del trabajo, que conviene explicitar sin matizarlas. La más relevante es la ya desarrollada hipótesis tecnológica del caso ferroviario, que sitúa sus resultados en el plano de la viabilidad potencial y no de la inmediata.

A ella se suma una limitación de datos que ha condicionado todo el análisis económico. No existen en España empresas de inspección ferroviaria con drones en explotación comercial, de modo que no hay cifras públicas de tarifas, costes reales de operación ni márgenes sobre las que apoyarse. Esa ausencia de datos primarios ha obligado a construir el modelo a partir de fuentes secundarias, catálogos de fabricantes, precios de distribuidores oficiales, referencias del mercado europeo y estimaciones propias, y a suplir lo que no se podía conocer con certeza mediante escenarios. Por eso buena parte de los resultados no se presenta como un valor único sino como un rango, los tres niveles de coste regulatorio de U-Space y DAR, los distintos grados de disponibilidad de la flota o las frecuencias de inspección no son indecisión del análisis, sino la forma correcta de trabajar cuando el dato exacto no existe todavía. En lugar de fijar una cifra que aparentara una precisión que no se tiene, el modelo acota el espacio de resultados posibles y muestra cómo se comporta la rentabilidad dentro de él, lo que permite identificar qué variables son críticas, el coste de los servicios regulatorios y la disponibilidad de la flota, y cuáles influyen menos. El análisis de sensibilidad del capítulo 5 es, en ese sentido, la respuesta metodológica a la falta de datos, no un complemento del estudio.

Esta misma carencia explica otras decisiones del trabajo. La tarifa de referencia del caso ferroviario procede de la literatura técnica internacional y no de un contrato real con ADIF, y el coste de los servicios U-Space y de reconfiguración del espacio aéreo se ha modelado mediante porcentajes ante la falta de proveedores en operación comercial que publiquen precios. El modelo asume además una demanda estable de un único cliente institucional, lo que concentra el riesgo comercial en un solo contrato. Y de forma transversal a todo el trabajo, el análisis descansa sobre datos secundarios y no incorpora trabajo de campo propio más allá de la visita de contraste al operador agrícola, no se ha ejecutado ningún vuelo de inspección real, ninguna encuesta sistemática a operadores ni ninguna entrevista formal con ADIF o AESA.

7.4 Líneas futuras de investigación

El análisis realizado deja abiertas varias vías de continuación que ayudarían a afinar sus resultados y a ampliar su alcance. La principal nace de la limitación más evidente del trabajo, la ausencia de un precio real y consolidado para los servicios U-Space en el mercado español. A medida que los primeros proveedores establezcan tarifas efectivas, los escenarios porcentuales empleados aquí podrán sustituirse por datos empíricos que doten a las estimaciones de rentabilidad de una base mucho más firme. En esa misma dirección, una investigación apoyada en entrevistas a los USSP que vayan surgiendo en España aportaría estructuras de coste verificadas y serviría para contrastar los supuestos manejados en este estudio con la realidad del mercado.

El caso ferroviario ofrece la segunda línea con más recorrido. Toda su arquitectura descansa sobre una hipótesis de tecnología prospectiva, de modo que la llegada al mercado de drones

con autonomía ampliada y con capacidad de operar varias unidades desde una misma estación abriría la puerta a repetir el análisis con especificaciones y precios reales. Un estudio de validación de este tipo, acompañado idealmente de pruebas de campo sobre un tramo del corredor Murcia–Águilas, confirmaría si la configuración de tres estaciones y dos drones se sostiene cuando se sustituyen las estimaciones por valores medidos.

Más allá de los dos casos estudiados, la metodología empleada puede trasladarse a otras infraestructuras lineales como líneas eléctricas, conducciones o carreteras, y también a otras regiones y a cultivos distintos de los analizados en Murcia. Comprobar si las conclusiones se mantienen en contextos diferentes daría una idea más precisa de hasta qué punto son generalizables. A esta línea se suma el seguimiento de la evolución normativa. El marco regulador del U-Space todavía se está construyendo, por lo que convendría revisar el análisis a medida que los reglamentos de ejecución entren plenamente en vigor y que las zonas U-Space del espacio aéreo español queden definidas. En particular, el coste asociado a la reconfiguración dinámica del espacio aéreo, estimado aquí a partir de horas de desarrollo, podrá precisarse cuando los proyectos europeos en curso como DACUS o ENSURE ofrezcan implementaciones reales sobre las que apoyarse.

