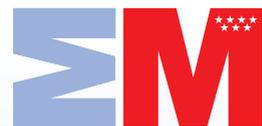




Madrid
Ahorra
con Energía



La Suma de Todos

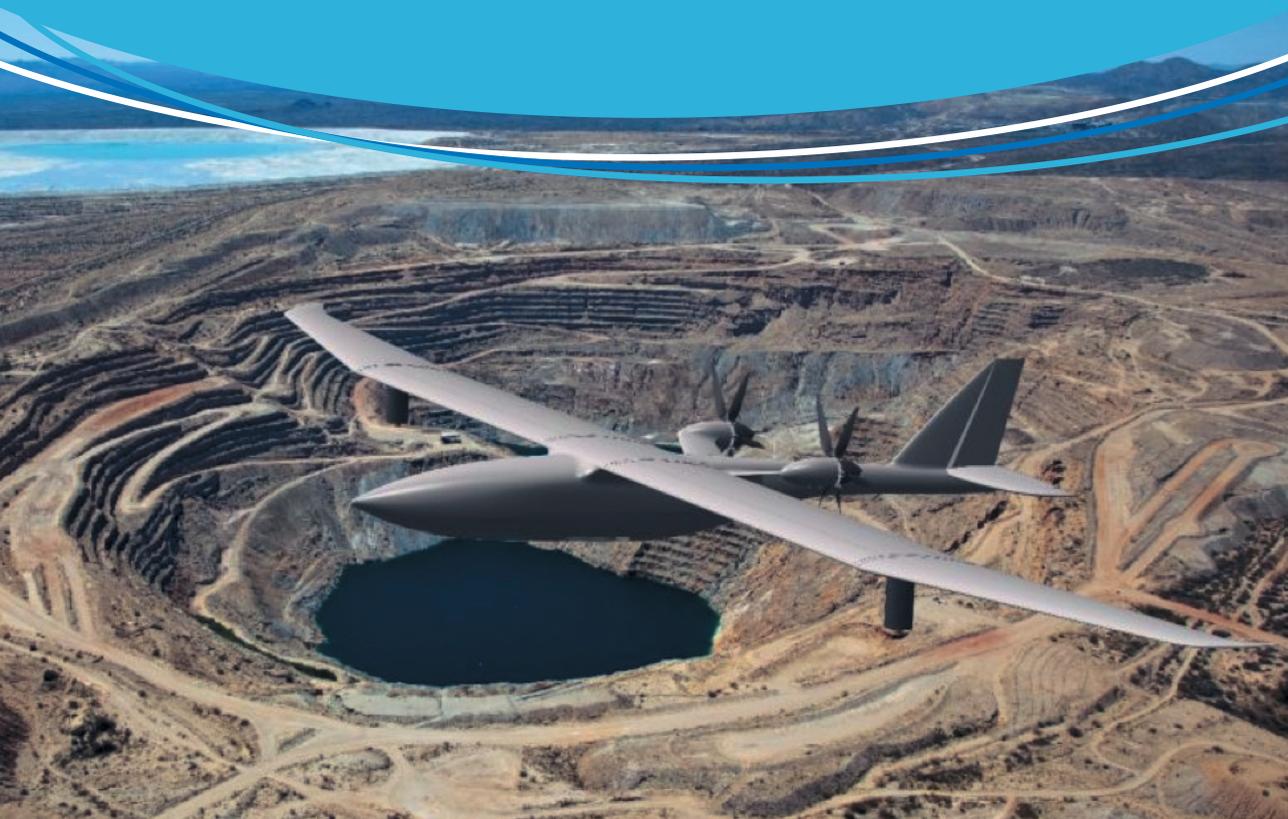


CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA

Comunidad de Madrid

www.madrid.org

Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil



Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil

Madrid, 2015



Fundación de la Energía de
la Comunidad de Madrid



www.fenercom.com




CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA
Comunidad de Madrid
www.madrid.org

Si desea recibir ejemplares de esta publicación en formato papel puede contactar con:

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid

dgtecnico@madrid.org

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid

fundacion@fenercom.com

La labor de coordinación de esta obra ha corrido a cargo de Jose Luis Esteban Herreros, con la colaboración del personal de las dos entidades citadas.

La Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, respetuosa con la libertad intelectual de sus colaboradores, reproduce los originales que se le entregan. Tanto la Comunidad de Madrid como la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, no se hacen responsables de las opiniones, imágenes, textos y trabajos de los autores, ni de las posibles consecuencias que se deriven para las personas físicas o jurídicas que actúen o dejen de actuar de determinada forma como resultado de la información contenida en esta publicación.



Esta versión forma parte de la Biblioteca Virtual de la **Comunidad de Madrid** y las condiciones de su distribución y difusión se encuentran amparadas por el marco legal de la misma.



www.madrid.org/publicamadrid

Depósito Legal: M. 4519-2015

Impresión Gráfica: Gráficas Arias Montano, S. A.
28935 MÓSTOLES (Madrid)

Autores

Capítulo 1. **Origen y desarrollo de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto**

*Cristina CUERNO REJADO
E.T.S. I. Aeronáuticos
Universidad Politécnica de Madrid*

Capítulo 2. **Aspectos reglamentarios**

*Jose María RAMÍREZ CIRIZA
Agencia Estatal de Seguridad Aérea
Ministerio de Fomento*

Capítulo 3. **Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto**

*Manuel OÑATE DE MORA
USOL - Unmanned Solutions*

Capítulo 4. **Aplicaciones al control de calidad del aire**

*Agustín EZCURRA TALEGÓN y Lorenzo DÍAZ DE APODACA
Universidad País Vasco - Airestudio Geoinformation Technologies, S. Coop.*

Capítulo 5. **Aplicaciones cartográficas**

*David SAEZ PAREDES y Ana M.ª BELTRÁN NOGUERA
UAV Blackbird, S.L.*

Capítulo 6. **Aplicaciones a la prospección y explotación de recursos minerales**

*Carlos LÓPEZ JIMENO y Domingo A. MARTÍN SÁNCHEZ
Universidad Politécnica de Madrid - E.T.S.I de Minas y Energía*

Capítulo 7. **Aplicaciones hidrológicas**

*Hugo RAMOS CASTRO y José Carlos MONTESINOS
IXION Smart Automation*

Capítulo 8. **Aplicaciones en agricultura**

*Salomón MONTESINOS ARANDA
SM GEODIM, S.L.*

Capítulo 9. **Aplicación al seguimiento fitosanitario de masas forestales**

*M.ª José CHECA ALONSO, M.ª del Rosario ESCUDERO BARBERO, Francisco José LARIO LEZA
y Pilar PORCEL PRADO
TRAGSATEC. GRUPO TRAGSA*

Capítulo 10. **Aplicaciones a la extinción nocturna de incendios forestales:
«Proyecto nitrofirex»**

*Luis M.ª BORDALLO ÁLVAREZ y Alexander BURWITZ SCHWEZOFF
NITROFIREX, S.L.*

Capítulo 11. **Aplicaciones en el control de obras y evaluación de impactos**

*Íñigo CAMPO MOLINUEVO
AIRESTUDIO Geoinformation Technologies*

Capítulo 12. **Aplicaciones en la gestión del patrimonio y herencia cultural**

José Antonio DOMÍNGUEZ
ACRE SOLUCIONES TOPOGRÁFICAS

Capítulo 13. **Aplicaciones en la seguridad al control de fronteras**

Jesús BORJAS ASTORGA y Jorge LÓPEZ RAMOS
Dirección General de la Guardia Civil
Ministerio de Interior

Capítulo 14. **Aplicaciones al mantenimiento de líneas eléctricas**

Ricardo REINOSO DELGADO
Red Eléctrica de España

Capítulo 15. **Aplicaciones a las auditorías energéticas con termografía aérea**

Sergio MELGOSA REVILLAS
eBuilding

Capítulo 16. **Aplicaciones al periodismo**

Roberto SAURA SÁNCHEZ y Antonio GONZÁLEZ CARRIL
Profesionales del Periodismo

Capítulo 17. **Aplicaciones de rescate**

Juan Jose DÍAZ MARCOS
Drones Rescue Spain (DRS)

Capítulo 18. **Aplicaciones urbanísticas**

Francisco Javier MESAS CARRASCOSA, Alfonso GARCÍA-FERRER PORRAS
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes
Universidad de Córdoba

Capítulo 19. **Aplicaciones a la inspección de palas de aerogeneradores**

Carlos BERNABÉU GONZÁLEZ
Arborea Intellbird

Capítulo 20. **Aplicaciones al negocio eléctrico de distribución**

Juan Carlos CUESTA JARA y Diego RUIZ DEL BUSTO
Oficina Técnica Red de Alta Tensión.
Unión Fenosa Distribución

Índice

PRÓLOGO	13
CAPÍTULO 1. Origen y desarrollo de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto	15
1.1. INTRODUCCIÓN	15
1.2. LOS PIONEROS	17
1.3. MISILES CRUCERO	18
1.4. LOS SISTEMAS EN LA 2º GUERRA MUNDIAL	20
1.5. LA DÉCADA DE LOS 50	21
1.6. LA DÉCADA DE LOS 60. LA GUERRA FRÍA	21
1.7. LOS AÑOS 70 Y EL AUGE DE LAS MISIONES DE RECONOCIMIENTO	23
1.8. LOS AÑOS 80 Y LA EXPANSIÓN INTERNACIONAL DE LOS RPAS	25
1.9. LOS AÑOS 90. EL DESARROLLO DE LAS GRANDES PLATAFORMAS	27
1.10. LA DÉCADA DE LOS 2000. ENTRAMOS EN EL SIGLO XXI	29
1.11. MÁS ALLÁ DEL 2010	32
1.12. REFERENCIAS	32
CAPÍTULO 2. Aspectos reglamentarios	33
2.1. INTRODUCCIÓN	33
2.2. EL CONTEXTO INTERNACIONAL	34
2.3. LA NORMATIVA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD AÉREA. NORMATIVA TEMPORAL	36
2.4. LA NORMATIVA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD AÉREA. NORMATIVA FINAL	45
2.5. OTRAS NORMAS QUE AFECTAN A LA UTILIZACIÓN CIVIL DE LOS DRONES	46
CAPÍTULO 3. Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto	49
3.1. SISTEMAS DE AERONAVES NO TRIPULADAS, UAS Y SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA, RPAS	49
3.2. CLASIFICACIÓN DE AERONAVES	50
3.3. USO CIVIL Y MILITAR	51
3.4. VENTAJAS DE LOS RPAS	52
3.5. MODOS DE OPERACIÓN	54
3.6. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE ALA FIJA Y VARIABLE	55
3.7. EJEMPLOS DE SISTEMAS DE ALA FIJA Y ROTATORIA	56

CAPÍTULO 4. Aplicaciones al control de calidad del aire	59
4.1. INTRODUCCION	59
4.2. CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE MEDIANTE DRONES: SENSORES AMBIENTALES DE NUEVA GENERACION	60
4.3. CONCLUSIONES	65
CAPÍTULO 5. Aplicaciones cartográficas	67
5.1. INTRODUCCIÓN	67
5.2. OBTENCIÓN DE DATOS	68
5.3. PROCESO DE GABINETE	69
5.4. RESULTADOS FINALES	71
5.5. APLICACIONES ADICIONALES	73
• Modelo Digital de Elevaciones (o Modelo Digital de Superficie) y Modelo Digital del Terreno	73
• Mapa topográfico	74
• Usos del suelo	74
5.6. CONCLUSIONES	75
CAPÍTULO 6. Aplicaciones a la prospección y explotación de recursos minerales	77
6.1. INTRODUCCIÓN	77
6.2. VENTAJAS DE LOS UAV EN LA PROSPECCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS MINEROS	77
6.3. APLICACIONES DE LOS UAV A LA PROSPECCIÓN, EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS MINEROS	80
• Magnetometría aérea	83
• Gravimetría aérea	84
• Electromagnetismo	86
• Radiometría aérea	87
• Aplicaciones topográficas	87
• Otras aplicaciones	89
6.4. LOS UAV IDEALES PARA LA EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS MINEROS	89
6.5. BIBLIOGRAFÍA	92
CAPÍTULO 7. Aplicaciones hidrológicas	95
7.1. INTRODUCCIÓN	95
7.2. APLICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS NO TRIPULADOS EN HIDROLOGÍA	96
7.2.1. Vehículos submarinos no tripulados usados en hidrología	96

7.2.2. Casos de aplicación de los vehículos submarinos no tripulados en hidrología	98
7.3. APLICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS DE TIPOLOGÍA MULTIROTORES A LA HIDROLOGÍA	99
CAPÍTULO 8. Aplicaciones en agricultura	101
8.1. AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y SARPS	101
8.2. APLICACIONES POTENCIALES DE LOS SARPS EN AGRICULTURA	103
8.3. APLICACIONES OPERATIVAS EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN	108
8.4. UN FUTURO OPERATIVO	114
8.5. AGRADECIMIENTOS	115
8.6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
CAPÍTULO 9. Aplicación al seguimiento fitosanitario de masas forestales	119
9.1. INTRODUCCIÓN	119
9.2. ZONA DE ESTUDIO	119
9.3. DATOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA	121
9.4. CAMPAÑA DE CAMPO	121
9.5. CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS ADQUIRIDOS CON RPAS	122
9.6. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES	124
9.6.1. Extracción de la máscara de arbolado	124
9.6.2. Cálculo de índices de vegetación	124
9.6.3. Correlación con los datos de campo	126
9.7. CONCLUSIONES	127
9.8. AGRADECIMIENTOS	128
9.9. BIBLIOGRAFÍA	128
CAPÍTULO 10. Aplicaciones a la extinción nocturna de incendios forestales: «Proyecto nitrofirex»	129
10.1. INTRODUCCIÓN	129
10.2. ESTADO DEL ARTE	130
10.3. EL CONCEPTO NITROFIREX	132
10.4. PROYECTO NITROFIREX	133
10.5. DESPLIEGUE OPERATIVO	137
10.6. OPTIMIZACIÓN DE LAS DESCARGAS	139
10.7. COORDINACIÓN Y SEGURIDAD	141
10.8. REGULACION TECNICA DE LA OPERACIÓN DE LOS UAV	142

10.9.	PERSPECTIVA SOCIO/POLITICA DE LA OPERACIÓN DE LOS UAV	143
10.10.	LA INDUSTRIA AERONÁUTICA ESPAÑOLA Y LOS UAV	144
10.11.	CONCLUSIONES	146
CAPÍTULO 11. Aplicaciones en el control de obras y evaluación de impactos		149
11.1.	ANTECEDENTES	149
11.2.	PROCEDIMIENTO DE TRABAJO CON SISTEMAS DRONE	151
	• Calibración de cámara	152
	• Planificación de vuelo:	152
	• Analisis de vuelo realizado	153
11.3.	APLICACIONES Y/O USO DE PRODUCTOS DERIVADOS	155
	• Cartografía, MDT y nube densa de puntos	156
	• Ortofotografía:	157
	• Fotografía oblicua: seguimiento visual de obra	157
11.4.	CONCLUSIONES	158
CAPÍTULO 12. Aplicaciones en la gestión del patrimonio y herencia cultural		159
12.1.	DOCUMENTAR EL PATRIMONIO MEDIANTE DRONES	161
	¿Por qué documentar el patrimonio?	161
	¿Por qué utilizar un dron?	161
12.2.	METODOLOGÍA PARA LA RECONSTRUCCIÓN GEOMETRICA DE EDIFICIOS PATRIMONIALES A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS	162
	12.2.1. Captura de datos	162
	12.2.2. Cámara, altura de vuelo y GSD	166
	12.2.3. Precisiones, apoyo topográfico y georeferenciación	166
	12.2.4. Equipamiento topográfico	167
	12.2.5. Procesado	167
	12.2.6. Fusión de resultados con otras fuentes de información	168
	12.2.7. Entregables	169
12.3.	CONCLUSIONES	170
12.4.	AGRADECIMIENTOS	170
CAPÍTULO 13. Aplicaciones en la seguridad al control de fronteras		171
13.1.	INTRODUCCIÓN	171
13.2.	NECESIDADES	171
13.3.	PRUEBAS REALIZADAS	172
13.4.	PROYECTO PERSEUS – SISTEMA ATLANTE	173
13.5.	CONCLUSIONES	174

CAPÍTULO 14. Aplicaciones al mantenimiento de líneas eléctricas	175
14.1. INTRODUCCIÓN	175
14.2. MANTENIMIENTO DE LÍNEAS CON VEHÍCULOS AÉREOS	175
14.2.1. Inspecciones aéreas intensivas (imagen visual y termografía)	176
14.2.2. Apoyo en actuaciones de emergencia	177
14.2.3. Topografía (mediante sistema LIDAR)	177
14.2.4. Transporte de cargas en lugares de difícil acceso	178
14.2.5. Cambio de elementos con la línea en tensión	179
14.2.6. Limpieza de aisladores	179
14.3. LOS SARP COMO HERRAMIENTA DE MANTENIMIENTO DE LÍNEAS	180
14.3.1. Ventajas e Incertidumbres de los SARP	181
14.3.2. Usos potenciales de los SARP en el mantenimiento de líneas eléctricas	182
14.4. CONCLUSIONES	184
CAPÍTULO 15. Aplicaciones a las auditorías energéticas con termografía aérea	185
15.1. ANTECEDENTES	185
15.1.1. La posición frente al objeto	186
15.1.2. La cámara térmica	188
15.2. APLICACIONES	189
15.3. CONCLUSIONES	190
CAPÍTULO 16. Aplicaciones al periodismo	191
16.1. INTRODUCCIÓN	191
16.2. PRESENTE	192
16.3. FUTURO	194
16.4. BIBLIOGRAFÍA	197
CAPÍTULO 17. Aplicaciones de rescate	199
17.1. INTRODUCCIÓN	199
17.2. LOS INICIOS	201
17.3. LOS MEDIOS	202
17.4. USOS DE LOS DRONES	204
17.5. UN PLAN EN DRONES RESCUE SPAIN PARA 2014-2019	207
17.6. EL PROYECTO ICARUS	207
17.7. ALGUNOS ENLACES DE INTERÉS	208

CAPÍTULO 18. Aplicaciones urbanísticas	211
18.1. INTRODUCCIÓN	211
18.2. APLICACIONES	212
18.3. CONCLUSIONES	218
18.4. REFERENCIAS	219
CAPÍTULO 19. Aplicaciones a la inspección de palas de aerogeneradores	221
19.1. INTRODUCCIÓN	221
19.2. TURBULENCIAS MEDIÁTICAS	221
19.3. TECNOLOGÍA DISRUPTIVA	224
19.4. SOLUCIÓN CREATIVA A UN PROBLEMA COMPLEJO	226
CAPÍTULO 20. Aplicaciones en el negocio eléctrico de distribución	229
20.1. ANTECEDENTES	229
20.2. APLICACIONES	231
20.3. CONCLUSIONES	236

En los últimos tiempos están de constante actualidad los denominados *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS), también conocidos como: *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), *Unmanned Aerial Systems* (UAS), *Unmanned Air Vehicles* (UAV) y su variante de menor tamaño y peso como son los *Micro Air Vehicles* (MAV) o *Micro Unmanned Aerial Vehicles* (μ UAV) o simplemente *drones*, *minidrones* o *microdrones*, como se les denomina coloquialmente según sus dimensiones y peso.

Estas nuevas formas de efectuar vuelos están generando multitud de posturas desde muy diversos sectores, tanto públicos como privados, los cuales conviene analizar para determinar si conviene regularlos, total o parcialmente, y de manera armonizada con la normativa de otros países de la Unión Europea.

El uso de los drones no es nuevo, pues ya en 1917, hace casi un siglo, el controvertido ingeniero inglés Archibald Low (1888 - 1956) demostró ser capaz de controlar un pequeño y novedoso prototipo de biplano guiado por radio, cuando menos al punto de hacerlo emprender el vuelo. Sin embargo, las averías del motor de explosión utilizado en aquel entonces, con las consiguientes caídas de los prototipos, hizo que la Real Fuerza Aérea Británica perdiera interés en el tema, a pesar del innegable éxito desde el punto de vista de control automático o electrónico.

Posteriormente, en la década de los años 60, durante la Guerra del Vietnam, se utilizaron por el ejército estadounidense vehículos controlados por radio para volar, repetidamente y en trayectorias circulares definidas previamente, sobre el campo enemigo captando imágenes. Es en esta época cuando se populariza la palabra *drone* en inglés, cuyas traducciones al español son: zángano —macho de la abeja melera— o algo repetitivo y monótono.

Más recientemente, y gracias al *bestseller* internacional del autor Dan Brown, *Inferno*, el término *drone* ha llegado al gran público que lo ha asimilado a una aeronave no tripulada dirigida por control remoto. En efecto, bajo la guía de nefastos poderes, un *drone* persigue al héroe de esa novela a lo largo de varias páginas.

Hoy en día, los drones se pueden considerar como robots no antropomorfos con una inmensa autonomía de vuelo y una gran gama de posibilidades de aplicación.

Gracias al uso de procesadores electrónicos, de *software* especializado y del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), las capacidades de control automático en base a la información procedente de los sensores instalados en las aeronaves, y la rápida reacción correctiva como consecuencia del procesamiento local de la información del estado de vuelo, hacen posible que la retroalimentación aporte un inmenso potencial, minimizando para estos artefactos las posibles desviaciones entre el comportamiento real y el esperado.

Actualmente, y dejando a un lado los usos bélicos tanto defensivos como ofensivos, estos equipos ofrecen amplias posibilidades de aplicación al sector de la ingeniería civil: inspecciones de infraestructuras, investigación atmosférica, levantamientos topográficos, filmación de películas y fotografía deportiva, cultivos de precisión, control de caza, localización de bancos de pesca, mantenimiento de parque eólicos e infraestructuras energéticas, control medioambiental, gestión de riegos y desastres naturales, exploración geológico-minera, etc.

Por otro lado, en los países más avanzados se están impulsando diferentes proyectos de investigación con este tipo de aeronaves no tripuladas, que abarcan desde el ensayo de material aeronáutico en condiciones peligrosas de hielo, viento, lluvia intensa, etc., evitando la exposición a riesgos de los equipos humanos en vuelos tripulados, pasando por el desplazamiento y reparto de grandes cargas e incluso personas en vuelos comerciales en vuelos no tripulados, hasta el desarrollo de tecnologías concretas como son las pilas de combustible de hidrógeno que permitirían triplicar la duración de los vuelos, etc.

La Dirección General de Industria, Energía y Minas y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, conscientes del enorme potencial económico y estratégico que tiene este sector de la aeronáutica en un futuro próximo, desean contribuir a la promoción del mismo con la publicación de la **Guía sobre los Drones y sus Aplicaciones a la Ingeniería Civil**.

Finalmente, deseamos agradecer de manera muy sincera la colaboración y respuesta entusiasta de los autores de los capítulos de esta obra, así como la labor del coordinador, pues sin su apoyo no hubiera visto la luz.

Carlos López Jimeno

Director General de Industria, Energía y Minas
Consejería de Economía y Hacienda
Comunidad de Madrid

ORIGEN Y DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS POR CONTROL REMOTO

Cristina CUERNO REJADO

E.T.S. I. Aeronáuticos
Universidad Politécnica de Madrid

1.1. Introducción

La aviación no tripulada tuvo sus comienzos en los modelos contruidos y volados por inventores como Cayley, Stringfellow, Du Temple y otros pioneros de la aviación, que fueron previos a sus propios intentos de desarrollar aeronaves tripuladas a lo largo de la primera mitad del siglo XIX. Estos modelos sirvieron como bancos de pruebas tecnológicos para el posterior desarrollo de modelos de mayor tamaño con piloto a bordo y, en este sentido, fueron los precursores de la aviación tripulada.

En la acepción más amplia del término, la aviación no tripulada abarca un amplio espectro de aeronaves. La genealogía de las aeronaves no tripuladas esconde sus raíces en el desarrollo de los llamados «torpedos aéreos», antecesores de los actuales misiles crucero, que posteriormente se desarrollaron a través de las ramas de las bombas guiadas (no propulsadas), los blancos aéreos (llamados «drones» en la terminología anglosajona), los señuelos, los modelos recreacionales y/o deportivos de radio-control, las aeronaves de investigación, las aeronaves de reconocimiento, las de combate, e incluso algunos modelos más extraños de vuelo extra-atmosférico.

El término vehículo aéreo no tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) se hizo común en los años 90 para describir a las aeronaves robóticas y reemplazó el término vehículo aéreo pilotado remotamente (*Remotely Piloted Vehicle*, RPV), el cual fue utilizado durante la guerra de Vietnam y con posterioridad. El documento «*Joint Publication 1-02, Department of Defense Dictionary*» editado por el Ministerio de Defensa de los Estados Unidos define UAV como:

«Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo a un operador humano, utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no. No se consideran UAV a los misiles balísticos o semibalísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería.»

Además de los misiles citados y los proyectiles de artillería, la definición también excluye a los planeadores (que no llevan planta propulsora), a los globos y dirigibles (los cuales no utilizan la generación de sustentación mediante fuerzas aerodinámicas sino mediante fuerzas de flotabilidad) y a los objetos arriestrados (que carecen de control remoto u autónomo). Los términos UAV y RPV no son más que dos entre cerca de la

docena de nombres que han ido recibiendo las aeronaves robóticas no tripuladas a lo largo de su existencia. En la Figura 1 se representa gráficamente la cronología de dichos nombres. Merece la pena prestar atención al último de los acrónimos recogido en la Fig. 1.1, que es el de RPAS. En el año 2011 la Organización de Aviación Civil Internacional, organismo especializado de Naciones Unidas para la aviación civil y del cual España forma parte al haber suscrito el Convenio de Chicago de 1944, publicó su Circular 328 en la cual por vez primera reconoce a las aeronaves no tripuladas como aeronaves, con todo lo que ello trae consigo, y de entre todas las posibles tipologías escoge a las que se pilotan de manera remota para ser consideradas como aptas para la aviación civil, y no otros tipos (como podrían ser las autónomas). Así se han acuñado los términos que a continuación se detallan, y que tienen hoy en día una validez y aplicación internacional y casi única en todos los ámbitos. Estos términos son:

- Aeronave pilotada remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft, RPA*): una aeronave en la que el piloto al mando no está a bordo;
- Sistema de aeronave pilotada remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft System, RPAS*): un conjunto de elementos configurables formado por un RPA, su estación de pilotaje remoto asociada (*RPS – Remote Pilot Station*), el sistema requerido de enlace de mando y control y cualquier otro elemento requerido en cualquier punto durante la operación del vuelo.

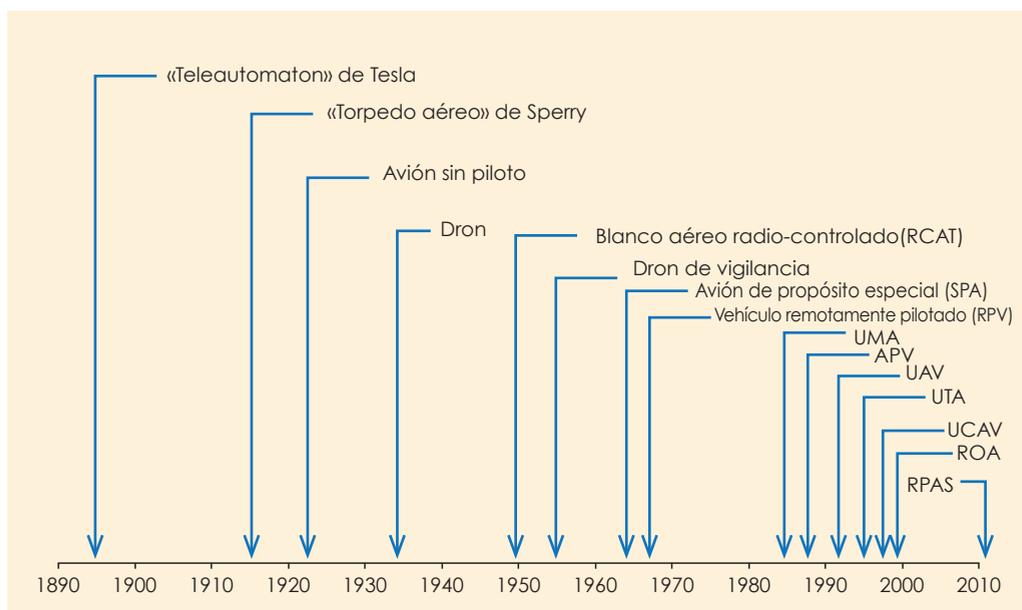


Figura 1.1. Cronología de los nombres aplicados a las aeronaves robóticas¹.

¹ El resto de los acrónimos no definidos se corresponden con: UMA = *Unmanned Aircraft*; APV = *Automatically Piloted Vehicle*; UTA = *Unmanned Tactical Aircraft*; UCAV = *Unmanned Combat Air Vehicle*; ROA = *Remotely Operated Aircraft*.

La definición del JP 1-02 recogida anteriormente está basada en qué es y no es un UAV y qué hace. Aunque las aeronaves no tripuladas han llevado a cabo operaciones comerciales tan variadas como agricultura de precisión o cinematografía, su uso militar se ha concentrado abrumadoramente en una aplicación: reconocimiento. De manera que el término UAV o UAS (sistemas de aeronaves no tripulados; *unmanned aerial system*) se ha convertido virtualmente en un sinónimo de dicha aplicación.

1.2. Los pioneros

Los europeos fueron los primeros en desarrollar los principios de la aeronáutica y, al tratar de aplicarlos a aeronaves viables, volaron modelos no tripulados que podrían ser considerados los primeros vehículos aéreos no tripulados de la historia. Pioneros de la aviación en diversos países de todo el mundo siguieron una progresión común, de los planeadores a los aviones propulsados no tripulados, y de los vuelos no tripulados a los tripulados, como se muestra en la Tabla 1.1. Su barrera tecnológica fue el no disponer de un motor con suficiente relación potencia-peso con el que sus diseños pudieran mantenerse en vuelo. Los ingenieros norteamericanos, preocupados con el diseño de mejores medios de transporte terrestre para la conquista de su continente, eran unos recién llegados a la aviación, pero el ingenio de los hermanos Wright y su mecánico, Charles Taylor, con motor de 12 caballos de potencia y 80 kg de peso, les proporcionaron los medios para ser los primeros en realizar un vuelo tripulado con un avión propulsado. Al igual que en los Estados Unidos, fue la Segunda Mundial la que estimuló el desarrollo y el uso en Europa de aviones blanco no tripulados y vehículos aéreos no tripulados de reconocimiento.

Tabla 1.1. Primeros vuelos sostenidos conocidos en diversas naciones.

PAÍS	PLANEADOR NO TRIPULADO	PLANEADOR TRIPULADO	AVIÓN NO TRIPULADO	AVIÓN TRIPULADO
Inglaterra	Cayley, 1809	Cayley, 1849	Cody, 1907	Cody, 1908
Francia		Ferber, 1901	Du Temple, 1857	Santos-Dumont, 1906
Alemania		Lilienthal, 1891		
Japón		LePrieur/Aibara, 1909	Ninomiya, 1891	Nagahara, 1911
Rusia				Rossinsky, 1910
Estados Unidos		Chanute, 1896	Langley, 1896	Hnos. Wright, 1903

Por otro lado, además de la constatación de las experiencias de los pioneros a la hora de poner en vuelo modelos tripulados o no tripulados, también nos interesa el nacimiento del concepto de un vehículo, aéreo o no, que no llevase ningún humano a bordo. Por eso no podemos no citar el vaticinio de Nikola Tesla, el cual durante un discurso pronunciado en una cena en el Hotel Waldorf Astoria en 1908, mostró su opinión de que el futuro de la aviación pertenecería a los dirigibles (las hazañas del Conde Zeppelin llenaban las portadas de los periódicos en aquellas fechas) y que las aeronaves más pesadas que el aire se demostrarían poco prácticas a largo plazo. Dicha afirmación resulta absurda desde la perspectiva actual pero no era tan descabellada si es examinada en el contexto de la época. Hay que tener en cuenta que los dirigibles, y no los

aviones, bombardearon Inglaterra ocho años más tarde y que los dirigibles inauguraron los vuelos de pasajeros a través del Atlántico en los años 20.

La evolución comercial de los aviones está muy lejos de la opinión de Tesla, el cual, sin embargo, fue el «padre» de los misiles crucero y del concepto de la aviación no tripulada. Hay que recordar que en 1898 inventó el «Telautomaton»: un artefacto naval capaz de avanzar, pararse, ir a derecha o izquierda y hacer pestañear sus luces mientras enviaba diferentes frecuencias de radio, que rápidamente fue olvidado. En 1912 el invento resurgió brevemente en forma de prototipo de torpedo radio-controlado. No obstante, Tesla no fue la única persona en perseguir la idea de armas controladas remotamente. En 1888, el inventor irlandés Louis Brennan demostró ser capaz de pilotar, de manera remota mediante un cable, un torpedo por el río Medway (Inglaterra). Posteriormente, en 1908, el oficial de artillería francés René Lorin propuso una bomba volante propulsada por chorro, similar al futuro V-1 alemán, que podría ser controlada por radio.

1.3. Misiles crucero

Durante la primera Guerra Mundial, la aviación convencional progresó con gran rapidez, mientras que la no tripulada se veía frenada por falta de desarrollo tecnológico. Las barreras estaban en los problemas de estabilización automática, control remoto y navegación autónoma. Elmer Ambrose Sperry fue la primera persona en solucionar todos estos problemas en una aeronave no tripulada viable. Elmer Sperry realizó unas experiencias exitosas con giróscopos para aplicaciones marítimas, que le llevaron a desarrollar un giroestabilizador para un avión en 1909, que era demasiado pesado y con un comportamiento mediocre.

Apoyado por el pionero de la aviación, Glenn Hammond Curtiss, mejoró su invento, que fue de nuevo probado en 1911. El sistema era mucho más pequeño, y permitía control del avión en los tres ejes, acoplándolo a los controles del avión mediante servomotores. En 1914 ganó un premio en una exhibición en Francia incluyendo al anterior invento, un primitivo horizonte artificial.

En 1915 Sperry fue contactado por el inventor de sistemas de iluminación eléctrica, Peter Cooper Hewitt, para retomar las ideas de Tesla usando como base el dispositivo ideado por Sperry. En 1916 se llevó a cabo la primera demostración del dispositivo de Sperry para guiar un avión convencional, el *Hewitt-Sperry Automatic Airplane*, cuyo piloto despegaba antes de enganchar el autopiloto. Después el avión volaba un trayecto programado y picaba. El piloto recuperaba el avión en dicho momento y regresaba al aeródromo. En 1917 la US Navy financió la idea y entregó cinco hidroaviones Curtiss N-9 para llevar a cabo la experiencia.

En paralelo la compañía Curtiss Aeroplane and Motor Company se embarcó en la fabricación de células de vuelo para torpedos aéreos no tripulados, entregando los seis primeros Speed Scout a finales de 1917. El primer vuelo controlado con éxito de una aeronave no tripulada tuvo, por fin, lugar el 6 de marzo de 1918, 14 años después de los hermanos Wright. En octubre de 1918 se le equipó con catapulta. El torpedo aéreo de Sperry era un bombardero biplano no tripulado de madera, con un peso de sólo 270 kg, incluyendo 136 kg carga explosiva e impulsado por un motor Ford de 40 caballos de fuerza. El

método de guiado del torpedo aéreo hacia su objetivo era primitivo pero ingenioso. Una vez conocido el viento y la distancia al objetivo, se calculaban las revoluciones de motor necesarias para alcanzar el blanco. El avión se controlaba con un giróscopo simple y disponía de un barómetro anerode. Una vez alcanzadas las revoluciones calculadas, se desprendían las alas del fuselaje, dejando caer este sobre el objetivo.

Los primeros sistemas fueron desarrollados como armamento de largo alcance (los precursores de los misiles de crucero de hoy en día) en dispositivos tales como el torpedo aéreo de EE.UU. de 1917 que acabamos de comentar, el torpedo aéreo Liberty Eagle, más conocido como «Bug» de Kettering en 1918 y el blanco aéreo británico «A.T.» (Aerial Target) comenzado en 1914. El «Kettering bug» era un biplano más ligero diseñado para transportar una carga explosiva de 82 kg, y actuaba de manera semejante al torpedo de Sperry. Por otro lado, el A.T. británico era un monoplano sin piloto controlado por radio alimentado por un motor de 35 HP de potencia. El concepto de los vehículos A.T. sirvió para demostrar la viabilidad de utilizar señales de radio como sistema de guiado para volar a la aeronave a su destino.

Sin embargo ninguno de estos dispositivos se desarrollaron satisfactoriamente como para ser utilizados con fines militares antes del final de la I Guerra Mundial. No obstante, marcaron el comienzo de una nueva tecnología, aunque los sistemas de guiado fueran burdos y poco fiables.

Durante la década de 1920 se reavivó el interés en Gran Bretaña sobre los sistemas no tripulados, especialmente por parte de la Royal Navy. Así se desarrolló un avión monoplano capaz de llevar una carga de guerra de 114 kg, a una distancia de 480 km que hizo su primer vuelo en 1927. Llevaba un motor Armstrong-Siddeley Lynx de 200 HP y recibió el nombre de LARNYX (*long-range gun with Lynx engine*). Este avión llevaba un sistema de radio-control para los primeros momentos pero luego volaba un plan de vuelo especificado. Se construyeron doce unidades, de las cuales solo 5 fueron equipadas con carga militar y ensayadas en el desierto de Irak.

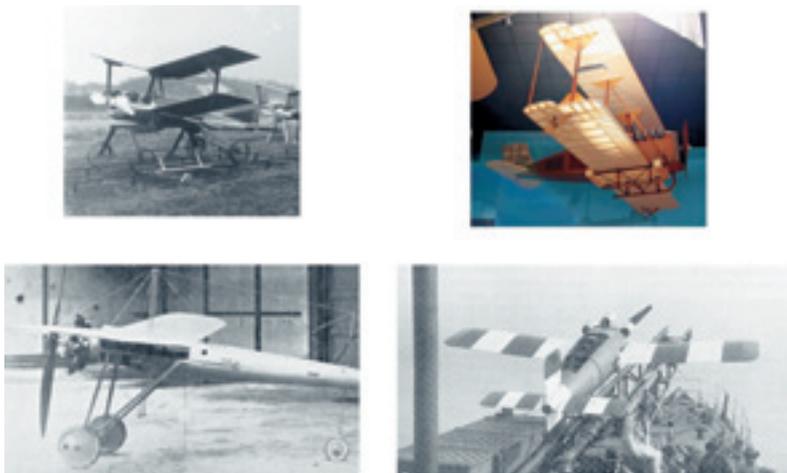


Figura 1.2. Fotografías de los principales modelos de principios del siglo XX. De izquierda a derecha y de arriba abajo, el Kettering bug, el Aerial Torpedo, el «A.T.» y el Larnyx.

1.4. Los sistemas en la 2º Guerra Mundial

Gran Bretaña decidió abandonar el desarrollo de misiles crucero y se pasó al campo de los blancos aéreos con control completo por radio a pesar de lo limitado de su alcance. Para ello comenzaron haciendo pruebas sobre un modelo de Fairey pero, entre 1934 y 1943, pasaron a construir cuatrocientos veinte modelos radiocontrolados de un nuevo blanco llamado «Queen bee», destinados a su uso por parte de la Armada y del Ejército de Tierra. El Queen bee era una versión del avión de madera del *De Havilland Tiger Moth*. Fundamentalmente se utilizaron para la formación y el entrenamiento de las fuerzas de artillería de ambos ejércitos durante la Segunda Guerra Mundial.

En paralelo en los EE.UU. se desarrolló el RP4, de Radioplane Company, que se produjo a millares como sistema de entrenamiento de las fuerzas armadas de los EE.UU. durante el conflicto. A través de estos aviones, se fue desarrollado de manera temprana la tecnología y el uso de control remoto por radio.

No obstante el concepto de los misiles crucero fue revisitado por la Alemania Nazi con el «V1 Vengeance Weapon», que fue el primer misil crucero equipado con motor de reacción. El sistema de guiado era sólo un poco mejor que en dispositivos anteriores. Se basaba en un sistema barométrico para regular velocidad y altura, y un anemómetro usado para estimar la distancia recorrida. Sus puntos de lanzamiento se situaban en los Países Bajos y sus objetivos, en el sur de Inglaterra.



Queen bee:

Envergadura: 8,9 m
MTOW: 830 kg
Velocidad: 170 km/h
Motor: 104 kW Gipsy Major
Guiado: R/C



V1 Vengeance Weapon:

Envergadura: 5,3 m
MTOW: 2150 kg
Velocidad: 640 km/h
Alcance: 250 km
Propulsión: Pulse-jet
Carga de guerra: 850 kg
Guiado: Autopiloto

1.5. La década de los 50

En la posguerra, la compañía Radioplane, más adelante Northrop, desarrolló con éxito una serie de blancos aéreos no tripulados llamados «Falconer» o «Shelduck». Estos continuaron en producción hasta los años 80, adoptando sistemas de radio-control cada vez más evolucionados. Finalmente recibieron la designación BTT (*Basic Training Target*) y se produjeron en cantidades mucho mayores que cualquier otro blanco aéreo propulsado con motor alternativo.



Figura 1.4. Modelos principales desarrollados en la década de los 50. A la izquierda de la figura el modelo *Northrop Falconer* o *Shelduck* y a la derecha el *Crossbow Decoy*.

Otra aplicación relevante desarrollada durante esta época fue la de señuelos anti-radar. Los sistemas «Crossbows» fueron desarrollados con tal fin. Eran lanzados desde bombarderos, tales como el B-47, y lanzados con el objetivo de confundir a los sistemas radar enemigos. Eran radiocontrolados y se dirigían desde el avión lanzador mediante imágenes de video.

1.6. La década de los 60. La Guerra Fría

Con la llegada de los aviones militares con sistemas de propulsión a reacción, en esta época se desarrollaron blancos más rápidos y de mayor alcance, como el «*Ryan Firebee*» (más tarde llamado *Teledyne-Ryan*), cuyo programa había comenzado a finales de la década de los 50. Estos luego se modificaron para llevar bombas para su liberación en objetivos terrestres.

Posteriormente el Firebee, al igual que otros UAV de la época, fueron equipados con cámaras para misiones de reconocimiento sobre territorio enemigo. Estas aeronaves operaban a grandes altitudes, donde el control de radio en línea de vista desde una estación de control en tierra era posible, o a altitudes más bajas controladas desde una aeronave tripulada tipo «*stand-off*». Las fotografías eran reveladas en la base, cuando el UAV retornaba. Estos «intrusos» eran menos fáciles de detectar y menos fáciles de de-

rribar que los aviones de reconocimiento tripulados y, adicionalmente, no darían lugar a incidentes diplomáticos relacionados con la captura de un piloto humano.

El *Firebee* se podía lanzar desde tierra con un motor cohete, o desde el aire desde un avión tripulado, como el Lockheed C130 Hercules. Se recuperaban con un paracaídas desplegado al regresar a una zona adecuada para el aterrizaje. Otras variantes del *Firebee* fueron adaptadas para dispensar paja con el fin de confundir a los sistemas de radar. Hubo una evolución significativa del *Firebee* lo largo de muchos años. Los diversos tipos, incluso uno con capacidad de alcanzar velocidad supersónica, recibieron una plétora de denominaciones y algunos permanecen en servicio en la actualidad después de haber sido equipados con sistemas de navegación basada en GPS y otros sensores avanzados. De los sistemas *Firebee* se fabricaron un número considerable de unidades y, aunque no fue configurado inicialmente como un verdadero UAS como se les conoce hoy en día, han contribuido considerablemente al desarrollo de la tecnología UAS.

El Northrop «Chukar» es también un blanco equipado con motor tipo turboreactor comenzado a construir en esta década, pero mucho menor y más ligero que el *Firebee*. Su versión Mk.2, de los 70, ya incorporó un autopiloto avanzado para operaciones más allá de línea de vista (*Beyond Line-of-Sight*, BLOS). Algunos también incorporaron buscadores de radiación y cabezas de guerra anti-radar.