Por último, el análisis ganaría solidez si se amplía la base empírica sobre la que se apoya. El trabajo de campo se ha sustentado de forma principal en un único operador, y un estudio que incorporase a un número mayor de empresas reforzaría la representatividad de los márgenes y de los costes manejados. A ello podría añadirse una mirada desde el lado de la demanda, mediante un estudio sobre la disposición a contratar de los clientes potenciales, ya sean administradores de infraestructura como ADIF o cooperativas agrícolas, a los precios que arroja el modelo. Una vía final, en sintonía con los objetivos de movilidad sostenible que impulsan al sector, sería complementar la comparación económica con un análisis ambiental que contraste las emisiones y el consumo energético de la operación con drones frente a los métodos convencionales de inspección y tratamiento. Cualquiera de estas líneas contribuiría a convertir un trabajo de carácter prospectivo en una herramienta de decisión cada vez más cercana a la realidad del sector.

Referencias bibliográficas

1. AEMET. (2023). Atlas climático de la Península Ibérica, Baleares y Canarias. Agencia Estatal de Meteorología. https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_climatico
2. ADIF. (2024). *Informe anual 2023 sobre el estado de la red ferroviaria de interés general*. Administrador de Infraestructuras Ferroviarias. https://www.adif.es/sobre-adif/conoce-adif/declaracion-sobre-la-red
3. Aela, P., Chi, H.-L., Fares, A., Zayed, T., & Kim, M. (2024). UAV-based studies in railway infrastructure monitoring. Automation in Construction, 167, 105714. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105714
4. AESA. (2024). *Procedimiento de declaración U-Space y certificación de USSP en España*. Agencia Estatal de Seguridad Aérea. https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/proveedores-de-servicios-u-space
5. Alcoydrones. (2026). *Fumigación fitosanitaria con drones: guía completa — normativa, equipos y ROI*. Consultado el 7 de junio de 2026, de https://alcoydrones.com/articulos/fumigacion-drones-ventajas.php
6. Barrado, C., Boyero, M., Brucculeri, L., Ferrara, G., Hately, A., Hullah, P., Martin-Marrero, D., Pastor, E., Rushton, A. P., & Volkert, A. (2020). U-space concept of operations: A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations. Aerospace, 7(3), 24. https://doi.org/10.3390/aerospace7030024
7. Barrado, C., Pastor, E., Boyero, M., Hately, A., & Volkert, A. (2024). U-space concept of operations (4.ª ed., Informe D4.1). Proyecto CORUS-XUAM / SESAR 3 Joint Undertaking. https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS-XUAM%20D4.1.pdf
8. Capitán, C., Pérez-Leon, H., Capitán, J., Castaño, Á., & Ollero, A. (2021). Unified approach for the management of risks and emergencies in multi-UAV operations. Sensors, 21(13), 4476. https://doi.org/10.3390/s21134476
9. CARM. (2024). *Anuario de estadística agraria de la Región de Murcia 2022/2023*. Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería y Pesca, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. https://esam.carm.es/wp-content/uploads/2024/10/ESTADISTICA-AGRARIA-DE-MURCIA2022-2023-rev1.pdf
10. Comisión Europea. (2019a). Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión, de 12 de marzo de 2019, relativo a los sistemas de aeronaves no tripuladas y a los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas. Diario Oficial de la Unión Europea, L 152, 1–40. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj
11. Comisión Europea. (2019b). Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 de mayo de 2019, relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la

utilización de aeronaves no tripuladas. Diario Oficial de la Unión Europea, L 152, 45–71. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj

12. Comisión Europea. (2021a). Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 de la Comisión, de 22 de abril de 2021, relativo a un marco regulador para el U-space. Diario Oficial de la Unión Europea, L 139, 161–183. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/664/oj
13. Comisión Europea. (2021b). Reglamento de Ejecución (UE) 2021/665 de la Comisión, de 22 de abril de 2021, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2017/373 en cuanto a los requisitos para los proveedores de servicios de gestión del tránsito aéreo. Diario Oficial de la Unión Europea, L 139, 184–186. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/665/oj
14. Comisión Europea. (2021c). Reglamento de Ejecución (UE) 2021/666 de la Comisión, de 22 de abril de 2021, por el que se modifica el Reglamento (UE) n.º 923/2012 en cuanto a los requisitos aplicables a la aviación tripulada que opere en el espacio aéreo U-space. Diario Oficial de la Unión Europea, L 139, 187–188. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/666/oj
15. Comisión Europea. (2024). Reglamento de Ejecución (UE) 2024/1108 de la Comisión, de 10 de abril de 2024, que modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947. Diario Oficial de la Unión Europea. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2024/1108/oj
16. CultivoTech. (2026). *Drones para fumigar: precios en España 2026, normativa AESA y ROI real*. Consultado el 7 de junio de 2026, de https://cultivotech.com/drones-para-fumigar-precios-espana/
17. Cummings, M. L. (2014). Man versus machine or man + machine? IEEE Intelligent Systems, 29(5), 62–69. https://doi.org/10.1109/MIS.2014.87
18. DJI Agriculture. (2025a). DJI Agras T100: Especificaciones técnicas. SZ DJI Technology Co. https://ag.dji.com/t100/specs
19. DJI Agriculture. (2025b). DJI Agras T50: Especificaciones técnicas. SZ DJI Technology Co. https://ag.dji.com/t50/specs
20. DJI Enterprise. (2025a). DJI Dock 2 con Matrice 3D/3TD: Estación autónoma de drones. SZ DJI Technology Co. https://enterprise.dji.com/dock-2/specs https://enterprise.dji.com/dock-2
21. DJI Enterprise. (2025b). DJI FlightHub 2: Cloud-based fleet management platform. SZ DJI Technology Co. https://enterprise.dji.com/flighthub-2
22. EASA. (2023). EASA General Aviation Roadmap 2023: Unmanned aircraft systems. European Union Aviation Safety Agency. https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones
23. EASA. (2025). *AMC and GM to Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 — Issue 1, Amendment 5 (ED Decision 2025/018/R)*. European Union Aviation Safety Agency. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/agency-decisions/ed-decision-2025018r
24. ENAIRE. (2026). Publicación de Información Aeronáutica (AIP España): AD 2-LERI — Base Aérea de Alcantarilla (AMDT 405/26, efectiva 16-APR-2026). Entidad Pública

Empresarial ENAIRE. https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/AD/AD2/LERI/LE_AD_2_LERI_en.pdf

25. Endsley, M. R. (2017). From here to autonomy: Lessons learned from human–automation research. Human Factors, 59(1), 5–27. https://doi.org/10.1177/0018720816681350
26. Floreano, D., & Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. Nature, 521(7553), 460–466. https://doi.org/10.1038/nature14542
27. Guebsi, R., Mami, S., & Chehaibi, S. (2024). Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. Drones, 8(11), 686. https://doi.org/10.3390/drones8110686
28. INE. (2024). *Encuesta de estructura salarial 2022: datos definitivos*. Instituto Nacional de Estadística. https://www.ine.es/dyngs/Prensa/EES2022.htm
29. Ineco. (2025). *Proyecto para la automatización de tareas de inspección ferroviaria mediante drones*. Ineco, Ingeniería y Economía del Transporte. https://www.ineco.com/ineco/comunicacion/noticias/sabias-que-trabajamos-en-un-innovador-proyecto-para-la-inspeccion-ferroviaria
30. JARUS. (2019). *JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA), Edition 2.0*. Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems. http://jarus-rpas.org/content/sora
31. JARUS. (2024). *JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA), Edition 2.5*. Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems. http://jarus-rpas.org/content/sora-v2-5
32. Jefatura del Estado. (2024). Real Decreto 517/2024, de 4 de junio, por el que se desarrolla el régimen jurídico para la utilización civil de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS). Boletín Oficial del Estado (BOE-A-2024-11377). https://www.boe.es/eli/es/rd/2024/06/04/517
33. Jooble. (2024). Salario de piloto de drones en España: análisis salarial basado en 644 observaciones. Recuperado de https://es.jooble.org/salary/piloto-de-drones
34. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. En Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968
35. Kopardekar, P., Rios, J., Prevot, T., Johnson, M., Jung, J., & Robinson, J. E. (2016). Unmanned aircraft system traffic management (UTM) concept of operations. En Proceedings of the 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (AIAA 2016-3292). AIAA. https://doi.org/10.2514/6.2016-3292
36. MAPA. (2023). Anuario de estadística agraria 2022. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx
37. Medina Torres, J. (2025). *Metodología para la vigilancia y mantenimiento de redes ferroviarias mediante el uso de drones* [Trabajo Fin de Grado]. Universidad de Sevilla.