Finalmente, el helicóptero DASH (*Drone Anti-Submarine Helicopter*) fue probablemente el primer UAV «de campo de batalla» de los EE.UU. Fue un diseño dedicado, y no un desarrollo de sistema blanco. Su objetivo de diseño era el volar desde las fragatas de la Marina estadounidense y transportar torpedos o cargas nucleares para atacar a los submarinos enemigos que estuvieran fuera del alcance de las otras armas de la embarcación. En términos de sistema de control, era un paso atrás al no incorporar ni autopiloto ni sensores, siendo simplemente radiocontrolados. Sin embargo introduce una nueva misión y es la primera vez en usarse una aeronave de ala giratoria como UAV. Muchos de ellos se perdieron, al caer al mar y el programa se hizo conocido como «*splash-DASH-a-day*». Posiblemente estas pérdidas podrían haberse evitado si hubiera sido equipado con un sistema de piloto automático actual.



Figura 1.5. Sistemas no tripulados más utilizados durante la Guerra Fría. De izquierda a derecha y de arriba abajo, el UAS VTOL DASH, el *Northrop Chukar* y el *Ryan Firebee*.

1.7. Los años 70 y el auge de las misiones de reconocimiento

Esta década va a ver la introducción de varios UAS diseñados para misiones de reconocimiento y vigilancia tanto de corto alcance, como de largo alcance y elevada altitud. Con la presión de la intensificación de la Guerra Fría, estos sistemas se fueron haciendo más sofisticados tanto en los requisitos de misión como en la seguridad de sus comunicaciones.

Uno de estos sistemas, de corto alcance, fue el Lockheed Aquila. Las capacidades de misión del Aquila habrían proporcionado un activo muy valioso si se hubiera logrado, pero era probablemente demasiado ambicioso para la tecnología vigente en ese momento. Estaba diseñado como un avión pequeño con una hélice impulsada por un motor alternativo y con una construcción modular, transportable por cuatro soldados. Se les entregaría a las unidades de tierra que tendrían información del campo de batalla en tiempo real, proporcionada por el UAV mediante una señal de video, y que les daría información sobre las fuerzas enemigas situadas más allá de la línea de visión de los observadores terrestres. El proyecto del Aquila incluía que fuera capaz de volar mediante un autopiloto, llevar sensores para localizar e identificar los objetivos enemigos de día o de noche, utilizar un láser para designar a los objetivos para la artillería, proporcionar un ajuste convencional de la caída de tipo de la artillería, y sobrevivir a las defensas aéreas soviéticas.

El logro de la expectativa de supervivencia hubiera requerido el desarrollo de un enlace de comunicaciones seguro, resistente a las interferencias. Por otro lado la navegación se hubiera llevado a cabo mediante radio-seguimiento del UAV desde la estación de control en tierra, la cual sólo habría operado la aeronave en ocasiones puntuales con el fin de actualizar la posición estimada por el autopiloto.

El problema era que, a pesar de que la estructura del avión podría haber sido construida con la tecnología disponible, las implicaciones de montarla y utilizarla como un sistema completo no se comprendieron completamente. Las tecnologías de los subsistemas necesarios para la integración satisfactoria en el tamaño especificado de fuselaje no se habían desarrollado. En el intento de desarrollarlos tardíamente se encontró que los subsistemas eran demasiado pesados, demasiado grandes, consumían una potencia excesiva o sufrían de interferencia mutua. Por ejemplo, el uso de un enlace seguro, que probablemente utilizó la técnica de espectro distribuido todavía incipiente, degradaba la calidad del vídeo, lo que interfería con la capacidad de identificación del objetivo.

El avión se lanzaba, con éxito, desde una catapulta accionada hidráulicamente. Sin embargo, otro problema fue provocado por la decisión de recuperar la aeronave a través de su captura en una red tendida entre dos postes verticales. La precisión del guiado requerido para lograr esto de manera fiable no estaba disponible y se destruyeron muchos aviones durante el programa de pruebas. Para condiciones de emergencia durante el vuelo, se desplegaba un paracaídas que hacía bajar la aeronave en actitud invertida, lo cual aunque no causaba daños a la carga de pago, sí dañaba irremparablemente la estructura del avión.

Aunque se entiende que logró demostrar de manera exitosa su capacidad de vigilancia y de designación láser de objetivos, no se alcanzó con un nivel aceptable

de fiabilidad. Trabajar para lograr una solución fiable del sistema se llevó a cabo en los años 80, con un gasto considerable que finalmente desembocó en la cancelación del proyecto. Quizás un programa menos exigente podría haber dado lugar al desarrollo de un sistema en servicio útil, limitado en alcance y para misiones de reconocimiento y vigilancia. Podría entonces haberse añadido posteriormente otros equipos de misión, y haber extendido su alcance, según se dispusiera de las tecnologías.

Un sistema semejante, pero menos ambicioso, fue el belga MBL Epervier, que se comenzó a desarrollar en 1960 y estuvo en servicio operacional hasta finales de los años 70. Estaba equipado con un pequeño turborreactor, se lanzaba desde una rampa con un cohete y se recogía con un paracaídas. El MBL Epervier volaba su perfil de vuelo mediante un autopiloto pre-programado asistido por enlace radio. Las cargas de pago consistían en cámaras diurnas o escáneres infrarrojos. Los datos se grababan a bordo y luego se procesaban en la estación de tierra, a su regreso.

Por otro lado, el UAS HALE (*High Altitude - Long Endurance*; elevada altitud y gran autonomía) Boeing Gull fue el ganador, en 1971, de la competición Compass Cope de la Fuerza Aérea de Estados Unidos para el desarrollo de un sistema HALE de reconocimiento. El objetivo del programa era alcanzar los 16770 m de altitud, una autonomía de 20 horas transportando una carga de pago de 680 kg. Dicha carga de pago incluía equipamiento para reconocimiento fotográfico, relé de comunicaciones e inteligencia de señales (SIGINT; *Signal Intelligence*) en un alcance de 300 km día y noche, y en todas las condiciones climáticas.

El prototipo fue puesto en vuelo manualmente bajo el control directo de radio, pero los sistemas de producción fueron diseñados para poder efectuar despegues y aterrizajes automáticos, con control de misión basado en piloto automático. Desafortunadamente el programa se canceló en 1977 al no desarrollarse satisfactoriamente las cargas de pago. Hubo que esperar más de diez años para que se intentase desarrollar otro sistema de este tipo, el cual pudo contar con una tecnología más avanzada, particularmente con la capacidad de utilización del GPS para la navegación autónoma.

En épocas anteriores, se había convertido en una preocupación el hecho de que la desaparición o cancelación de los diferentes programas de UAV se había debido, en gran medida, a los accidentes en el lanzamiento y, más aún, en la recuperación. El fabricante Westland y otros estaban considerando el uso de UAV de despegue vertical para las operaciones muy corto alcance. El sistema Westland Wisp fue diseñado en respuesta a un requisito de Ministerio de Defensa del Reino Unido con un requisito especial de que el sistema fuera de muy corto alcance. Utilizaba un sencillo piloto automático basado en giróscopos para la estabilidad y se operaba manualmente por radio-control en línea de vista. Estaba equipado con una cámara de TV diurna que enviaba imágenes en tiempo real al operador. También fue notable en la adopción, por primera vez, de una configuración de rotores coaxiales. Tres de estas aeronaves llegaron a volar y, además de resolver los problemas de lanzamiento y recuperación, dieron una idea de las ventajas que supone tener capacidad de vuelo a punto fijo durante las misiones de vigilancia.



Figura 1.6. Sistemas no tripulados más relevantes en la década de los 80. De izquierda a derecha y de arriba abajo, el Lockheed Aquila, el MBL Epervier, el Westland Wisp y el Compass Cope.

1.8. Los años 80 y la expansión internacional de los RPAS

La serie Canadair CL-89 y CL-289 son diferentes aeronaves de un sistema de vigilancia cuya aplicación ha abarcado varias décadas. Su desarrollo comenzó en los 60's, operaron de forma preliminar en los años setenta, se avanzó en su diseño mejorado en los ochenta y entraron en servicio con este rediseño en los noventa. Han estado en servicio hasta el año 2000.

El sistema original, CL-89, se desarrolló para proporcionar inteligencia visual sobre el territorio enemigo en diferido con un radio operativo de 70 km. El UAV se lanzaba con un motor cohete de combustible sólido desde una rampa y se recuperaba con un paracaídas y un airbag. Para la observación diurna estaba equipado con una cámara convencional más una cámara de infrarrojos de barrido lineal y para la nocturna, únicamente la cámara infrarroja. Uno de los principales requisitos de diseño era su supervivencia frente a los sistemas defensivos potencialmente sofisticados del enemigo; por ello se diseñó con un diámetro reducido (0,33 m), alas de 0,94 m de envergadura y una elevada velocidad (740 km/h) que lo hacían difícilmente detectable. El guiado se llevaba a cabo mediante la pre-programación de un autopiloto basado en giróscopos verticales y direccionales junto con la información de altímetros y anemómetros barométricos.

El modelo avanzado, el CL-289, tenía un fuselaje ampliado (0,38 m de diámetro, envergadura alar de 1,32 m, y peso máximo de 240 kg) y llegaba a un radio de acción ope-

rativo de 200 km. Transportaban un transmisor de video que podía enviar imágenes en tiempo real a la estación de control en tierra, estando a 70 km de la base.

En la década de los 2000 se le añadió un sistema de navegación más precisa basada en GPS, que le permitía volar siguiendo más de cerca el terreno, y un radar de apertura sintética para operación en cualquier condición meteorológica.

En el campo de los vehículos de ala giratoria, los años 80 fueron testigo de más avances en el área del reconocimiento de muy corto alcance y la vigilancia. El Canadair CL-227 Sentinel adoptó una configuración axilsimétrica, que recuerda al modelo Westland anterior. Las primeras versiones transportaban cámaras de video estabilizadas, que fueron sustituidas por cámaras de TV. Asimismo en las versiones avanzadas, se sustituyó el motor alternativo Wankel por un turboeje Williams.

A finales de los años ochenta, la Fase III ya incorporó sensores infrarrojos. La última versión de 1996, llamada Puma, tiene un motor más potente y se equipó con GPS. Además abandonó la configuración de planta axilsimétrica, con carenados aerodinámicos añadidos al fuselaje por encima y por debajo de los rotores.

Los siguientes desarrollos de Canadair fueron dos configuraciones, la CL-327 Tutor que volvió a la configuración axilsimétrica y la CL-427, que conserva una forma aerodinámica. Ambos tipos eran de mayor peso máximo (350 kg) con rotores más grandes y motores más potentes que los modelos Sentinel, con el fin de aumentar su alcance y autonomía para la operación naval. Aunque se demostraron lanzamientos y recuperaciones con éxito desde la cubierta de buques, el desarrollo se interrumpió a finales de 1999.

Por otro lado, los ejércitos buscaban en aquellos momentos ser capaces de extender las operaciones ISTAR en tiempo real con UAS a mayores alcances (el orden de 100 km). Para ello era necesario mejorar la precisión y fiabilidad de los sistemas de control de vuelo. Con tal fin se desarrollaron varios modelos de UAS de corto y medio alcance, de los cuales el IAI Scout se puede considerar el primero en utilizar la hoy en día conocida configuración con doble cono de cola y hélice impulsora.

Este sistema, junto con el modelo similar *Tadiran Mastif*, dieron lugar al IAI (Mazlat) Pioneer, que ha estado en servicio tanto en Israel como en EE.UU. hasta mediados de los años 2000.

Todos estos modelos utilizaban un sistema de navegación y control giro-estabilizado en tres ejes basado en un AFCS (*Autonomous Flight Control System*; sistema autónomo de control de vuelo) computarizado, y un doble canal de enlace seguro.

El desarrollo en paralelo de cargas de pago con sensores cada vez más sofisticados abrió el campo para otras posibles misiones, incluyendo las de guerra electrónica, designación láser, relé de comunicaciones y otras más, además de las cámaras de TV e infrarrojas. La mayor precisión de la navegación y el guiado también permitió la recuperación más fiable en redes instaladas en tierra, aunque la recuperación en los barcos todavía presenta algunos problemas para los aviones de ala fija.



Figura 1.7. Sistemas no tripulados más relevantes en la década de los 80. De izquierda a derecha y de arriba a abajo, el *Canadair CL-89* y *CL-289*, el *Canadair CL 227* y *CL 327*, el *IAI Scout* y el *IAI Pioneer*.

1.9. Los años 90. El desarrollo de las grandes plataformas

La mayor disponibilidad del sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System*; GPS) y de las comunicaciones satélite liberó a los UAS de operar dentro del alcance de la señal de radio y de los sistemas de navegación inexactos basados en giróscopos y datos de aire. De esta forma, junto con los sistemas digitales de control de vuelo (*Digital Flight Control System*; DFCS), el alcance y la precisión de la navegación mejoraron apreciablemente. Como resultado se desarrollaron sistemas de medio y largo alcance. Los primeros caracterizados por el *Seeker* de Denel y los últimos por el *Gnat* de *General Atomics*.

El *Gnat*, propulsado por un motor alternativo, se considera el precursor de los actuales sistemas de media altitud/gran autonomía (*Medium Altitude Long Endurance*; MALE) y elevada altitud/gran autonomía (*High Altitude Long Endurance*; HALE). Sus actividades operacionales comenzaron a mediados de los años noventa sobre Bosnia y Croacia en tareas de reconocimiento con sensores EO/IR (visible e infrarrojo) y, más tarde, con equipamiento SIGINT. El sistema ha conocido versiones posteriores (A, B y C). Las experiencias con el *Gnat* pavimentaron el camino para la llegada, a finales de esta década, del MALE UAS *Predator* y del HALE *Global Hawk* de Northrop-Grumman, en la década siguiente.

Las operaciones con el *Gnat*, y las primeras de *Predator*, permitieron llevar a cabo misiones de reconocimiento a mayores altitudes que en el pasado, lo cual ofrecía protección ante posibles detecciones y fuego desde tierra. Sin embargo al no ser capaces de detectar a través de las nubes con los sensores EO/IR que les equipaban, eso les obligaba a tener que descender y ser más vulnerables. Este problema se empezó a solucionar con la instalación de radares de apertura sintética (SAR).

Esta década también fue testigo del desarrollo e introducción en Japón del primer modelo de producción a gran escala de un VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*; aeronave

ve de despegue y aterrizaje vertical); el Yamaha R50, y su modelo mayor, el R.Max. Este sistema ha sido muy usado para la siembra de campos de arroz y la fumigación, y ha sido un éxito no sólo por su eficacia en su misión sino también por la colaboración con las autoridades reguladoras, las cuales han facilitado su puesta en operación. Aproximadamente se han llegado a fabricar unos 1.500 sistemas hasta la fecha.



General Atomics Gnat A:

Envergadura: 10,76 m
 MTOW: 511 kg
 Velocidad: 260 km/h
 Motor: 48,5 kW Rotax 2 tiempos
 Techo: 7620 m
 Autonomía a 1500 m: 40 h
 Radio operacional: 2800 km



Denel Seeker II:

Envergadura: 7 m
 MTOW: 275 kg
 Velocidad: 220 km/h
 Radio de acción: 250 km
 Potencia: 38 kW
 Autonomía: 10 h



**UAS VTOL
 Yamaha RMAX.**

Figura 1.8. Sistemas no tripulados más relevantes en la década de los 90. General Atomics Gnat A, Denel Seeker II y el UAS VTOL Yamaha R.Max.



Figura 1.9. Sistemas no tripulados de ala fija más relevantes en la década de los 90. De izquierda a derecha y de arriba abajo, el Zephyr, el Predator A, el Global Hawk y el Herti.

1.10. La década de los 2000. Entramos en el siglo XXI

Para poder transportar radares de apertura sintética, SAR, a cada vez mayores distancias hacía falta aumentar el alcance y la autonomía de las plataformas existentes, lo cual obligó a desarrollar UAS cada vez más grandes y pesados. De esta forma apareció el modelo Predator B, equipado ya con un motor turbohélice, y el mayor aún y de mayor altitud, *Global Hawk*, con un motor turbofan.

Esta década ha presenciado el incremento en el uso militar de los sistemas no tripulados. Algunos sistemas, en particular el *General Atomics Predator*, el *Northrop Global Hawk* y el *Scan Eagle* de Boeing/InSitu, han acumulado cientos de miles horas en comparación con sólo miles en las décadas anteriores.

Por otro lado, las operaciones civiles, aunque potencialmente más diversas que las militares, no han llegado aún a dar frutos debido a la dificultad existente para asegurar la separación entre las aeronaves tripuladas y las no tripuladas.

Otro paso adelante llevado a cabo en esta década fue la constatación de que, cuando las misiones de reconocimiento militar detectaban la existencia de fuerzas enemigas contra las que era necesario atacar, para cuando era posible organizar un ataque terrestre, la fuerza enemiga se había trasladado a una posición menos favorable para el ataque. Así, algunos de UAV de medio y largo alcance fueron modificados para llevar armamento para una respuesta inmediata. Un ejemplo de lo anterior es la versión posterior del Predator B, alargada y más fuertemente armada conocida como Reaper, que se muestra en la Figura 1.10. Como un ejemplo más del potencial de los UAS con los avances tecnológicos, tenemos asimismo la versión *Predator C*, que viene a competir con el *Global Hawk*, ofreciendo ya una cierta capacidad de indetectabilidad al radar (*stealth*).



Figura 1.10. Evolución seguida por los diferentes modelos del UAS *Predator*. De izquierda a derecha y de arriba abajo, modelos A, B y C.

Esta evolución se muestra gráficamente en la Tabla 1.2, que muestra tres pasos en el desarrollo de los Predator de la versión A de 1994 a la última versión C, que, además de llevar los sensores de búsqueda de sus predecesores, ofrece una mayor velocidad en altitudes de tipo HALE, y es capaz de albergar su armamento internamente para mantener sus características de indetectabilidad.



Figura 1.11. A la izquierda, el UAS VTOL Schiebel Camcopter S-100 y a la derecha el Scan Eagle de Boeing/InSitu.

Hay una propuesta de la NASA para la adquisición de Global Hawks para llevar a cabo campañas de muestreo y análisis de las capas altas de la atmósfera en todo el planeta, junto con la obtención de información para su uso en la predicción del tiempo. A largo plazo se espera que esta actividad que sea llevada a cabo por la evolución del UAS *Zephyr*, las primeras versiones del cual han demostrado, a lo largo de esta década, la capacidad de esta aeronave para desarrollar misiones a gran altura y con gran autonomía. Los planes actuales de la NASA y Qinetiq son extender su altura de operación aún más y su autonomía a un vuelo continuo durante 6 meses, descendiendo sólo para tareas de mantenimiento. También aumentaría su capacidad de carga útil para permitir el transporte de los equipos de muestreo atmosférico.

Otras líneas de avance son las que tratan de aumentar la automatización, reduciendo la carga de trabajo y los errores de las tripulaciones en tierra así como el ancho de banda de radio que se requieran para el control y la transmisión de datos. Es el caso de los trabajos de BAE Systems sobre el UAS *Herti*. La elevada autonomía del *Herti*, de 24 horas, es el resultado de una combinación de un motor de bajo consumo de combustible y el requisito de baja potencia a baja velocidad a través del uso de alas de baja resistencia aerodinámica y elevada envergadura derivadas de un planeador. Con la potencia adecuada, el UAV tiene el potencial de superar considerablemente los teóricos 6.000 m de altitud ya que opera con su peso máximo con una carga por unidad de envergadura muy baja (0,39 kN/m, que se pueden comparar con los 3,23 kN/m de *Global Hawk* y el valor extremadamente bajo de 0,018 kN/m del estratosférico *Zephyr*). Por tanto, el UAS *Herti*, ofrece una capacidad muy amplia como herramienta de investigación que, con su carga útil de 150 kg, puede llevar a bordo una serie de equipos que pueden ser utilizados para evaluar cuestiones tales como la automatización, los futuros sistemas «sense and avoid», mejoras en los sensores y las comunicaciones, etc.. También

existe la posibilidad de que pudiera entrar en servicio como una estación de vigilancia persistente, de baja velocidad.

Por otro lado, sigue habiendo un gran interés en los sistemas de despegue/aterrizaje vertical (*Vertical Take-Off and Landing; VTOL*), debido a una serie de ventajas sobre sus competidores de ala fija de menor alcance, relativas a cuestiones como su facilidad de uso en labores de vigilancia e identificación así como la simplicidad de lanzamiento y recuperación, lo que resulta en menos equipos de apoyo y las tasas de pérdida inferiores.

Las estadísticas de operación de aeronaves no tripuladas de despegue/aterrizaje horizontal (*Horizontal Take-Off and Landing; HTOL*) revelaron que, de 98 incidentes que dieron lugar a daño significativo o total en una flota de UAS *Global Hawk, Hunter, Pioneer, Predator* y *Shadow* entre Julio de 1991 y Diciembre de 2001, alrededor del 40% se produjo durante el lanzamiento o la recuperación. La adquisición de 100 unidades del Schiebel Camcopter S-100 alemán por parte de las fuerzas armadas de Arabia Saudí, dan buena muestra de ello. Además de otros modelos de UAS VTOL, hay aeronaves en fase de desarrollo en otros países, como por ejemplo el BUAA M-22 chino, que también adopta la configuración de axilsimétrica.

Otro desarrollo interesante en este período ha sido el *Boeing/Insitu Scan Eagle*. Esta aeronave con configuración ala volante, se lanza con una catapulta, y se recupera mediante un gancho fijado a la aeronave que ha de trabar una cuerda, que está suspendida de una pértiga. La empresa presume de haber logrado más de 100.000 recuperaciones exitosas mediante este método que, de alguna manera, alivian los problemas de recuperación de los UAS HTOL. Sin embargo, la técnica está limitada probablemente a UAS ligeros y, aunque probado por la Marina de los EE.UU. con éxito, esta fuerza armada continúa favoreciendo la introducción de otras aeronaves VTOL, como por ejemplo el UAS *Northrop Grumman-FireScout*, para un uso más generalizado.

Tabla 1.2. Principales características de los UAS *Predator A, B y C.*

PREDATOR	A	B	C
Envergadura (m)	14,83	20	20
Longitud (m)	8,13	10,6	13,1
MTOW (kg)	1.020	4.526	7.257
Tipo Motor	Alternativo	Turbohélice	Turbofan
Potencia/Empuje	78,3 kW	500 kW	18 kN
Velocidad máxima (km/h)	217	440	740
Autonomía (h)	>20	32	20
Techo (m)	7.920	12.000	20.000
Carga de pago (kg)	204	385 int./1.360 ext.	1.855 (máx)
Tipo carga de pago	EO/IR SAR, SIGINT	EO/IR, TV SAR, Armas	EO/IR, TV, SAR, Armas (ext. e int.)

1.11. Más allá del 2010

El mercado militar de los RPAS ha mostrado una tendencia positiva desde el final de la Guerra Fría (1990) y se espera que se acelere en las primeras décadas del siglo XXI. Este hecho ha venido impulsado por la actividad de los EE.UU. en diversos conflictos desde entonces. Al mismo tiempo el tamaño del ejército de Estados Unidos ha ido evolucionando en el mismo período, avivando el deseo de una mayor dependencia de la robótica. La tendencia comercial en el mercado de la robótica está también en constante crecimiento, aunque no tan fuerte. La tecnología está apoyando estas tendencias, con la disponibilidad de microprocesadores cada vez más baratos y capaces que fomentan estos desarrollos. Los principales obstáculos para la continuación de esta tendencia son la cantidad (y el coste) del software involucrado y la barrera de fabricación de dichos chips, en cantidad y calidad suficientes.

Los retos a abordar en el futuro próximo van a venir de la mano del adecuado desarrollo e implementación de los siguientes aspectos:

- Nuevas tecnologías: nuevos materiales, configuraciones y actuación bio-mimética, operación completamente autónoma, capacidad de «ver y evitar», etc.
- Nuevos «roles»: evolución de las misiones semejantes a las de las aeronaves tripuladas hacia misiones completamente nuevas, que no han sido nunca llevadas a cabo por ningún otro tipo de avión. Un ejemplo de las primeras es el transporte aéreo robótico de carga, y con el tiempo de pasajeros, y de las últimas, la lucha contra el terrorismo.
- Nuevos retos: Para desarrollar aún más la aviación no tripulada, y específicamente las aeronaves no tripuladas, se necesita una mayor fiabilidad, un marco regulatorio apropiado de y una cartera de pedidos estable; en ese orden. La fiabilidad de los UAV es de vital importancia, ya que subyace en su asequibilidad (un problema de adquisición), la disponibilidad de sus misiones (aspectos relacionados con las operaciones y la logística), y su integración en el espacio aéreo civil no segregado (un problema regulatorio). Las tasas de accidentes de UAV militares actualmente son uno o dos órdenes de magnitud peores que las de los aviones militares tripulados y otro orden de magnitud inferior a la de aviones de transporte comercial. La mejora de la fiabilidad es, por tanto, clave para mejorar la asequibilidad, disponibilidad, y aceptación de las aeronaves no tripuladas.

1.12. Referencias

- AUSTIN, R. (2010): «Unmanned Aircraft Systems. UAVS Design, Development and Deployment». John Wiley & Sons Ltd. Chichester (Reino Unido).
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (2011): «Unmanned Aircraft Systems (UAS)». Circular 328, AN/190.
- NEWCOME, L. R. (2004): «Unmanned Aviation. A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles». American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reston, Virginia (EE.UU.).
- VALAVANIS, K. P. y VACHTSEVANOS, G. J. Editores (2015): «Handbook of Unmanned Aerial Vehicles». Springer Science+Business Media. Dordrecht (Holanda).

José María RAMÍREZ CIRIZA

*Agencia Estatal de Seguridad Aérea
Ministerio de Fomento*

2.1. Introducción

Disponer de una regulación adecuada es un elemento clave para el desarrollo seguro y ordenado del sector. La regulación da a los actores de aquél seguridad jurídica, lo que facilita la inversión y favorece la profesionalización del sector.

Las características del sector de las aeronaves pilotadas por control remoto hacen que formular una regulación para el mismo sea una tarea compleja. Se pueden encontrar en el mercado con gran disparidad de características y prestaciones, con tamaños que pueden ir desde unos gramos hasta varias toneladas, y con diferentes velocidades de desplazamiento que pueden ir desde las típicas de un ciclomotor o un automóvil hasta las de un avión a reacción. Además, todas ellas con sistemas de control que van desde los completamente manuales a los completamente automáticos. Por todo ello, es aconsejable establecer unos requisitos que sean proporcionales a los riesgos asociados a cada caso.

Por otra parte, muchos de los operadores y pilotos de estas aeronaves, en particular los de las de menor tamaño, han sido ajenos hasta ahora al sector aeronáutico, y no están familiarizados con las normas básicas del mismo, ni con los riesgos a los que van a estar expuestos en sus actividades, ni aquéllos a los que pueden exponer a terceros. Resulta pues aconsejable un esfuerzo específico de formación que tenga en cuenta las circunstancias de este colectivo.

Además, estas aeronaves utilizan tecnologías novedosas, que están en constante evolución, lo que hará necesaria una actualización continua de la normativa, de manera que mantenga su adecuación con las posibilidades técnicas de aquéllas. Ello también aconseja que, en la medida de lo posible, la normativa contenga elementos de flexibilidad que permitan acomodar las situaciones especiales que se vayan presentando. Si bien la tecnología ha sido y es esencial para el desarrollo de este sector, el actual «estado del arte» no permite aún la integración completa de estas aeronaves en el espacio aéreo como un usuario más, ante la falta de un sistema que les permita detectar y evitar a otros tráficos.

AESA compartió por primera vez con la industria (fabricantes, operadores y organizaciones profesionales), las ideas que estaba manejando respecto a los diferentes aspectos de la normativa en una Jornada que se celebró en el Ministerio de Fomento

el 30 de mayo de 2013, invitando a los participantes a formular comentarios a las mismas. Posteriormente, AESA organizó del 28 al 30 de enero de 2014, juntamente con la Dirección General de Aviación Civil, la Asociación Española de RPAS (AERPAS), que aglutina a la industria española del sector y Eurocontrol (Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea), un Taller para la comunidad española de RPAS, en que además de la industria participaron una serie de usuarios potenciales y otras instituciones y organismos interesados (Fuerzas Armadas, compañías de seguros, organismos de investigación), con el objetivo de identificar las oportunidades y los retos para el desarrollo del sector en España, así como las posibles medidas para sortear estos últimos. Entre las conclusiones del Taller figuraba de manera prominente la urgencia de disponer de la regulación, así como de legalizar lo antes posible al sector de los mini-RPAS.

Estas conclusiones, unidas a una fuerte aceleración en el desarrollo del sector en España que se produjo inmediatamente después, así como a la posibilidad de tener acceso a un instrumento normativo del rango adecuado (que debía ser legislativo, dado que se consideraba necesario modificar el alcance de algunas disposiciones de la Ley 48/1960, sobre navegación aérea) determinaron la decisión de promover una normativa inicial, de carácter temporal, que permitiese al sector desarrollar dentro de la legalidad una serie de actividades, aquéllas que representaban unos niveles de riesgos más bajos y respecto de las cuales se había alcanzado un elevado nivel de consenso sobre los requisitos a aplicar para garantizar la seguridad. Así, el Boletín Oficial del Estado n.º 163, del 5 de julio de 2014, publicaba el Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, cuyos artículos 50 y 51 contienen esa normativa temporal. Posteriormente, este Real Decreto-ley fue convalidado por el Parlamento, y finalmente tramitado por éste como Ley ordinaria, siendo aprobada y publicada en el Boletín Oficial del Estado Núm. 252, del 17 de octubre de 2014, como Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia.

En paralelo a la iniciativa anterior continuaron los trabajos de elaboración de la normativa definitiva, bajo la forma de Proyecto de Real Decreto, que culminaron con la entrega el pasado 11 de julio al Ministerio de Fomento, a través de la Dirección General de Aviación Civil, de un borrador de dicho proyecto, que fue sometido a trámite de audiencia a las partes interesadas, y posteriormente, por Resolución de la Dirección General de Aviación Civil de 14 de octubre, publicada en el Boletín Oficial del Estado Núm. 256, del 22 de octubre de 2014.

2.2. El contexto internacional

OACI

La navegación aérea tiene, por su propia naturaleza, implicaciones internacionales evidentes. Así lo reconocieron las autoridades de numerosos Estados, que el 7 de diciembre de 1944 firmaron el Convenio de Chicago, sobre aviación civil internacional. En su artículo 8 ya se contemplaban las aeronaves sin piloto, acordándose que: *«Ninguna aeronave capaz de volar sin piloto volará sin él sobre el territorio de un Estado contratante, a menos que se cuente con autorización especial de tal Estado y de conformidad con*

los términos de dicha autorización. Cada Estado contratante se compromete a asegurar que los vuelos de tales aeronaves sin piloto en las regiones abiertas a la navegación de las aeronaves civiles sean controlados de forma que se evite todo peligro a las aeronaves civiles».

El Convenio de Chicago creó la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), organismo especializado de la ONU que desarrolla Normas y Métodos Recomendados, que los Estados firmantes del Convenio se han comprometido a seguir al promulgar sus normativas nacionales de aviación civil. Esas Normas y Métodos Recomendados se contienen en Anexos al Convenio, de los que hasta ahora se han publicado 19.

La OACI empezó a trabajar en el tema de las aeronaves no tripuladas en 2005, y en 2007 constituyó un Grupo de Estudio sobre Sistemas Aéreos No Tripulados, es decir, sin un piloto a bordo (UAS, por sus siglas en inglés). En 2011 publicó la Circular 328, Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), con el objetivo de armonizar nociones, conceptos y términos, y para que sirviera como documento de orientación estratégica que guiara la evolución normativa. En ella se decantaba por integrar en el sistema de aviación civil internacional únicamente a las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA, por sus siglas en inglés), no tomando en consideración al resto de los UAS, como las aeronaves plenamente autónomas o los globos libres no tripulados u otros tipos de aeronave que no puedan dirigirse en tiempo real durante el vuelo.

Si bien es poco probable que la mayoría de las RPA existentes en la actualidad, especialmente las categorías denominadas mini-RPA (hasta 25 kg) e inferiores, se vean involucradas en la navegación aérea internacional, salvo acaso en zonas fronterizas entre Estados, los criterios y directrices de OACI son seguidos normalmente por los Estados miembros a la hora de regular las actividades aeronáuticas civiles domésticas.

La OACI publicó en 2010 una modificación del Anexo 13, sobre investigación de accidentes, para incorporar a las RPA. Posteriormente en 2012 publicó sendas modificaciones a los Anexos 2, Reglas del Aire, y 7, Marcas de nacionalidad y de matrícula de las aeronaves con el mismo objetivo. Para el último trimestre de 2016 está previsto que entren en vigor las modificaciones correspondientes al Anexo 8, Aeronavegabilidad, así como las relativas a los operadores de estas aeronaves (Anexo 6) y a las licencias de sus pilotos, denominados pilotos remotos (Anexo 1).

Entretanto, el Grupo de Estudio sobre UAS se ha transformado en noviembre de 2014 en el Panel de Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto (RPAS, por sus siglas en inglés), siendo los Paneles los foros habituales de OACI para la formulación de propuestas de Normas y Métodos Recomendados.

JARUS

Aparte de las iniciativas formales de OACI, las autoridades aeronáuticas de un grupo de países europeos establecieron en 2007 un foro informal a nivel de expertos, de participación voluntaria, con el propósito de elaborar propuestas de normas para (en aquel momento) los UAS, que los distintos Estados pudiesen trasponer a su ordenamiento jurídico, de manera que el resultado final fuera una normativa armonizada en los Estados

que hubieran adoptado sus propuestas. Este foro se denomina JARUS, que es el acrónimo en inglés de Autoridades Reunidas para la Regulación de Sistemas no Tripulados. La autoridad aeronáutica española participó en JARUS desde su inicio.

Posteriormente JARUS se abrió a la participación de autoridades de Estados no europeos, y en la actualidad participan en el grupo las autoridades de Australia, Brasil, Canadá, Colombia, EE.UU., Israel, Rusia y Sudáfrica. El programa de trabajo de JARUS prevé la publicación de la mayor parte de los documentos previstos en 2015 y 2016.

UNIÓN EUROPEA

En la Unión Europea la normativa sobre seguridad aérea es, con carácter general, competencia comunitaria, como consecuencia directa de haber establecido un mercado único en el sector aéreo. Está regulada por el Reglamento (CE) No 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de febrero de 2008, sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por el que se crea una Agencia Europea de Seguridad Aérea, y se deroga la Directiva 91/670/CEE del Consejo, el Reglamento (CE) no 1592/2002 y la Directiva 2004/36/CE (Reglamento EASA) y sus Reglamentos de ejecución de la Comisión.

No obstante, se encuentran excluidas del ámbito de aplicación de la normativa europea (art. 1.2.a) los productos, incluidas las aeronaves, cuando se efectúen actividades o servicios militares, de aduanas, policía, búsqueda y salvamento, lucha contra incendios, guardacostas o similares. En el caso de las RPA están excluidas además (art. 4.4 y Anexo II) las aeronaves no tripuladas con una masa operativa no superior a 150 kg.

La competencia para regular ambas categorías de aeronaves permanece actualmente en los Estados miembros, aunque para la segunda se va a proponer una modificación del Reglamento EASA para incluir en el ámbito de aplicación de la normativa europea a todas las RPA, sin distinción de masa.

La hoja de ruta propuesta a la Comisión Europea en junio de 2015 por un Grupo Director de personalidades de la industria nominadas por aquélla, recomienda que la futura normativa europea sobre RPA se base en los documentos elaborados por JARUS.

2.3. La normativa española de seguridad aérea. Normativa temporal

Como se ha mencionado en la Introducción de este Capítulo, la normativa temporal española para regular la utilización civil de las RPA se contiene en los artículos 50 y 51 de la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, publicada en el Boletín Oficial del Estado nº 252, del 17 de octubre de 2014 (inicialmente publicada como Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, del mismo título).

Su carácter temporal viene determinado por la Disposición final segunda, que establece que: *«El Gobierno determinará reglamentariamente el régimen jurídico aplicable a las aeronaves civiles pilotadas por control remoto, así como a las operaciones y acti-*

vidades realizadas por ellas. A la entrada en vigor de la referida norma reglamentaria quedará sin vigencia el contenido del artículo 50». Por otro lado, el punto 1 del artículo 50 especifica que: «Hasta tanto se produzca la entrada en vigor de la norma reglamentaria prevista en la Disposición final segunda, apartado 2, de esta Ley, las operaciones de aeronaves civiles pilotadas por control remoto quedan sujetas a lo establecido en este artículo».

Modificaciones a la Ley de Navegación Aérea:

En el artículo 51 se introducen modificaciones a la Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea (LNA), para adaptarla a las aeronaves pilotadas por control remoto. En particular:

- Se modifica la definición de aeronave del art. 11 de la LNA para establecer sin lugar a dudas que las aeronaves pilotadas por control remoto o drones son aeronaves.
- Se modifica el artículo 150 de la LNA para especificar que las aeronaves civiles pilotadas por control remoto, cualesquiera que sean las finalidades a las que se destinen excepto las que sean utilizadas exclusivamente con fines recreativos o deportivos, quedarán sujetas asimismo a lo establecido en la LNA y en sus normas de desarrollo, y que no están obligadas a utilizar infraestructuras aeroportuarias autorizadas.
- Se modifica el artículo 151 de la LNA para permitir que las actividades de trabajos técnicos y científicos (comúnmente conocidas como «trabajos aéreos») realizadas con aeronaves pilotadas por control remoto puedan iniciarse con una comunicación previa a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) conforme al art. 71 bis de la Ley 30/1992 de 26 de noviembre de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, sin necesidad de autorización explícita.

Normas para la operación de aeronaves civiles pilotadas por control remoto

El artículo 50 contiene las disposiciones que regulan la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto. En su primer apartado se deja sentada la responsabilidad del operador (se refiere a la entidad, empresa u organismo que opera la aeronave) sobre la aeronave y su operación, y se hace referencia a la obligación de éste de cumplir con todo el resto de normas que sean aplicables, en particular las que se refieren a la utilización del espectro radioeléctrico, y, en su caso, la protección de datos y la toma de imágenes aéreas, de las que se habla en el apartado 5 posterior.

En el apartado 2 del artículo 50 se establece la exención para las aeronaves civiles pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue no exceda de 25 kg de los requisitos establecidos con carácter general para todas las aeronaves en los artículos 29 y 36 de la LNA de inscribirse en el Registro de Matrícula de Aeronaves y disponer de certificado de aeronavegabilidad, conforme a lo ya previsto en el artículo 151 de esta misma Ley. Se ha considerado que dadas las limitadas características técnicas y prestaciones de estas aeronaves, así como las limitaciones que en la norma se imponen a su

utilización, la combinación de requisitos que se les imponen (en particular la determinación de la configuración y el estudio aeronáutico de seguridad) establece un nivel de seguridad adecuado, no siendo necesario requerir su certificación.

Por otro lado, en el mismo apartado se establece la obligación para todas las aeronaves pilotadas por control remoto de llevar fijada a su estructura una placa de identificación en la que figure, de forma legible a simple vista e indeleble, la identificación de la aeronave, mediante la designación específica y, en su caso, número de serie, así como el nombre de la empresa operadora y sus datos de contacto (en particular teléfono y/o correo electrónico). Esta placa tendrá que ser elaborada o adquirida por el propietario / operador de la aeronave, y no se han especificado unas dimensiones mínimas para la misma; éstas vendrán determinadas por el cumplimiento de los requisitos de información que debe contener y que ésta figure de forma visible a simple vista.

Las actividades aéreas con aeronaves pilotadas por control remoto que se contemplan en este artículo 50 son:

- Trabajos técnicos o científicos (conocidos como «trabajos aéreos»), ya sea por cuenta ajena (operación comercial) o por cuenta propia; los requisitos para su realización y los escenarios operacionales en que se pueden realizar están contemplados en el apartado 3 del artículo 50.
- Vuelos especiales (como vuelos de prueba, demostración, desarrollo o investigación), cuyos requisitos se contemplan en el apartado 4 del artículo 50.

En todos los casos, trabajos aéreos y vuelos especiales, se establece la limitación de que los vuelos habrán de realizarse de día, en condiciones meteorológicas visuales y en espacio aéreo no controlado.

Las condiciones meteorológicas visuales se definen en el apartado SERA.5001 de la Sección 5 del Anexo al Reglamento de Ejecución (UE) N° 923/2012 de la Comisión de 26 de septiembre de 2012 por el que se establecen el reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea, conocido como Reglamento SERA¹ (acrónimo en inglés de reglas del aire europeas únicas).

El espacio aéreo no controlado es el clasificado como de Clase F o G, según la clasificación establecida en el apartado SERA.6001 de la Sección 6 del Reglamento SERA mencionado anteriormente. La información sobre la clasificación del espacio aéreo en España se encuentra contenida en el Servicio de Información Aeronáutica (AIS, por sus siglas en inglés), suministrado en España por ENAIRE, entidad pública que presta los servicios de tránsito aéreo en ruta y de aproximación. Dentro del AIS esta información se encuentra en el AIP España (siglas en inglés de publicación de información aeronáutica), parte ENR (En Ruta), capítulo ENR 1.4². En el capítulo ENR 2.1³ se pueden encontrar los límites (incluyendo los límites inferiores) de las FIR, UIR, TMA y CTA (Regiones de

¹ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0923&from=ES>

² <http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1078418725153/?other=1078418770003#ancla2>

³ <http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1078418725153/?other=1083158950494#ancla3>

Información de Vuelo, Regiones Superiores de Información de Vuelo, Áreas de Control Terminal y Áreas de Control, respectivamente, por sus siglas en inglés).

Normas para las operaciones de trabajos aéreos

Las operaciones de trabajos técnicos o científicos («trabajos aéreos») están sujetas además a las siguientes condiciones y limitaciones:

- Las aeronaves pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue no exceda de 25 kg sólo podrán operar en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, y a una altura sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m).

Estas aeronaves habrán de volar dentro del alcance visual del piloto, a una distancia de éste no mayor de 500 m. Se exceptúan aquéllas cuya masa máxima al despegue sea inferior a 2 kg, que podrán operar más allá del alcance visual del piloto, siempre que se mantengan dentro del alcance de la emisión por radio de la estación de control y que cuenten con medios para poder conocer la posición de la aeronave. Además, la realización de estos vuelos más allá del alcance visual requiere la emisión previa de un NOTAM por el proveedor de servicios de información aeronáutica, a petición del operador, para informar al resto de los usuarios del espacio aéreo de la zona en que vayan a tener lugar.

- El resto de las aeronaves (aquéllas cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg y no sea superior a 150 kg y aquéllas cuya masa máxima de despegue sea igual o superior a 150 kg destinadas a la realización de actividades de lucha contra incendios o búsqueda y salvamento), podrán operar con las condiciones y limitaciones establecidas en su certificado de aeronavegabilidad emitido por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea.

Los operadores de «trabajos aéreos» con aeronaves pilotadas por control remoto habrán de cumplir los siguientes 10 requisitos:

1. Disponer de la documentación relativa a la caracterización de las aeronaves que vaya a utilizar, (definición de su configuración, características y prestaciones).
2. Haber elaborado un «Manual de Operaciones del operador» que establezca los procedimientos de la operación. Este documento no debe confundirse con el «Manual de Vuelo» o documento equivalente de la aeronave, que explica su funcionamiento y da instrucciones para su manejo, incluyendo las situaciones anormales y de emergencia (que puede incluirse dentro del «Manual de Operaciones»), sino que debe contener los criterios y procedimientos que va a utilizar el operador para realizar de manera segura los diferentes tipos de operaciones que lleve a cabo.
3. Haber realizado un estudio aeronáutico de seguridad de la operación u operaciones, en el que se constate que la misma puede realizarse con seguridad, que puede ser específico para un área geográfica o tipo de operación determinado, o genérico de manera que abarque un abanico amplio de tipos de operación y/o

áreas geográficas. En este segundo caso, el estudio será más complejo, pero evitará el inconveniente del estudio específico de tener que remitir una modificación cada vez que se vaya a realizar una operación o volar en un área geográfica no contemplados en el estudio inicial.