https://idus.us.es/discover?query=vigilancia+mantenimiento+redes+ferroviarias+drones

38. Pastor, E., Barrado, C., Royo, P., Vilardaga, S., & Lema, J. (2022). BUBBLES: An approach for U-space traffic management based on geofencing. En *Proceedings of the SESAR Innovation Days 2022*. SESAR Joint Undertaking. https://www.sesarju.eu/node/3848
39. Pereira-Carvalho, J., Almeida-Garcia, F., & Rebelo, A. (2024). The civil applications of unmanned aerial vehicles: A systematic review of the literature. Drones, 8(4), 165. https://doi.org/10.3390/drones8040165
40. Red.es. (2022). *Mantenimiento con drones 5G*. Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. https://www.red.es/es/iniciativas/tecnologia-5g/mantenimiento-con-drones-5g
41. Renfe. (2023). Contrato de vigilancia con drones de la red ferroviaria (referencia sectorial; expediente verificable en la Plataforma de Contratación del Sector Público, PLACSP). Renfe Operadora. https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/media/noticias
42. Roberge, V., Tarbouchi, M., & Labonté, G. (2018). Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 54(5), 2105–2117. https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2807558
43. SESAR Joint Undertaking. (2017). *European drones outlook study: Unlocking the value for Europe*. Publications Office of the European Union. https://www.sesarju.eu/publications
44. TGSS. (2024). *Bases y tipos de cotización a la Seguridad Social 2024*. Tesorería General de la Seguridad Social. https://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Trabajadores/CotizacionRecaudacionTrabajadores/36537
45. Yan, C., Xiang, X., & Wang, C. (2022). Towards real-time path planning through deep reinforcement learning for a UAV in dynamic environments. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 98, 297–309. https://doi.org/10.1007/s10846-019-01073-3
46. Yu, X., & Zhang, Y. (2015). Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: Review and prospects. Progress in Aerospace Sciences, 74, 152–166. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.01.001

Anexo. Acrónimos y abreviaturas

Sigla	*Significado*
ADIF	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance — Broadcast
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
AGL	Above Ground Level
AMC	Acceptable Means of Compliance
ARC	Air Risk Class
ATS	Air Traffic Services
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
C2	Command and Control (enlace)
CAPEX	Capital Expenditure
CISP	Common Information Service Provider
ConOps	Concept of Operations
DAA	Detect and Avoid
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FCS	Fleet Coordination System
GIS	Geographic Information System
GM	Guidance Material
GNSS	Global Navigation Satellite System
GRC	Ground Risk Class
HOTL	Human-on-the-loop
iGRC	Intrinsic Ground Risk Class
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems
LiDAR	Light Detection And Ranging
MTOM	Maximum Take-Off Mass

NOTAM	Notice to Airmen / Notice to Air Mission
OPEX	Operational Expenditure
OSO	Operational Safety Objective
PEM	Proton Exchange Membrane (fuel cell)
PSO	Particle Swarm Optimisation
RTK	Real-Time Kinematic
SAIL	Specific Assurance and Integrity Level
SESAR	Single European Sky ATM Research
SLA	Service Level Agreement
SORA	Specific Operations Risk Assessment
STS	Standard Scenario
TMPR	Tactical Mitigation Performance Requirement
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USSP	U-space Service Provider
UTM	Unmanned Aircraft System Traffic Management
VAN	Valor Actual Neto
VLOS	Visual Line of Sight
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

Tabla 24. Acrónimos y abreviaturas