4. Haber realizado con resultado satisfactorio los vuelos de prueba necesarios para demostrar que la operación pretendida puede realizarse con seguridad. Estos vuelos se contemplan en el apartado 4 del artículo 50.
5. Haber establecido un programa de mantenimiento de la aeronave, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.
6. Que la aeronave esté pilotada por pilotos que cumplan los requisitos establecidos en el apartado 5 del mismo artículo 50.
7. Que el operador cuente con una póliza de seguro u otra garantía financiera que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución del vuelo, conforme a la normativa aplicable (Real Decreto 37/2001 para las aeronaves de peso inferior a 20 kg de peso máximo al despegue y Reglamento (CE) nº 785/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo para el resto).
8. Haber adoptado las medidas adecuadas para proteger a la aeronave de actos de interferencia ilícita durante las operaciones (incluyendo la interferencia deliberada del enlace de radio) y establecido los procedimientos necesarios para evitar el acceso de personal no autorizado a la estación de control y al lugar de almacenamiento de la aeronave.
9. Haber adoptado las medidas adicionales necesarias para garantizar la seguridad de la operación y para la protección de las personas y bienes subyacentes (normalmente serán las medidas de mitigación establecidas en el estudio aeronáutico de seguridad para reducir los riesgos a niveles aceptables, junto con cualquier otra medida que el operador haya decidido adoptar).
10. No volar en ningún caso a menos de 8 km de cualquier aeropuerto o aeródromo, o si se trata de una operación más allá del alcance visual del piloto de una aeronave de menos de 2 kg y el aeropuerto cuenta con procedimientos de vuelo instrumental, a menos de 15 km de su punto de referencia.

Normas para vuelos especiales

Los vuelos especiales que se contemplan son:

- a) Vuelos de prueba de producción o de mantenimiento, realizados por los fabricantes u organizaciones dedicadas al mantenimiento.
- b) Vuelos de demostración no abiertos al público, dirigidos a grupos cerrados de asistentes a un evento o clientes potenciales de un fabricante u operador.

- c) Vuelos para programas de investigación, en que se intenta demostrar la viabilidad de realizar determinadas operaciones con aeronaves de este tipo.
- d) Vuelos de desarrollo, para poner a punto técnicas y procedimientos para poner en producción una actividad con este tipo de aeronaves.
- e) Vuelos de I + D realizados por fabricantes de aeronaves pilotadas por control remoto para el desarrollo de nuevos productos.
- f) Los necesarios para demostrar que las actividades de trabajos aéreos solicitadas conforme al apartado 3 pueden realizarse con seguridad.

Además de la limitación general mencionada anteriormente (los vuelos habrán de realizarse de día, en condiciones meteorológicas visuales y en espacio aéreo no controlado), estos vuelos habrán de realizarse en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, y dentro del alcance visual del piloto, o, en caso contrario, en una zona del espacio aéreo segregada al efecto.

Los requisitos para su realización son los mismos que para las operaciones de trabajos aéreos, enumerados en el epígrafe anterior, con excepción de los puntos 2 («Manual de Operaciones»), 4 («vuelos de prueba previos») y 5 («programa de mantenimiento»). Por el contrario, han de cumplir con un requisito adicional, que consiste en establecer una zona de seguridad en relación con la zona de realización del vuelo.

Situaciones de riesgo, catástrofe o calamidad pública

Los operadores de trabajos aéreos habilitados conforme a la normativa para realizar esas actividades podrán realizar, bajo su responsabilidad, vuelos que no se ajusten a las condiciones y limitaciones mencionadas anteriormente para las operaciones de trabajos aéreos y para los vuelos especiales, en situaciones de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública, así como para la protección y socorro de personas y bienes en los casos en que dichas situaciones se produzcan, cuando les sea requerido por las autoridades responsables de la gestión de dichas situaciones.

Requisitos aplicables a los pilotos de las aeronaves civiles pilotadas por control remoto

Se contienen en el apartado 5 del artículo 50, y consisten en:

1. Acreditar que poseen los conocimientos teóricos correspondientes a cualquier licencia de piloto, lo que puede hacerse de una de estas tres maneras:
 - a. Siendo titular de una licencia, o habiéndolo sido dentro de los últimos 5 años (si no han sido desposeídos de ella por procedimiento sancionador).
 - b. Demostrando de forma fehaciente que disponen de los conocimientos teóricos necesarios para la obtención.

- c. Para aeronaves de hasta 25 kg de masa máxima al despegue, disponer de un certificado básico (para volar dentro del alcance visual) o avanzado (para volar más allá del mismo) para el pilotaje de aeronaves pilotadas por control remoto, expedido por una Organización de Formación Aprobada (ATO por sus siglas en inglés) por AESA conforme al Reglamento de Personal de Vuelo de la Comisión Europea⁴.
2. Quienes no sean titulares de una licencia de piloto deberán acreditar además:
 - a. Tener 18 años de edad cumplidos.
 - b. Ser titulares de un certificado médico correspondiente al menos al requerido para una licencia de piloto de aviación ligera (LAPL), para aeronaves de hasta 25 kg, y de Clase 2, para las de masa superior, conforme al citado Reglamento de Personal de Vuelo de la Comisión Europea⁵.
 3. Además, todos los pilotos deberán disponer de un documento que acredite que disponen de los conocimientos adecuados de la aeronave que van a pilotar y sus sistemas, así como de su pilotaje. Este documento lo puede emitir el operador para el que vayan a trabajar, el fabricante de la aeronave o una organización autorizada por éste para ello, o una ATO, con la limitación de que en ningún caso lo puede emitir el propio piloto.

Medios aceptables de cumplimiento y material guía respecto de los requisitos de las normas

AESA ha publicado en su página Web una Resolución de su Directora (original de 7 de julio de 2014, y subsiguiente de 17 de noviembre de 2014 para adecuarlos a la Ley 18/2014) adoptando medios aceptables de cumplimiento y material guía respecto de algunos de los requisitos anteriores, contenidos en Apéndices a la Resolución, en aplicación de las habilitaciones para adoptarlos contenidas en la Ley (apartado 10 del artículo 50 y apartado 5 de la Disposición final segunda).

Los Apéndices que contienen información relativa a los requisitos anteriores son:

- Apéndice C: Normativa aplicable de cuyo cumplimiento será igualmente responsable el operador (art. 50.1).
- Apéndice D: Caracterización de las aeronaves para las operaciones previstas en los puntos 3.a) y b) y 4 del artículo 50 con RPAS de menos de 25 kg de MTOM (art. 50 3.d.1º, 50.4 y 50.6.d).
- Apéndice E: Contenido del Manual de operaciones (art. 50.3.d.1º).

⁴ Reglamento (UE) n.º 1178/2011 de la Comisión, de 3 de noviembre de 2011, por el que se establecen requisitos técnicos y procedimientos administrativos relacionados con el personal de vuelo de la aviación civil.

⁵ Los requisitos para los certificados médicos para LAPL no entran en vigor hasta abril de 2015; entretanto el único certificado médico disponible para cumplir este requisito es el de Clase 2.

- Apéndice F: Estudio aeronáutico de seguridad en la operación de aeronaves pilotadas por control remoto (art. 50.3.d.3º, 50.4 y 50.6).
- Apéndice G: Contenido de «los vuelos de prueba que resulten necesarios para demostrar que la operación pretendida puede realizarse con seguridad» (art. 50.3.d.4 y 50.6).
- Apéndice H: Revisiones y pruebas a incluir en el programa de mantenimiento de una aeronave pilotada por control remoto (art. 50, 3.d.5 y 50.6).
- Apéndice I, revisión 1 (31.07.2014): Medios aceptables para acreditar el cumplimiento de los requisitos para los pilotos para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto (art. 50.5).

Procedimientos administrativos aplicables

Los procedimientos administrativos aplicables se establecen en los apartados 6 y 7 del artículo 50. El apartado 6 se refiere a los procedimientos para el ejercicio de las actividades de «trabajos aéreos» previstas en el apartado 3 y la realización de vuelos especiales del apartado 4 con aeronaves de masa máxima al despegue de hasta 25 kg, que quedan sujetas a un régimen de comunicación previa y declaración responsable conforme al artículo 71 bis de la Ley 30/1992 de 26 de noviembre de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, sin necesidad de autorización explícita.

La comunicación previa debe contener:

- a) Los datos identificativos del operador, de las aeronaves que vayan a utilizarse en la operación y de los pilotos que la realicen, así como las condiciones en que cada uno de ellos acredita los requisitos exigibles conforme al apartado 5.
- b) La descripción de la caracterización de dichas aeronaves, incluyendo la definición de su configuración, características y prestaciones, conforme al requisito 1º del apartado 3.
- c) El tipo de trabajos técnicos o científicos que se vayan a desarrollar o, en otro caso, los vuelos que se vayan a realizar y sus perfiles, así como de las características de la operación.
- d) Las condiciones o limitaciones que se van a aplicar a la operación o vuelo para garantizar la seguridad, conforme al requisito 9º del apartado 3.

Junto a la comunicación previa, el operador deberá presentar una declaración responsable en el que manifieste, bajo su responsabilidad, que cumple con cada uno de los requisitos exigibles para la realización de las actividades u operaciones comunicadas, que dispone de la documentación que así lo acredita y que mantendrá el cumplimiento de dichos requisitos en el período de tiempo inherente a la realización de la actividad.

Junto con la declaración responsable, el interesado habrá de aportar el «Manual de Operaciones» requerido en el apartado 3.d), punto 2.º, así como el estudio aeronáutico de seguridad y la documentación acreditativa de disponer del seguro exigido (apartado 3.d, puntos 3.º y 7.º). En el caso de realización de vuelos especiales conforme al apartado 4 solo se requerirán los dos últimos documentos. Para la realización de operaciones de «trabajos aéreos» conforme al apartado 3, se requiere además aportar el programa de mantenimiento y acreditación de la realización de los vuelos de prueba con resultado satisfactorio (apartado 3.d, puntos 4.º y 5.º).

La documentación habrá de presentarse con una antelación mínima de 5 días a la fecha de inicio prevista de las operaciones a AESA, que emitirá en un plazo de cinco días desde la recepción de la documentación un acuse de recibo en que figurarán las actividades para cuyo ejercicio queda habilitado el interesado por la comunicación. Este acuse de recibo será el documento que el interesado podrá exhibir para demostrar que está legalmente habilitado para esas actividades.

Cualquier modificación de la comunicación (cambios en los tipos de operaciones, cambios de pilotos, cambios de aeronaves, cambios en la documentación requerida, etc.) deberá ser objeto de una nueva comunicación y requiere presentar una declaración responsable actualizada, junto con las modificaciones que se hayan introducido a la documentación previamente presentada. Igualmente esta comunicación debe presentarse con un mínimo de 5 días de antelación respecto de la fecha prevista de implementación de la modificación.

El plazo para la emisión del acuse de recibo por AESA empieza a contar desde el momento en que la Agencia recibe la documentación en su registro, por lo que si el interesado la entrega en el registro de cualquier otro órgano administrativo, conforme a lo establecido en el artículo 38.4.b) de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, ha de tener en cuenta el tiempo adicional que pueda transcurrir hasta la recepción de la documentación en el registro de AESA.

El apartado 7 del artículo 50 se refiere a los procedimientos para el ejercicio de las actividades de «trabajos aéreos» previstas en el apartado 3 y la realización de vuelos especiales del apartado 4 con aeronaves de masa máxima al despegue superior a 25 kg, que está sujeta a autorización previa por AESA. El contenido mínimo de la solicitud será el mismo que el de la comunicación previa contemplada en el apartado 6, y junto a ella deberá presentarse también la declaración responsable y documentación adjunta exigida en ese apartado. En el caso de que no se produzca resolución expresa en un procedimiento de autorización conforme a este apartado en el plazo máximo establecido, la autorización debe entenderse denegada por silencio administrativo.

Para facilitar la tarea de los interesados, AESA ha publicado en su Web, como Apéndices de la Resolución de la Directora de AESA anteriormente mencionada, modelos de declaración responsable (que contienen toda la información que debe incluirse conforme a estas normas y al artículo 71 bis de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común) y de acuse de recibo, de manera que pueden rellenarse directamente por aquéllos. Se trata de los siguientes documentos:

- Apéndice A.1, art. 50.3, modelo de declaración responsable para operaciones de «trabajos aéreos».
- Apéndice A.2, art. 50.4, modelo de declaración responsable para vuelos especiales.
- Apéndice B.1, art. 50.3, modelo de acuse de recibo para operaciones de «trabajos aéreos».
- Apéndice B.2, art. 50.4, modelo de acuse de recibo para vuelos especiales.

Por último, el apartado 8 del artículo 50 establece que la comunicación previa o autorización para la realización de «trabajos aéreos» conforme al apartado 3 habilita para el ejercicio de la actividad por tiempo indefinido (en caso de la comunicación una vez transcurrido el plazo establecido de 5 días), sujeto al cumplimiento de los requisitos exigidos y en tanto se mantenga éste.

En cuanto a la comunicación previa o autorización para la realización de los vuelos especiales previstos en el apartado 4, habilita solamente para la realización de aquellos vuelos específicos que se hayan incluido en la comunicación o autorización (sujeto igualmente a la antelación establecida en caso de comunicación), sujeto al cumplimiento de los requisitos exigidos y en tanto éste se mantenga.

AESA ejercerá las facultades de comprobación, control e inspección que tiene atribuidas, de conformidad con el apartado 3 del artículo 71 bis de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común

2.4. La normativa española de seguridad aérea. Normativa final

AESA preparó un Proyecto de Real Decreto por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, con el objetivo de dar cumplimiento a lo dispuesto en la Disposición final segunda de la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, que establece que: «El Gobierno determinará reglamentariamente el régimen jurídico aplicable a las aeronaves civiles pilotadas por control remoto, así como a las operaciones y actividades realizadas por ellas. A la entrada en vigor de la referida norma reglamentaria quedará sin vigencia el contenido del artículo 50».

Este Proyecto se encuentra actualmente en tramitación, habiendo sido sometido por la dirección General de Aviación Civil a trámite de audiencia por las partes interesadas, y posteriormente a información pública (Resolución de la DGAC de 14 de octubre de 2014, BOE n.º 256, de 22 de octubre). Dado que el Proyecto será objeto de modificaciones en función de las alegaciones recibidas, resulta prematuro incluir aquí comentarios acerca de su contenido, si bien cabe mencionar que sigue las líneas de la normativa temporal en cuanto a las actividades contenidas en ésta, y propone la eliminación de alguna de las condiciones y limitaciones establecidas inicialmente (vuelo en zonas urbanas o sobre aglomeraciones de personas, vuelo nocturno), sujeto al cumplimiento de requisitos adicionales para garantizar un nivel de seguridad adecuado.

Dado que algunos de los pasos del proceso de tramitación están fuera del control de AESA y del propio Ministerio de Fomento, no es posible aventurar una posible fecha de publicación.

2.5. Otras normas que afectan a la utilización civil de los Drones

En primer lugar hay que mencionar otras normas que resultan aplicables a operaciones específicas de «trabajos aéreos», con aeronaves tripuladas o no. En particular hay que tener en cuenta la Orden de Presidencia del Gobierno de 14 de Marzo de 1957, sobre Fotografía Aérea y el Decreto de 13 de agosto de 1948, por el que se reglamenta la propaganda comercial realizada desde el aire (BOE n.º 281 de 7 de octubre de 1948).

En cuanto a la fotografía aérea, es necesario solicitar autorización a AESA si se va a realizar en una serie de zonas del territorio español que tienen la consideración de «zonas restringidas al vuelo fotográfico». Para otorgarla, AESA ha de consultar al Estado Mayor del Ejército del Aire (Centro Cartográfico y Fotográfico del Aire). En el caso de vuelos con fines de cartografía, se ha de solicitar autorización al Instituto Geográfico Nacional, para cualquier zona, restringida al vuelo fotográfico o no. Los detalles figuran en documento titulado «Instrucciones relativas a los procedimientos administrativos para la solicitud de autorizaciones de trabajos de empresas de fotografía aérea (vertical y oblicua), filmaciones aéreas y captación de datos con cualquier tipo de sensores», de 5.12.12, que se puede solicitar en trabajosaereos.aesa@seguridadaerea.es.

Para aquellas operaciones en que pudieran captarse datos personales (fotografías de personas en las que pudieran ser identificadas, datos obtenidos por sensores térmicos u otro tipo de sensores, etc.), sería de aplicación la normativa sobre protección de datos de carácter personal, en particular la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal (Título VI con rango de ley ordinaria) y Real Decreto 1720/2007 por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal. La Agencia Española de Protección de Datos (www.agpd.es) es el organismo de la Administración General del Estado encargado de velar por su aplicación.

Resulta recomendable que los operadores que vayan a realizar actividades susceptibles de captar datos personales se familiaricen con esta normativa y elaboren un plan para facilitar su cumplimiento.

Por último, hay que hacer mención a la normativa de telecomunicaciones. De aplicación general es el Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias (CNAF). Se pueden utilizar las bandas de frecuencias asignadas al servicio móvil aeronáutico, para lo que hay que obtener la correspondiente autorización del organismo competente (Dirección General de Telecomunicaciones del Ministerio de Industria, Energía y Turismo), o utilizar una frecuencia en bandas de uso libre (la utilizada más comúnmente en RPAS es 2,4 GHz), teniendo en cuenta que hay que respetar las limitaciones de potencia de emisión y que se está sujeto a posibles interferencias de otros usuarios que la utilicen.

Además, habrá que tener en cuenta la posible aplicabilidad de la Directiva 1999/5/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 1999, sobre equipos radioeléct-

tricos y equipos terminales de telecomunicación y reconocimiento mutuo de su conformidad, traspuesta en España por el Real Decreto 1890/2000, de 20 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece el procedimiento para la evaluación de la conformidad de los aparatos de telecomunicaciones. Esa Directiva será sustituida a partir de 2016 por la Directiva 2014/53/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de abril de 2014 relativa a la armonización de las legislaciones de los Estados miembros sobre la comercialización de equipos radioeléctricos, y por la que se deroga la Directiva 1999/5/CE. A la hora de valorar su aplicabilidad se tomará en consideración el punto 5 del Anexo I de la Directiva de 1999 (traspuesto en el art. 2.5.e. del Reglamento adjunto al Real Decreto 1890/2000) y el punto 3 del Anexo I de la Directiva de 2014 una vez que las medidas previstas en ella sean de aplicación.

Manuel OÑATE DE MORA

USOL - Unmanned Solutions

3.1. Sistemas de aeronaves no tripuladas, UAS, y Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, RPAS

De acuerdo con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), «El hecho de que la aeronave sea tripulada o no tripulada no afecta a su condición de aeronave. Cada categoría de aeronave tendrá posiblemente versiones no tripuladas en el futuro. Este punto es fundamental para todos los aspectos futuros relativos a las UA y proporciona la base para tratar la aeronavegabilidad, el otorgamiento de licencias al personal, las normas de separación, etc.»¹.

Es decir, que las aeronaves no tripuladas son, ante todo, aeronaves, y por tanto están sujetas a las mismas reglas y limitaciones que las aeronaves tripuladas.

El mismo documento de la OACI establece dos preceptos importantes que han de tenerse en cuenta en la discusión que sigue:

- En primer lugar, la preferencia a considerar el sistema completo, integrado no sólo por la propia aeronave, sino también por la estación de control en tierra («Ground Control Station» o GCS) y el enlace de comunicaciones entre ésta y la aeronave. De esta manera se habla de UAS (sistemas de aeronaves no tripuladas) y de RPAS (sistemas de aeronaves pilotadas a distancia) relegando los términos de aeronaves no tripuladas (UA o UAV) y aeronaves pilotadas a distancia (RPA) a aquellas ocasiones en las que se quiere hacer referencia específica a las propias aeronaves.
- En segundo lugar, la distinción entre RPAS y aeronaves completamente autónomas, en las que no existe control efectivo del piloto remoto sobre la aeronave, en todo o parte del vuelo.

Queda pues claro que así como todos los RPAS son UAS, no todos los UAS son RPAS, tal como se muestra en forma gráfica a continuación.

¹ Circular OACI 328-AN/190 de 2011.

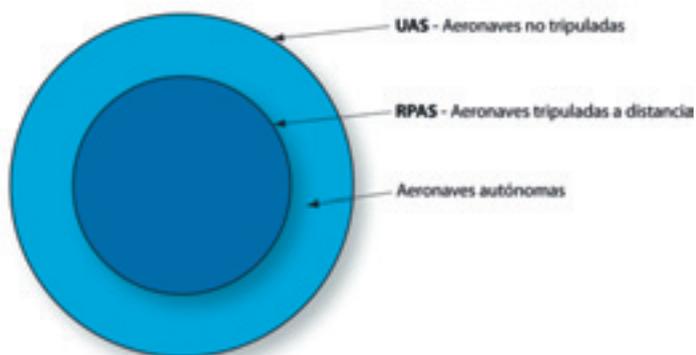


Figura 3.1. Tipos de aeronaves no tripuladas.

En todo caso, las aeronaves autónomas plantean problemas importantes para garantizar la seguridad (*cómo evitar accidentes*) y sobre todo para asignar la responsabilidad en caso de accidente (*de quién es la culpa*), por lo que su desarrollo no está previsto a corto plazo, al menos en el mundo civil. Por esta razón nos centraremos exclusivamente en el resto de este artículo en los RPAS.

3.2. Clasificación de aeronaves

Existen muchas posibles formas de clasificar las aeronaves. Es frecuente utilizar una clasificación ateniendo a la forma en la que las aeronaves consiguen su sustentación en la atmósfera. En el siguiente diagrama se plantea una posible clasificación simplificada que muestra los principales tipos de aeronaves:



Figura 3.2. Clasificación de aeronaves por su forma de sustentación.

En primera instancia, dentro de los RPAS se encuentran representadas todos los tipos de aeronaves posibles, si bien, como veremos más adelante al igual que ocurre en la aviación tradicional tripulada, unos tipos han tenido mayor éxito que otros.

Por otra parte aparecen categorías nuevas, como los híbridos, que desarrollan parte del vuelo en forma de ala rotatoria, generalmente en el despegue y aterrizaje y posiblemente en alguna parte de la misión, aprovechando las ventajas de este tipo de sistemas, realizando una transición a ala fija para alcanzar de forma rápida y eficiente su objetivo. Aunque existen prototipos tripulados de aeronaves híbridas, posiblemente su mayor desarrollo tendrá lugar en el campo de los RPAS.

3.3. Uso civil y militar

Como tantas otras tecnologías, el desarrollo inicial de los RPAS ha tenido lugar fundamentalmente en el ámbito militar. En este ámbito los RPAS ya han alcanzado un grado de madurez notable; en el ejército más poderoso del mundo, el norteamericano, los RPAS constituyen ya alrededor de un tercio del total de la flota de aeronaves en operación y desempeñan en exclusiva todas las misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR por sus siglas en inglés) que llevan a cabo las fuerzas armadas, habiendo desplazado totalmente a los medios aéreos convencionales.

De acuerdo con la consultora de defensa *Teal Group Corporation*, el inventario a 1 de enero de 2013 de sistemas aéreos no tripulados era el siguiente:

Tabla 3.1.

MODELO	NÚMERO	TIPO
RQ-11 Raven	7.200	Ala fija
Wasp	939	Ala fija
RQ-20 Puma	1.125	Ala fija
RQ-16 T-Hawk	306	Ala rotatoria
ScanEagle	194	Ala fija
RQ-7 Shadow	499	Ala fija
Expeditionary UAS	16	Ala fija
RQ-21 Integrator STUAS	20	Ala fija
RQ-5 Hunter	44	Ala fija
MQ-1 Predator	235	Ala fija
MQ-8 Fire Scout	18	Ala rotatoria
RQ-9 Reaper	100	Ala fija
RQ-4 Global Hawk	34	Ala fija
TOTAL	10.730	

Fuente: *Teal Group Corporation*. 2013.

De la tabla anterior se deduce que en el ámbito militar la preponderancia de los sistemas de ala fija es casi absoluta (97%).

En el ámbito civil, mucho menos desarrollado que el militar, la situación es la opuesta. De acuerdo con la información suministrada por la Dirección General de la Aviación Civil francesa (DGAC) referida a las autorizaciones otorgadas hasta octubre de 2013, la distribución por tipo de aeronave era la siguiente:

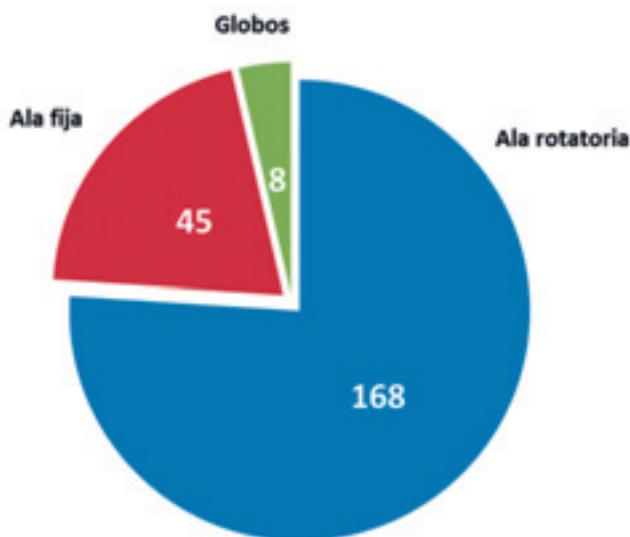


Figura 3.3. Aeronaves utilizadas por los operadores civiles franceses. (Direction Générale de l'Aviation Civile, 2013).

En este caso los sistemas basados en aeronaves de ala rotatoria superan ampliamente a los de otros tipos, si bien no de forma tan aplastante como ocurre en el mundo militar, ya que sólo suponen un 76% del total.

Llama la atención el hecho de que haya tan sólo ocho globos registrados (un 4%), todos ellos cautivos. A primera vista parecía una buena idea utilizarlos para elevar una cámara, evitando muchos de los problemas que se cometan más adelante, pero por alguna razón ésto no parece ser así, al menos de momento.

3.4. Ventajas de los RPAS

Existen varias razones que explican la discrepancia entre el mundo militar y el civil. Para entender estas razones resulta muy conveniente analizar las ventajas que proporcionan los RPAS.

El Departamento de Defensa de los EE.UU. ha popularizado el concepto de que los sistemas no tripulados son adecuados en tres tipos de aplicaciones militares, conocidas como las tres «Des»:

- *Dull* (aburridas)
- *Dangerous* (peligrosas)
- *Dirty* (sucias)

Como se ha comentado anteriormente, los RPAS son utilizados de forma exclusiva en las misiones ISR de inteligencia, vigilancia y reconocimiento. Son éstas misiones normalmente de larga duración y de carácter muy rutinario, en las que los sensores embarcados en el sistema recogen la información necesaria mientras la aeronave recorre un plan de vuelo preestablecido y en las que el piloto no debe interactuar con la aeronave a no ser que se produzca una alerta. Son, en otras palabras, misiones de carácter extremadamente aburrido para las que los pilotos humanos resultan muy poco adecuados.

Otro tipo de misiones son las de reconocimiento a corta distancia, en las que se trata de determinar si existe algún peligro «al otro lado de la colina». En este caso existe un riesgo cierto de que el enemigo abata a la pequeña aeronave que se envía a reconocer el terreno, lo que siempre será más aconsejable que adentrarse en territorio desconocido a ciegas, especialmente si hay un enemigo capaz de derribar el avión de reconocimiento.

Finalmente, es concebible utilizar sistemas RPAS en aquellas situaciones en las que el ambiente a sobrevolar se encuentra contaminado, lo que podría acarrear problemas sanitarios a la tripulación del avión.

En ambiente civil se presentan igualmente las mismas condiciones que aconsejan utilizar RPAS frente a medios convencionales, pero además aparece otra consideración que resultan incluso más importante: el factor del coste.

El hecho de que la tripulación del avión se quede en tierra significa que la aeronave puede ser mucho más pequeña, lo que normalmente se traduce en una reducción del coste de fabricación, mantenimiento y operación de la aeronave y, por tanto, del coste de la hora de vuelo, o lo que es más importante, el de la adquisición de la unidad de información deseada.

Pero además, ese menor tamaño, combinado con la mayor automatización que resulta característica de los RPAS, permite llevar a cabo operaciones que no serían posibles con aeronaves tripuladas como puede ser el volar en interiores, acercarse mucho más al objetivo y realizar maniobras de muy alta precisión utilizando radios de giro muy reducidos.

El menor tamaño también resulta en unas menores necesidades logísticas. Los RPAS de tamaño reducido se pueden desplegar desde terrenos no preparados, sin utilizar ningún tipo de infraestructura aeroportuaria, lo que puede resultar crítico en situaciones de emergencia y en general ahorra notablemente los costes de operación.

Por el contrario, el pequeño tamaño impone algunas limitaciones importantes como son la capacidad de carga, la autonomía y, muy notablemente, las condiciones meteorológicas que pueden soportar, especialmente el viento. Es evidente que no existe ninguna limitación al tamaño posible de los RPAS, que pueden ser tan grandes como las aeronaves tripuladas, pero en ese caso desaparecen la mayor parte de las ventajas

consignadas, quedando su uso prácticamente restringido a las tres «Des» mencionadas anteriormente.

Esa es la razón principal de que en el mundo civil el desarrollo de los RPAS esté limitado actualmente a las aeronaves de menor tamaño. Por encima de unos 25 kg no es fácil encontrar modelos de negocio viables, y ello incluso sin tener en cuenta los problemas que se derivan de aumentar la distancia entre el piloto y la aeronave², en los que no entraremos. Puesto que el aumento de la autonomía y por tanto de la distancia de operación es precisamente la principal razón para aumentar el tamaño de la aeronave, es evidente que nos encontramos ante una situación todavía no resuelta satisfactoriamente, al menos en el ámbito civil.

En consecuencia, en el análisis que sigue, nos centraremos en las RPAS con una masa máxima al despegue de menos de 25 kg.

3.5. Modos de operación

En esencia sólo existen cuatro modos posibles de operación en cuanto a la forma de pilotar una aeronave de forma remota (es frecuente introducir modos intermedios, que no son sino variantes de los cuatro siguientes), con un grado de automatización creciente:

- **Modo manual:** En este modo, el piloto remoto actúa sobre las superficies de control y la potencia del motor o motores, a través de una emisora de radiocontrol.
- **Modo asistido:** Es similar al modo manual, pero el piloto remoto no actúa directamente sobre las superficies de control o los motores, sino que indica sus intenciones (girar a la derecha, subir, etc.) en su puesto de radiocontrol y actúa un autopiloto que las transforma en actuaciones sobre las superficies de control o los motores que consigan ese propósito.
- **Modo automático:** El piloto remoto establece un «plan de vuelo», es decir, un cierto número de puntos de paso («waypoints») de forma previa al inicio del vuelo. La aeronave cuenta con un autopiloto que ejecuta el plan previsto, realizando de forma automática las acciones requeridas en cada momento. Sin embargo el piloto mantiene el control en todo momento, pudiendo modificar los puntos de paso durante el vuelo, ejecutar maniobras predeterminadas (como por ejemplo la «vuelta a casa» en caso de alerta) o incluso tomar el control directamente, bien sea de forma manual o asistida.
- **Modo autónomo:** Generalmente es similar al modo anterior, en cuanto que se establece un plan de vuelo predeterminado, pero una vez iniciado el vuelo la aeronave ejecuta el plan de forma totalmente autónoma, sin requerir la intervención del piloto incluso en caso de producirse situaciones de emergencia. En el futuro es posible que incluso se elimine la necesidad de introducir plan de vuelo alguno, sino que la aeronave simplemente realice la misión completa, como puede ser seguir una infraestructura lineal mediante reconocimiento óptico, o dirigirse a un cierto punto evitando posibles obstáculos en el camino, etc.

² Los principales son los derivados de la necesidad de mantener el radioenlace de comando y control entre el piloto en tierra y la aeronave, y la capacidad de «detectar y evitar» otro tráfico aéreo y posibles obstáculos en tierra.

Como se ha comentado anteriormente, por definición un RPAS sólo puede funcionar en alguno de los tres primeros modos, no estando permitido el modo autónomo excepto en un caso de emergencia derivado de la pérdida de comunicaciones entre el piloto y la aeronave³.

Es evidente que los dos primeros modos, especialmente el primero, requieren que la aeronave se encuentre a la vista del piloto o, por lo menos, que transmita información suficiente como para que el piloto cuente con suficiente conocimiento de la situación («*situational awareness*») de la aeronave y de su entorno como para poder tomar las decisiones adecuadas en cada momento. Por esta razón los modos manual y asistido suelen estar restringidos a los escenarios de vuelo en línea de vista visual («*Visual Line of Sight*» o VLOS).

Por otra parte se destaca el hecho de que el modo manual sólo se utiliza normalmente en las aeronaves de ala fija. Las de ala rotatoria, especialmente en el caso de los multirrotores, suelen utilizarse en modo asistido, por la dificultad de un piloto humano de coordinar todas las acciones requeridas para mantener la aeronave en equilibrio y ejecutar las maniobras deseadas. En ambos casos se requiere de una considerable destreza por parte del piloto para controlar la aeronave desde tierra, lo que sin duda limita constituye una limitación a las posibles aplicaciones de los RPAS dotados de estos modos de operación.

Por esta razón existe una tendencia a utilizar de forma exclusiva RPAS en modo automático, o por lo menos en una forma de modo asistido en la que el piloto recibe una imagen tomada por una cámara dirigida hacia adelante, denominada visión en primera persona («*first person view*» o FPV), lo que le permite actuar como si estuviera embarcado en ella. Nótese que estos dos sistemas son los únicos posibles en caso de vuelos más allá de la línea de vista («*Beyond Visual Line of Sight*» o BVLOS).

Sin embargo, el modo automático resulta también muy indicado en vuelos en línea de vista en para misiones rutinarias, como por ejemplo la realización de un levantamiento cartográfico mediante técnicas de fotogrametría. La principal ventaja que proporciona el modo automático es la posibilidad de utilizar pilotos de menor capacitación y, por lo tanto, de reducir el coste de operación.

3.6. Ventajas de los sistemas de ala fija y variable

Como se ha comentado anteriormente, la inmensa mayoría de los RPAS para uso civil son multirrotores.

Esto es así porque este tipo de aeronaves son muy adecuadas para la principal actividad que se está desarrollando en estos momentos, la toma de imágenes y videos para el sector audiovisual, que según las estimaciones de la Asociación Española de RPAS

³ Incluso en este caso se reduce al máximo la autonomía de la aeronave, que se limita a ejecutar una maniobra predeterminada encaminada a evitar en la mayor medida posible un accidente hasta que se recupere el enlace de comunicaciones.

– AERPAS, constituyen alrededor del 90% de la actividad, al igual que ocurre en otros países europeos.

Las principales ventajas de los multirrotores son las siguientes:

- Despegue y aterrizaje vertical, lo que reduce las necesidades del espacio requerido en tierra para su operación, aunque esta ventaja no resulta en la práctica tan importante puesto que los aviones de reducida dimensión pueden operarse sin necesidad de pista utilizando catapultas para el lanzamiento y recogida con paracaídas o entrada en pérdida controlada.
- La posibilidad de volar a punto fijo (vuelo estacionario) o a muy baja velocidad, lo que resulta muy adecuado para aplicaciones de inspección, la segunda actividad en importancia.
- Mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo. Mientras que los sistemas de ala fija siguen trayectorias curvilíneas, con unos radios de giro relativamente grandes y con velocidades de ascenso y descenso bastante estrictas, los multirrotores pueden volar prácticamente siguiendo cualquier trayectoria deseada en las tres dimensiones. Esto les permite tomar unos planos de gran dramatismo, acercándose mucho más al objetivo si es necesario y, combinando el movimiento de la aeronave con el de la cámara embarcada, se pueden conseguir unas imágenes que hasta ahora no eran posibles.
- Su diseño les permite embarcar cargas de pago más voluminosas, en relación con su propio tamaño, que los aviones.

Las principales ventajas de los aviones son las siguientes:

- Son mucho más eficientes que los multirrotores lo que les permite, a igualdad de tamaño, una mayor autonomía.
- Pueden volar a mayor velocidad, lo que combinado con lo anterior significa que pueden cubrir una distancia o un área mucho mayor, lo que les hace más indicados en actividades de cartografía o teledetección.
- Tienen una huella sonora sensiblemente menor, por lo que resultan más indicados para operaciones de vigilancia.
- Con las limitaciones descritas anteriormente, tienen un mayor rango climático en términos de temperatura, viento y lluvia.

A la vista de lo anterior se explica por qué los multirrotores dominan actualmente el mercado, si bien es previsible que en el futuro, a medida que se desarrollen aplicaciones de ejecución más complejas, cubriendo mayores distancias y desarrolladas a mayor altura sobre el terreno, al igual que ocurre en el caso militar, los sistemas de ala fija aumentarán su peso.

3.7. Ejemplos de sistemas de ala fija y rotatoria

A continuación se presentan dos ejemplos de RPAS de igual tamaño, que muestran las características de ambos tipos de sistemas.



Figura 3.4. Ala fija.



Figura 3.5. Multirrotor.

Tabla 3.2.

CARACTERÍSTICA	ALA FIJA	MULTIRROTOR
Peso total	3,5 kg	3,5 kg
Carga de pago	1,0 kg	1,0 kg
Autonomía	2 h	40 min
Propulsión	Eléctrica	Eléctrica
Velocidad	50 km/h	40 km/h
Despegue	Catapulta	Vertical
Aterrizaje	En panza o paracaídas	Vertical
Máximo viento	15 m/s	10 m/s

Agustín EZCURRA TALEGÓN y Lorenzo DÍAZ DE APODACA

Universidad País Vasco - Airestudio Geoinformation Technologies, S. Coop.

4.1. Introduccion

La calidad del aire y su control ha sido y es, desde hace ya mucho tiempo, una preocupación constante tanto de la administración como de la ciudadanía debido a los efectos dañinos que los contaminantes atmosféricos producen en la salud de las personas, en el vigor biológico de los entornos naturales así como en las estructuras exteriores de edificios y construcciones de toda índole.

Los instrumentos utilizados para llevar a cabo el seguimiento y control medio ambiental de la calidad de nuestra atmósfera han sido tradicionalmente embarcados en diferentes vectores de observación tales como aviones o globos. A esta forma de observar se le ha sumado desde siempre la instalación en superficie de redes de medida donde se combina la vigilancia meteorológica clásica con la medida de los niveles de contaminación de tal suerte que ya casi la mayoría de las grandes ciudades del mundo entero, e incluso muchos de los complejos industriales intensivos tales como son las centrales nucleares o las grandes industrias químicas, tienen sus propias redes de observación que en algunos casos transmiten de manera abierta a todo el público los datos medidos, sea a través de una conexión Internet, o a través de **apps** de telefonía móvil inteligente.

Una importante división que hay que hacer en los procesos de contaminación atmosférica es aquella que se deriva de la forma como estos se producen. Así, podemos distinguir entre los impactos episódicos ligados a accidentes que pueden acaecer en complejos industriales o durante el transporte de materiales de alto riesgo, y aquella contaminación que está ligada a fuentes fijas que emiten de manera continuada. En el caso de la contaminación episódica se exige una forma particular de medición determinada tanto por las sustancias emitidas así como por el tipo de acciones posibles a tomar durante la gestión del episodio en cuestión y que usualmente están destinadas a minimizar lo máximo posible sus posibles impactos negativos. Por otro lado las emisiones producidas de manera continua y cuyo principal foco es en el momento actual las emisiones automovilísticas, presentan unos contaminantes muy específicos cuyos niveles máximos permitidos de concentración en el aire están regulados por ley. Sin duda alguna en cualquier de estos dos problemas ambientales el uso de vehículos aéreos teledirigidos o autopilotados equipados con instrumentación específica tienen una gran aplicación práctica que en principio podría si no sustituirla del todo, si sumarse a la observación tradicional que ya se realiza mediante aviones, globos y redes superficiales de vigilancia de la contaminación atmosférica.

4.2. Control de la calidad del aire mediante drones: sensores ambientales de nueva generación

Obviamente el control de la calidad del aire mediante el uso de *DRONES* consiste en la capacidad de instalar en un dron los instrumentos de medida de la contaminación atmosférica que sean requeridos para la observación que se pretenda llevar a cabo.

En el caso de la contaminación de origen automovilístico los contaminantes que hay que medir serían básicamente; los óxidos de nitrógeno, el ozono y las partículas de polvo y humo en suspensión. Los automóviles emiten óxidos de nitrógeno y partículas de humo negro. El primero de estos contaminantes (los óxidos de nitrógeno) va a ir produciendo (y también destruyendo) a través de una reacción fotoquímica el ozono, ozono que como consecuencia va a presentar generalmente un ciclo diario de variación exhibiendo un pico máximo hacia el mediodía. El conjunto de reacciones asociadas a este proceso producen también como resultado lo que se conoce como «*smog fotoquímico*» un tipo particular de partículas que quedan en suspensión en la atmósfera y que se suman a las emitidas directamente por los automóviles. El ozono producido con este tipo de emisiones va a rellenar la parte baja de la troposfera y va a ser transportado a gran distancia impactando en lugares muy distantes de las ciudades donde fue producido. Este ozono generado en las emisiones automovilísticas nada tiene que ver con el ozono producido en la estratosfera por la acción de la radiación solar ultravioleta y que es el ozono que nos protege de los efectos dañinos de dicha radiación. El ozono es un gas de efecto invernadero que tiene además un fuerte carácter oxidante que afecta a los pulmones y las cutículas de las hojas de muchas especies vegetales.

Las dos tecnologías actualmente más extendidas que se emplean para medir el ozono son:

- La medida en el ultravioleta
- La medida electroquímica en célula líquida

La primera es la técnica más empleada en la instrumentación usada en redes de vigilancia superficiales y en aviones. Mientras que la segunda es la más empleada en los sondeos mediante globos cautivos, globos libres de volumen constante y globos libres de ascenso vertical. En estos dos últimos casos las sondas utilizadas se pierden tras cada medida. La Fig. 4.1 presenta una imagen de estos dos tipos de sensores.

Cada uno de estos dispositivos tiene sus ventajas e inconvenientes a la hora de ser aplicados a la realización del control de la calidad del aire embarcado en un dron. Así señalaremos que el primero pesa del orden de 2 kg y requiere 12 voltios de alimentación continua, mientras que el segundo es una sonda de muy poco peso (de orden de 200 g) pero que debe ser calibrada y preparado adecuadamente cada vez que se va a emplear.

El protocolo habitualmente seguido para llevar a cabo una medida de la contaminación atmosférica parte de dos ideas muy concretas:

- La atmósfera tiene una capacidad dispersiva muy alta que se suma al transporte producido por el empuje del viento. Como consecuencia los contaminantes atmosféricos

cos que se han generado cerca del suelo terminan por rellenar la parte baja de la troposfera, entre 1 a 2 km de altura sobre el suelo, y además van a ser transportados hasta distancias que en un solo día pueden llegar a ser del orden de los 200 km desde su foco de emisión.

- Los contaminantes atmosféricos variarán su concentración a lo largo del tiempo debido no sólo a la variación de la intensidad de sus emisiones si no más particularmente debido a su carácter reactivo, siendo así que en el seno de las burbujas de aire se irán produciendo variaciones continuas de sus concentraciones como consecuencia de los procesos de destrucción o formación de los mismos ligados a las reacciones fotoquímicas que se pueden producir en su seno.



Sonda de Ozono VAISALA con Radiosonda RS92-SGP



Dual Beam Ozone Monitor 2B Technologies

Figura 4.1. Imagen de los dos tipos de sensores más usados para realizar el control de calidad atmosférica. A la izquierda una sonda electroquímica de medida del ozono y a la derecha un medidor en el ultravioleta.

Bajo esta perspectiva la medida de la contaminación atmosférica exige el sondeo continuo de un volumen atmosférico del orden de 1 km de altura y 100 x 100 km² de extensión horizontal durante períodos de tiempo que suelen cubrir al menos medio día completo

Como ejemplo de este tipo de procedimiento de actuación se presenta en la Fig. 4.2 dos imágenes de instrumentación embarcada en un globo de volumen constante (izquierda de la imagen) y en avión ultraligero (derecha de la imagen) para el control de la calidad del aire. Estas imágenes son de dos campañas diferentes de medida de contaminación que se centraron en dos problemas simples relacionado con los procesos de contaminación. La primera campaña tenía por objeto medir la velocidad de producción/destrucción de ozono en el seno de la atmósfera en la zona de Marsella (Francia) y la segunda determinar la estructura vertical de la concentración de ozono en la vertical de una zona de topografía compleja del Pirineo español. En el primer caso, los globos realizaron un recorrido libre en la atmósfera empujados por el viento a un nivel atmosférico isopícnico constante y efectuando una medida de la concentración de ozono mediante sonda electroquímica Vaisala. En este caso los datos de concentración de ozono, más los datos meteorológicos y de posición, son enviados vía radio a una estación fija donde son archivados para ser posteriormente procesados. La sonda no se recupera ya que se finalmente se pierde la señal GPS de

localización del globo. Un ejemplo de los resultados obtenidos con este tipo de medidas se presenta en la Fig. 4.3.

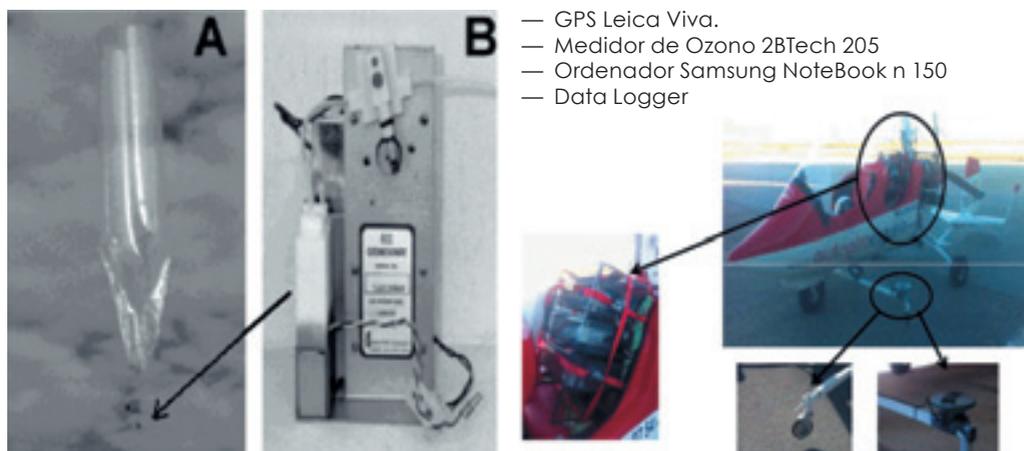


Figura 4.2. Imagen de los dos tipos de sondas descritos en el texto y colocados en un globo de volumen constante a la izquierda y en un autogiro a la derecha.

En el segundo caso se embarcó en un autogiro un sistema de medida de ozono junto con un sistema de posicionamiento GPS y un «data logger» que incluía la captura de datos meteorológicos. El autogiro volaba ascendiendo y descendiendo entre la cota 500 m ASL y 1.500 m ASL desde las 8 UTC hasta las 14 UTC. De esta manera, y tras post-procesar los datos GPS, se consiguieron mediciones de alta resolución de la baja atmósfera con precisiones de localización por debajo de 1 m. Un ejemplo de los resultados obtenidos se presenta en la Fig. 4.4.

Al objeto de poder trasladar este tipo de procedimientos de medida a un sistema basado en drones debemos ser capaces de poder embarcar la instrumentación requerida en estos vehículos aéreos autopilotados de tal suerte que seamos capaces de conseguir las medidas en los rangos espaciales y temporales exigidos a este tipo de observación.

Con este objetivo la mayoría de utilizadores de drones para el control de la calidad del aire se están centrados en la posible aplicación de lo que se conoce como sensores electrónicos de medida de la concentración de gases. Estos dispositivos, de pequeño peso y volumen, se pueden directamente acoplar a una placa electrónica miniaturizada permitiéndose así la medida digital de la contaminación atmosférica. La reducción de peso y volumen que supone el uso de este tipo de sensores permite que los vehículos a utilizar para la medida ambiental puedan ser capaces de sondear fuertes volúmenes de aire durante largos períodos de tiempo. Su único inconveniente es la facilidad con lo que la medida puede ser perturbada por otras especies químicas diferentes a las que se pretende medir inicialmente por lo que la precisión de la medida no alcanza en el momento presente la de los sistemas más clásicos de observación anteriormente citados.

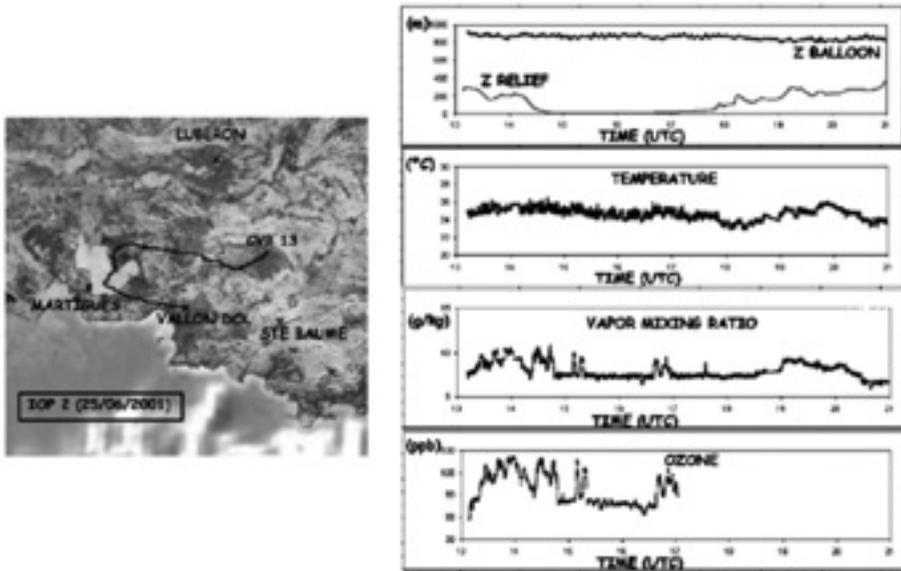


Figura 4.3. Ejemplo de los resultados obtenidos de la medida de ozono con un globo de volumen constante.

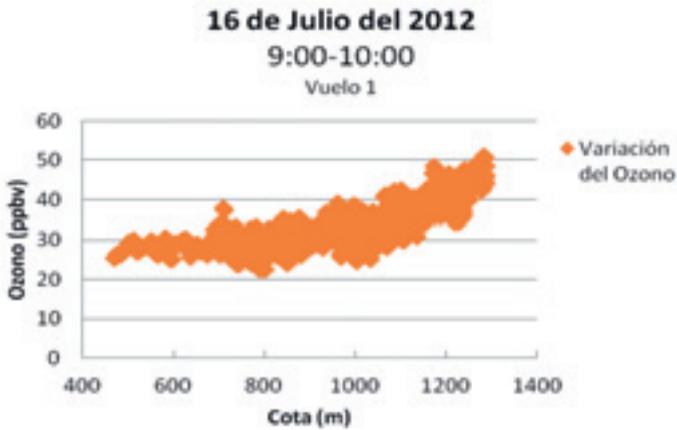


Figura 4.4. Ejemplo de los resultados de la medida de ozono con autogiro en el Pirineo.

En estos sensores de nueva generación, la medida se basa en la determinación de la corriente que se establece entre dos electrodos cuando el gas a medir reacciona con el electrodo de trabajo. Estos dispositivos contienen una membrana porosa, normalmente PTFE o un sistema capilar, que permite al gas difundirse en el interior de su celda. Su configuración varía según los fabricantes y según el gas a medir. Cuando el gas entra en contacto con el electrodo sensible se crea una corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo que hace variar la diferencia de potencial entre ambos. Esta variación de la señal eléctrica se mide y amplifica siendo proporcional a la concentración del gas presente, Fig. 4.5.

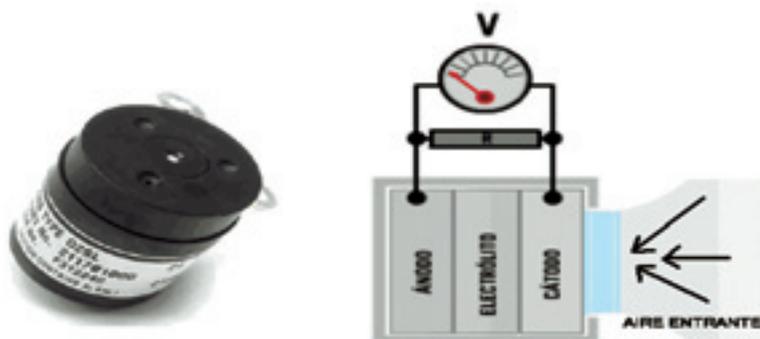


Figura 4.5. Sensores electrónicos de contaminación y su fundamento básico de funcionamiento.

La empresa Airstudio (<http://www.airstudio.es>) y la Universidad del País Vasco están colaborando al objeto de desarrollar una tecnología propia de medida de la contaminación atmosférica mediante vehículos terrestres y aéreos. Dentro de este proyecto de investigación ya se ha dado por completada la primera fase del mismo cuyo objetivo era la puesta a punto de un instrumento autónomo y móvil de medida de la contaminación atmosférica.

Este instrumento móvil de medida de la contaminación atmosférica ejecuta además la medida de varias variables meteorológicas tal como presión, temperatura y humedad y lleva así mismo incorporado un GPS y una tarjeta SD que permite geolocalizar y archivar las medidas llevadas a cabo.

En la Fig. 6 se presenta una imagen de los resultados de las pruebas llevadas a cabo con un primer prototipo del sensor desarrollado que se montó en un automóvil con el que se realizaron varios recorridos en la ciudad de Vitoria. El contaminante medido en este caso era el CO. Este contaminante es un gas emitido por los automóviles y que tiene una incidencia relevante en las reacciones fotoquímicas de producción de ozono en el seno de las atmósferas urbanas.



Figura 4.6. Ejemplo de los resultados de medida llevada a cabo mediante el dispositivo móvil desarrollado por Airstudio y la Universidad del País Vasco para la medida geolocalizada de la contaminación de CO. A la izquierda los niveles relativos de medida de contaminación y a la derecha el dispositivo de medida colocado en el vehículo.

Este mismo sistema compactado para su instalación en un cuadricóptero pudo ser empleado para sondear la concentración de NO_2 de la parte baja de la atmósfera en una zona de montaña. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 4.7. Los datos presentados representan los valores medios de la concentración de NO_2 observados a diferentes alturas.

Tanto en el caso anterior como en este último los resultados no están calibrados y es preciso recordar que este tipo de sensores electrónicos necesitan ser calibrados para poder validar sus medidas y su rango de error.

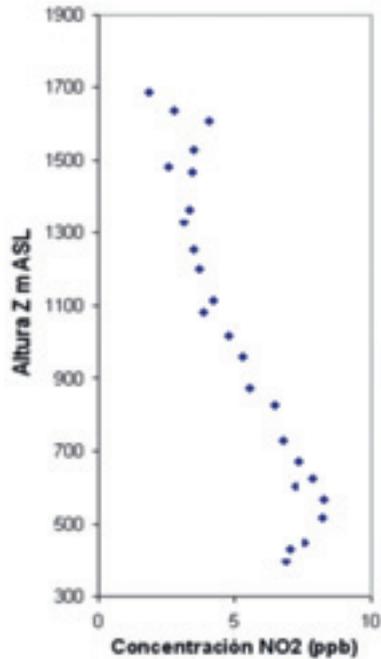


Figura 4.7. Ejemplo de resultados de la medida de la concentración de NO_2 mediante un dispositivo electrónico miniaturizado embarcado en dron (a la izquierda de la imagen).

4.3. Conclusiones

Los nuevos sensores electrónicos de medida de la concentración de gases contaminantes permiten el desarrollo de equipos miniaturizados de medida que pueden ser embarcados en drones o en cualquier otro sistema móvil. Este nuevo tipo de dispositivos, aunque no son tan precisos y sensibles como lo son los que tradicionalmente se han venido usando para estos menesteres, permitirían hacer observaciones continuas mediante drones de la contaminación atmosférica en diferentes entornos con los rangos espaciales y temporales requeridos. En el momento presente las sondas de medida deben ser específicamente desarrolladas para los fines requeridos siendo posiblemente una de las mejores soluciones el construir una minisonda autónoma que geolocalice la medida de la contaminación y la guarde en una memoria junto con los datos de presión, temperatura y humedad. Las medidas llevadas a cabo con estos sistemas deben ser ajustadas y calibradas adecuadamente para que sus resultados puedan ser validados.

David SAEZ PAREDES y Ana M.ª BELTRÁN NOGUERA

UAV Blackbird, S.L.

5.1. Introducción

La cartografía es una técnica que interpreta, analiza y representa gráficamente parte o todo de la superficie de un astro. Desde antiguo se ha elaborado la cartografía del terreno para simplificar los elementos que en él intervienen. Pero hoy en día se ha incrementado la demanda y disponibilidad de los datos espaciales por lo que se hace necesaria la obtención de datos a una escala de tiempo y espacio reducida. Los instrumentos utilizados para representar la cartografía han pasado del papel a la cartografía digital, propiciado por una mejora de la tecnología. Los Sistemas Aéreos Remóticamente Pilotados (RPAS en sus siglas en inglés) popularmente conocidos como drones, en los últimos años, se han convertido en unas herramientas de obtención de información muy útil y eficaz que ahorra tiempo, reduce los costes y genera resultados muy satisfactorios. Los datos espaciales adquiridos serán la base de los diversos procesos que servirán para elaborar la cartografía deseada.

Para el manejo de los datos y la elaboración de la cartografía se utilizan tres tipos de programas:

- Los programas orientados al **Diseño Asistido por Ordenador (CAD)**, que son herramientas de diseño capaces de generar dibujos 2D y modelados 3D, que se basan en entidades geométricas vectoriales como líneas, puntos, arcos y polígonos.
- Los programas de **Sistemas de Información Geográfica**, permiten combinar y relacionar diferentes elementos georeferenciados en el espacio.
- Programas para **Teledetección** que además de captar imágenes aéreas georeferenciadas permiten recoger imágenes de diferentes bandas del espectro electromagnético. Esto quiere decir que se obtiene información de la superficie que a simple vista no se podría captar ya que nuestros ojos solo permiten ver el espectro visible. Dependiendo del procesamiento informático que se haga en cada una de las bandas espectrales se mostrarán unos elementos u otros.

Una herramienta básica para elaborar la cartografía es la **fotogrametría**. Esta permite medir sobre fotografías con las que se puede determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Si se trabaja con una foto se puede obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si se trabaja con dos fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), se podrá tener visión estereoscópica, o dicho de otro modo,

información tridimensional. Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición.

La **fotointerpretación** es otra herramienta muy útil para realizar la cartografía de un área, ya que permite determinar los elementos que intervienen en el terreno. Para ello es necesario realizar un trabajo de campo para tener claro cuáles son los objetos y elementos que se desean cartografiar, descartando aquellos que provocan confusión en el resultado final.

La tecnología **GNSS** (*Global Navigation Satellite System*), cuyo sistema más conocido, que no el único, es el **GPS** (*Global Positioning System*) permite determinar las coordenadas de cualquier punto de la superficie terrestre con gran precisión. Este sistema tiene una importancia bastante significativa en lo que concierne a la cartografía, para poder localizar de una forma precisa los elementos que se pretenden digitalizar y no cometer errores en cuanto a la posición de estos en el espacio.

5.2. Obtención de datos

Las nuevas herramientas tecnológicas permiten obtener datos con una resolución temporal reducida y con una alta resolución espacial, tanto de fotografías como de puntos. El proceso de obtención de los datos pasa a ser desde el proceso de imágenes planas 2D a imágenes en 3D. Para ello se utiliza la técnica de la estereoscopia.

Las imágenes tomadas desde un RPAS son subortogonales, ya que rara vez son totalmente ortogonales, y de hecho no es necesario que lo sean, ni tampoco se busca como objetivo. La precisión de los GPS de abordo son de varios metros (incluso 10 - 20 m), por lo que las precisiones de centímetros del trabajo final han de obtenerse mediante puntos de control en el terreno. Estos puntos de control deben de repartirse homogéneamente sobre el territorio objeto de estudio, para obtener el mínimo error posible, además de realizar un reconocimiento del terreno para identificar las formas y elementos característicos del territorio.

La elección de la escala es fundamental. La escala apropiada será la que permita ver todos los elementos deseados claramente. Aun así, a la hora de realizar el vuelo, la altura del dispositivo no debe de ser muy elevada, siendo siempre por debajo de los 120 m para poder operar dentro del margen de la legalidad conforme a la normativa en vigor en España para el uso de RPAS. Dependiendo de los objetivos que se quieran alcanzar, la captura de fotografías puede ser desde cámaras digitales convencionales, con una focal fija o una cámara multiespectral que capte la radiación en otras bandas del espectro electromagnético. Todas deben de cumplir con una calibración de fábrica que por cuestiones de humedad y temperatura pueden variar.

Otro punto importante en la toma de datos son las condiciones atmosféricas, las cuales afectan en gran medida ya que puede provocar errores en la captación de los datos. Por ello es fundamental la formación de los pilotos de RPAS y en los manuales de los operadores de RPAS disponer de procedimientos de vuelo condicionados a la meteorología. Es necesario recordar que los RPAS son equipos de unos pocos kg de peso que son muy vulnerables a los vientos y condiciones meteorológicas. Una climatología adversa aparte

de poder provocar un fallo de seguridad en el vuelo con consecuencias poco predecibles, puede provocar cambios de posición de la RPAS pudiendo variar la posición de disparo de la fotografía que podría alterar el resultado llegando a hacerlo técnicamente incorrecto.

Es importante a la hora de realizar el vuelo, seguir las indicaciones del manual del operador donde se indican las calibraciones y comprobaciones necesarias de todos los sistemas, con el fin de minimizar los errores y asegurar la calidad de los resultados.

Algunos de los errores intrínsecos de la tecnología de uso de los RPAS en aplicaciones cartográficas solamente pueden ser corregidas mediante el uso de puntos de control en tierra, de coordenadas conocidas. Algunos de estos puntos se utilizan para calibración, y otros para comprobación de resultados.

5.3. Proceso de gabinete

Una vez recogidos los datos se exportan a software especializados capaces de realizar procesamientos fotogramétricos y el posterior tratamiento de estos, creando una nube de puntos con coordenadas x, y, z, un modelo digital del terreno y composición de una ortoimagen georeferenciada. Existen programas como Photoscan o Pix 4D que se encargan de generar un modelo con el conjunto de los datos obtenidos. Para procesar los datos, previamente debe de conocerse el sistema de coordenadas que se ha utilizado en el proceso de captación de datos, y de forma muy recomendable la posición de cada una de las fotografías que se incorporen al proceso. Si las coordenadas son locales se deberá configurar previamente el *software* para no producir deformaciones en los resultados.

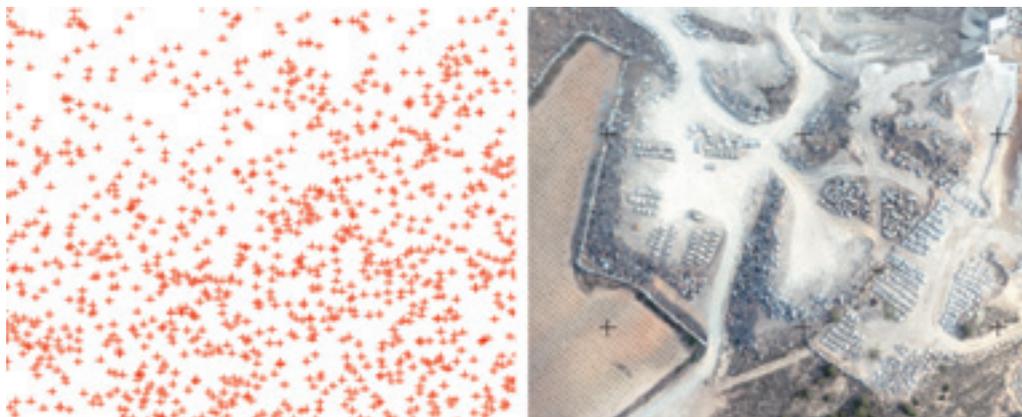


Figura 5.1. Nube de puntos y ortoimagen en alta resolución espacial.

El conjunto de los registros con las coordenadas x, y, z, se denomina nube de puntos. Según la resolución con la que se quiera trabajar se puede crear una nube de puntos más o menos densa. Cuantos más puntos, mayor información y mayor detalle, cuanto menos puntos menor resolución espacial. Esta nube de puntos permite realizar superficies y con ello analizar el terreno. Las superficies se crean a partir de un método de triangulación

que genera el modelo digital de superficie (DSM por sus siglas en inglés), y mediante técnicas de filtrado y algoritmos de programación, el modelo digital del terreno (DTM por sus siglas en inglés), que pueden ser modificados por el usuario según su finalidad. Por último, la ortofotografía georeferenciada se crea a partir de la unión de numerosas fotografías creando un mosaico, conociendo sus coordenadas x e y en el espacio.

Una vez generados estos modelos, se exportan a un programa software para modelar, analizar o diseñar. Para este cometido, existen unos software especializados de diseño asistido como Autocad o Microstation, y software de Sistemas de Información Geográfica como ArcGIS, Quantum GIS, o Global Mapper entre otros, aunque existen otros muchos capaces de realizar el mismo trabajo.

Los software de diseño asistido por ordenador están orientados a la creación y edición de objetos. A partir de la nube de puntos se puede crear una superficie (DTM) pudiendo tomar diferentes estilos ya sea como curvas de nivel, modelo de elevaciones o modelo de la pendiente. Además se pueden configurar los estilos siguiendo los intervalos que desee el usuario. Para una mejor observación se puede cargar la ortoimagen anteriormente generada, lo que facilita el proceso de levantamiento cartográfico. De esta manera, además, se puede ver qué área se ha cartografiado. Si dentro de esta se encuentran objetos como edificios o árboles que no se quieren representar y que no han sido eliminados por el algoritmo de paso de DSM a DTM, se puede modificar la estructura de la nube de puntos y por consiguiente la superficie.

El proceso de tratamiento de la nube de puntos mediante algunos de los software comerciales de topografía, obliga al uso de líneas de rotura, líneas de contorno, ejes, etc.. Las líneas de rotura son una herramienta imprescindible para forzar de forma manual ángulos en el terreno que es necesario indicar al algoritmo de triangulación del software para una adecuada representación del modelo final. De forma natural, los algoritmos de programación no toman esa ruptura de la pendiente por lo que estas líneas permiten modificar trazos forzando la dirección de la línea. Como se puede observar en la Fig. 5.2, las curvas de nivel han cambiado, en este caso concreto por la disposición de un talud.

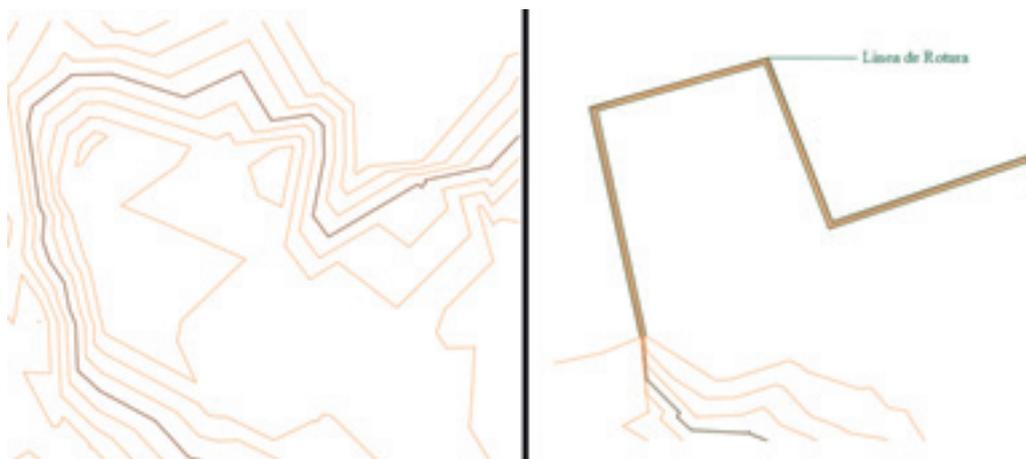


Figura 5.2. Superficie original generada a partir de la nube de puntos y superficie modificada mediante el uso de líneas de rotura.

Por otro lado, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) manipulan, analizan, gestionan y almacenan datos vinculados al espacio. Consiste en relacionar información georeferenciada en formato digital y herramientas informáticas para su análisis con unos objetivos concretos. La cartografía es una de las disciplinas más utilizadas en los SIG ya que estos se representan en un espacio con un sistema de coordenadas obtenido a partir de un sistema de proyección. Los programas SIG son la herramienta necesaria para manejar la información geográfica, combinando información gráfica y alfanumérica. ArcGIS es uno de los *softwares* informáticos que se utiliza para dicho trabajo.

De forma muy sencilla, existen dos formatos de representación de la información espacial en la estructura de almacenamiento de un SIG; el formato vectorial y el formato ráster. El formato vectorial define un objeto gráfico a través de sus límites o fronteras con el exterior, mediante unos ejes de coordenadas. La información se representa por medio de segmentos orientados de rectas o vectores formando diferentes tipos de entidades como puntos, líneas o polígonos. Por otro lado, el formato ráster consiste en la división del espacio en una red de celdas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdas representa una unidad de información que se denomina píxel. Los píxeles están asociados a un único valor de una variable determinada que hace referencia a un identificador. La elección del tipo de formato a utilizar va a depender del tipo de estudio a realizar, al *software* de trabajo que se emplee y sobre todo al tipo de análisis que se quiere llevar a cabo.

Para realizar un análisis espacial existen una serie de procedimientos que permiten realizar cálculos entre las diferentes variables siendo su resultado la obtención de nuevos datos. Los procedimientos más habituales son las áreas de influencia, la superposición de otras capas de información, el modelo digital de elevaciones, el modelo digital del terreno o los análisis de vecindad, entre otros.

También mediante la teledetección se puede realizar un análisis de la superficie terrestre y de los elementos que en él intervienen. Esta herramienta permite extraer información en toda la gama del espectro electromagnético: ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, que a simple vista no se podría ver. Con la imagen capturada multiespectral se identificarán los objetos de la superficie mediante la reflectividad de estos, respecto a diferentes longitudes de onda. Cada objeto, ya sea un suelo, vegetación o agua, se comportará de una forma diferente, hecho que le permitirá ser distinguido del resto. Estos programas permiten elaborar una cartografía de detalle orientada a diferentes campos que a simple vista no se podría ver como la geología y la geomorfología del terreno, el uso del suelo, el estado de la vegetación, etc..

5.4. Resultados finales

La cartografía es el único procedimiento gráfico que permite una representación del espacio geográfico mediante la escala y los sistemas de proyección. Los resultados se representan en Mapas y Planos en función de la escala a la que se representen, siendo los mapas una interpretación gráfica simplificada de la realidad. Ya se ha indicado que los formatos en los que se puede procesar la información son diversos, desde formato vectorial (puntos, líneas o polígonos), formato ráster u ortoimágenes, todos en ellos en dos dimensiones. Pero también se puede visualizar la información en una tercera di-

mensión, mediante la creación de modelos 3D. Toda representación gráfica debe ir acompañada de escala, sistemas de coordenadas y leyenda de los elementos que aparecen en el área cartografiada.

Una de las características que más ha evolucionado en los últimos tiempos en los modelos Digitales del Terreno, es la posibilidad de realizar modelos 3D interactivos asociados a formatos estándares como PDF's, o ficheros .kmz de *Google Earth* que permiten interactuar con el terreno. El empleo de RPAS ha reducido el coste de estas actualizaciones, permitiendo acercar al usuario final una actualización interactiva muy sencilla y totalmente actualizada de los terrenos que se vuelan con estos sistemas.

Asociado a lo anterior, se pueden realizar vídeos virtuales a vista de pájaro del terreno. Estos vídeos se pueden exportar a formatos estándar en cualquier caso.

Por supuesto, no cabe duda que la presentación clásica por excelencia y que a día de hoy mantiene totalmente su vigencia es la representación de un plano de curvas de nivel con la toponimia correspondiente.

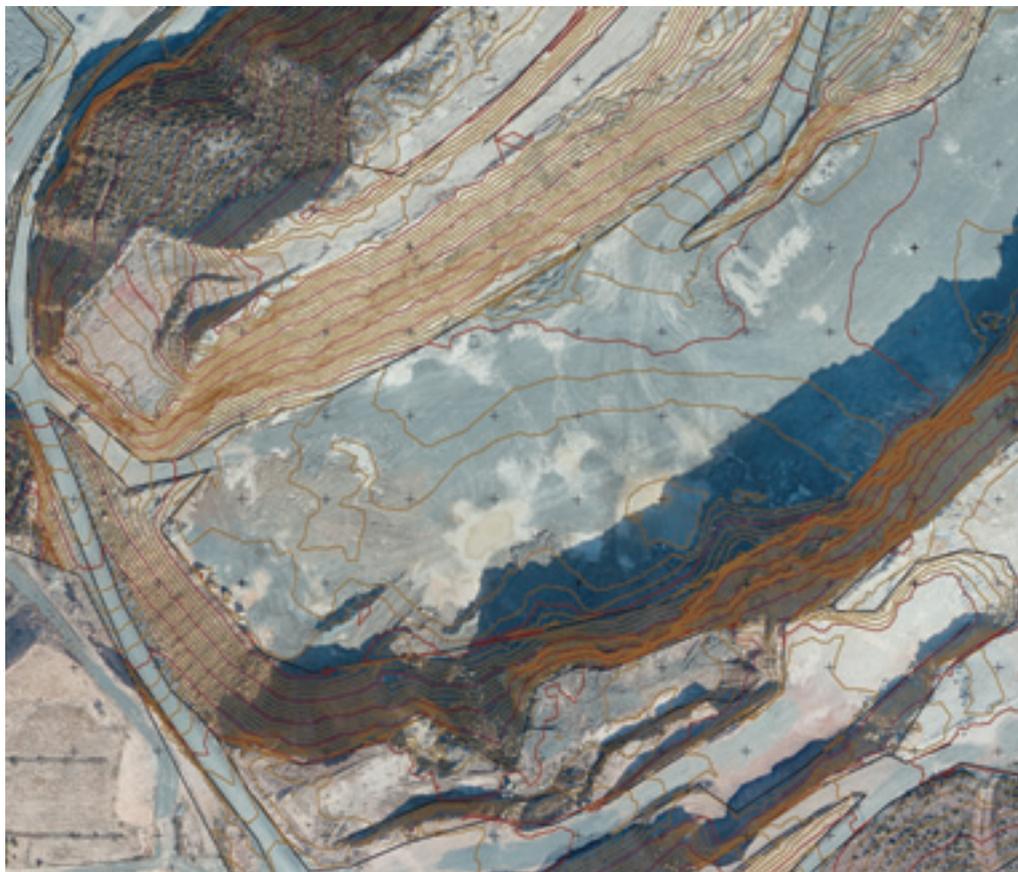


Figura 5.3. Composición cartográfica por capas 3D (ortoimagen, curvas de nivel y DTM a diferentes alturas) (Fuente: UAV Blackbird S.L.).

5.5. Aplicaciones adicionales

La superficie creada, modificada o no, permite generar una cartografía que representa la realidad de una manera simplificada. Existen numerosas aplicaciones orientadas a diferentes disciplinas. Esta representación cartográfica irá orientada a la hidrografía, la vegetación, la topografía y la planimetría suponiendo el estudio exhaustivo de la población, las comunicaciones, las actividades industriales, etc.. El Modelo Digital de Elevaciones servirá de base para la realización de muchos mapas.

Modelo Digital de Elevaciones (o Modelo Digital de Superficie) y Modelo Digital del Terreno

Estos modelos se crean a partir de una nube de puntos generada y procesada en el software del procesamiento fotogramétrico, correspondiendo cada punto a unas coordenadas x, y, z. Luego se transfieren los datos a un programa de diseño asistido por ordenador (CAD) que es capaz de georeferenciar.

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) representa, mediante una capa ráster, el relieve de la superficie tal y como se encuentra teniendo en cuenta las infraestructuras, edificaciones, vegetación, etc.. Mientras que el Modelo Digital del Terreno (MDT) solo representa la superficie del relieve sin contar con las actuaciones antrópicas. Por ello se debe de trabajar con la superficie y eliminar o modificar aquellos puntos en los que toman objetos como árboles, edificios, etc.. Existen 3 maneras para representar estos modelos para simplificar información:

- Las **curvas de nivel** son líneas que unen puntos con la misma altura siendo los intervalos generalmente constantes.
- Otro sistema es el de las **redes irregulares de triangulación**. Se crea a partir de la triangulación de un conjunto de vértices que forman una red de vectores conectados. Este método de representación ralentiza el proceso y no aporta mucho a la hora de analizar el terreno.
- Por último, también se puede representar con formato **ráster**. Este formato es más cómodo ya que permite visualizar las diferentes altitudes en diferentes gamas de color.

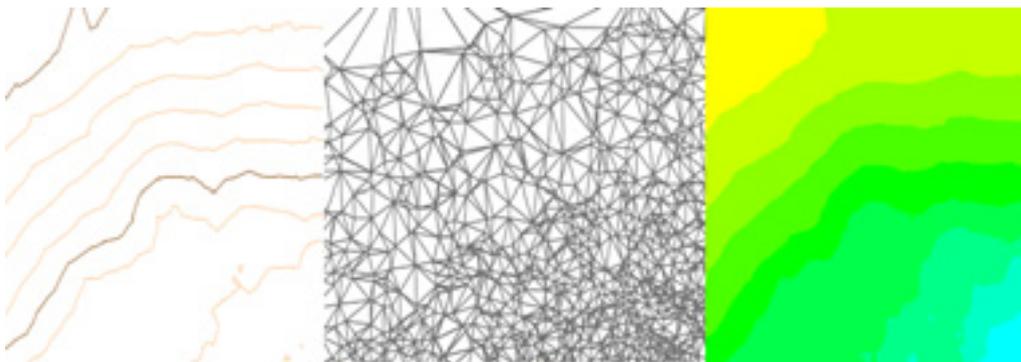


Figura 5.4. Diferentes métodos de representación de un MDE y un MDT: Curvas de nivel, red de triangulación y ráster.

Estos modelos, además de aportar la altitud de cada punto, contienen información que puede ser útil a la hora de analizar el terreno. Esta información se obtiene a partir del cálculo de diferentes variables a partir de procesamientos de álgebra de mapas, como puede ser la pendiente, la orientación, la curvatura, la rugosidad, la visibilidad o la dirección del flujo.

Mapa topográfico

Este modelo de representación cartográfica debe contener el MDT para, posteriormente, obtener las curvas de nivel, base de este tipo de representación. Los intervalos de cada línea deben de ser constantes y pudiéndose configurar según lo desee el usuario, además de añadir etiquetas y modificar el color de las curvas de nivel. Para una mejor visualización puede añadirse sombreados teniendo en cuenta la orientación de la superficie. Junto al relieve, un mapa topográfico también incorpora otra información muy variada, como son las redes hidrográficas, las obras civiles, edificaciones y demás elementos humanos, todo ello representado por medio de símbolos y signos.

El mapa topográfico es un elemento dinámico que cambia constantemente en el tiempo por lo que es necesario modernizarlo continuamente.

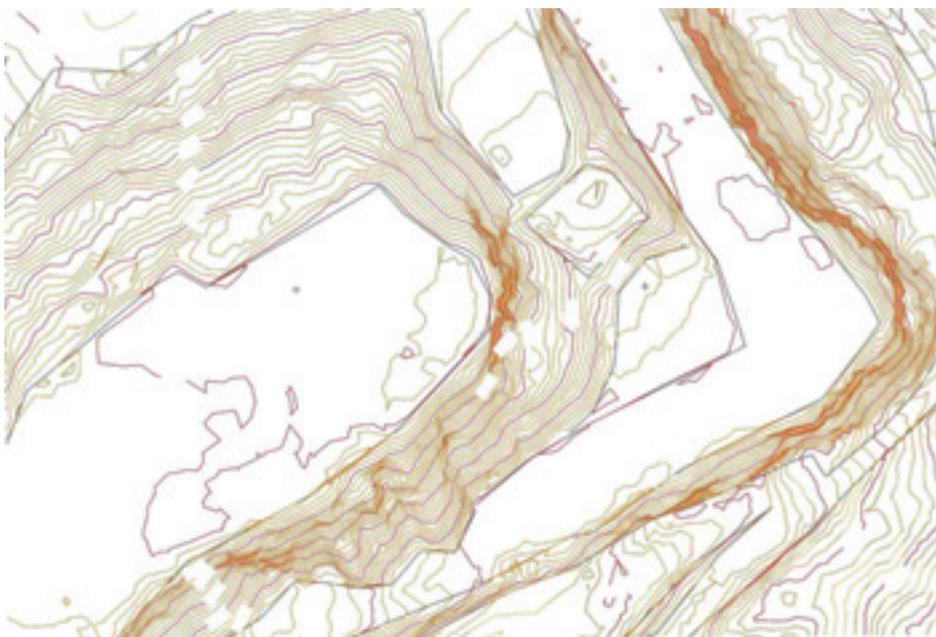


Figura 5.5. Fracción de plano topográfico de curvas de nivel de una explotación Minera.

Usos del suelo

Existen numerosas fuentes, como el *Corine Land Cover* o el SIOSE, en las que vienen representados los usos del suelo, pero estos tienen una resolución espacial muy baja por lo que no se puede obtener detalles que podrían servir para efectuar un estudio.

Una vez obtenida la orografía del terreno y la ortoimagen georeferenciada mediante el método básico de fotointerpretación o de teledetección, se pueden identificar los diferentes usos del suelo conociendo previamente el terreno. Los programas SIG permiten delimitar y representar estos usos del suelo de manera gráfica y sencilla. La fotointerpretación es un método más tradicional en el que la percepción de la superficie es la que se representa, por ello es necesario identificar los elementos que en él intervienen para no cometer ningún tipo de error. Por otro lado, el proceso de teledetección es más complejo, ya que requiere que la fotografía aérea realizada también pueda obtener imágenes multispectrales para que mediante el procesamiento de las imágenes, se identifique de forma automática los diferentes elementos que existen en el territorio y poder representarlos de forma fiable.

Además, cada tipo de suelo, puede ser analizado y tratado a una resolución espacial y temporal mínima gracias a los RPAS, teniendo en cuenta los objetivos que se pretendan alcanzar. Por ejemplo, podemos tratar temas relacionados con la agricultura, el medio ambiente, el urbanismo, la población o las actividades industriales.

- La cartografía que se está realizando dentro del sector de la agricultura se centra en la obtención de mapas de aprovechamiento de plantaciones así como el estado de las plantaciones. También se utilizan para control de volúmenes de tierras en nivelaciones de parcelas.
- En temas medioambientales la cartografía se convierte en un elemento clave a la hora de realizar estudios de impacto, ya que permite identificar y delimitar áreas. Por ejemplo, la distribución de especies invasoras en el espacio o la repercusión que puede sufrir un área contaminada teniendo en cuenta la cartografía ya elaborada de mapas geológicos, mapas de escorrentías etc.
- En el ámbito forestal se utiliza para conocer el estado de la vegetación, la previsión y control en caso de incendios o la distribución de especies en el terreno.
- En cuanto al sector urbanístico y de la población se puede estudiar el comportamiento de la red urbana o la elaboración o actualización de la cartografía catastral.
- También es necesario para las actividades mineras que son explotadas a cielo abierto, ya que permite elaborar levantamientos topográficos a una escala de tiempo pequeña y con una resolución espacial centimétrica, pudiendo calcular el volumen de material extraído, los residuos generados, cubicajes o perfiles.

5.6. Conclusiones

En definitiva, el uso de los RPAS (drones) contribuye a la obtención de datos espaciales en un periodo corto de tiempo y con una alta resolución espacial a un coste reducido. Anteriormente a su aparición, todo dependía de la disponibilidad de los satélites, de aviones tripulados o de la cartografía realizada a pie de campo.

Hoy en día las aplicaciones de los RPAS para cartografía son múltiples abarcando diversos campos del conocimiento; el medio ambiente, la agricultura, las actividades industriales, el urbanismo, etc., aunque es importante destacar que a nivel normativo, y hasta la fecha, únicamente se pueden realizar operaciones con RPAS en espacio aéreo no controlado, y fuera de núcleos de población, por lo que esta es una de las restricciones

de uso que —de momento— limitará el uso de estos sistemas. Esta limitación, unida a la obligatoriedad de operar con condiciones de vuelo VFR (*Visual Flight Rules*), es decir, con meteorología de visibilidad determinada, son los condicionantes más importantes de cara a las limitaciones de uso en aplicaciones cartográficas con RPAS.

De cualquier forma, a modo de conclusión, a pesar de los condicionantes indicados, el empleo de esta tecnología supone más ventajas que inconvenientes en el resultado final, lo que unido a la reducción de costes que tendrá a medio plazo, hará de ella una tecnología por la que apostar para las Aplicaciones Cartográficas.

Carlos LÓPEZ JIMENO*Dr. Ingeniero de Minas***Domingo A. MARTÍN SÁNCHEZ***Ldo. Cc Geológicas**Universidad Politécnica de Madrid - E.T.S.I de Minas y Energía*

6.1. Introducción

Las actividades extractivas de los minerales y de los hidrocarburos que se encuentran en el subsuelo requieren una serie de trabajos, primero, de prospección para localizar los yacimientos y, posteriormente, de exploración y de investigación, para conocer la morfología de éstos y las características o propiedades de los mismos. En una fase posterior se llevará a cabo la explotación o extracción de los minerales aprovechables para su posterior transformación hasta conseguir productos vendibles.



Figura 6.1. Dron sobrevolando una explotación de áridos (*Silent Falcon™*).

En este capítulo se describen someramente las aplicaciones que tienen actualmente las aeronaves no tripuladas o UAV (*Unmanned Air Vehicles*) al sector de la minería, en sus diferentes fases de desarrollo. En algunos casos sólo se citarán dichas aplicaciones, pues son objeto de descripción en otros capítulos de esta publicación.

6.2. Ventajas de los UAV en la prospección y explotación de recursos mineros

En términos generales, la prospección geofísica aérea presenta las siguientes ventajas de utilización:

- Son métodos geofísicos no intrusivos que no provocan impactos o daños medioambientales.
- Una gran multitud de tipos de datos pueden ser recopilados de una manera rápida y de forma económica.
- Es posible cubrir grandes áreas, reduciéndose significativamente los costes de prospección de grandes superficies.
- No son necesarios los accesos terrestres ni los permisos de ocupación.
- No se precisa la apertura de pocillos o calicatas en el campo y, consecuentemente, los permisos o licencias correspondientes.
- Los datos pueden ser recopilados de áreas remotas, accidentadas y con cobertura vegetal densa.

Por otro lado, las ventajas que ofrecen los UAV al sector que se dedica al aprovechamiento de los recursos minerales se pueden resumir, de acuerdo con Barnard, en las siguientes:

- Los UAV pueden permanecer en vuelo hasta 30 horas. Este tiempo excede con mucho a la duración de los vuelos de las aeronaves tripuladas, ya que los tiempos que se consideran razonables para que los pilotos mantengan la concentración rondan las cinco horas.
- Los UAV pueden sobrevolar regiones hostiles, en las que existe un riesgo real para la vida de los pilotos:
 - En las zonas próximas a condiciones meteorológicas adversas.
 - En las zonas con fuertes influencia humana (Conflictos bélicos, contaminación, superpoblación y en general riesgo antrópico)
 - En zonas con riesgos naturales o zonas catastróficas
- Los UAV siempre vuelan con instrumentación, usando sistemas de navegación avanzada, tales como GPS y un altímetro basado en escaneado láser, en combinación con un control por ordenador, pudiendo:
 - Efectuar un escaneado preciso de una región.
 - Volar de noche, teniendo la ventaja de sufrir menos interferencias con las actividades diurnas y el ruido habitual (tales como señales de radio, señales de telefonía móvil, etc.).
 - Volar de noche y a cotas muy bajas (como por ejemplo a unos 20 metros sobre la superficie del terreno) para mejorar la resolución de los datos.
- Los UAV tienen un tamaño significativamente menor que las aeronaves tripuladas, por lo que las interferencias sobre los parámetros de la corteza terrestre que pretenden ser medidos serán menores, tales como los campos magnéticos o gravitacionales.
- El coste de los estudios realizados con UAV por kilómetro de alineación sobrevolada es menor, ya que:

- El UAV con una capacidad de carga típica de 9 kg es mucho más barato que una aeronave tripulada (avioneta o helicóptero).
- Los UAV tienen costes de operación inferiores:
 - Un operador de UAV puede controlar varios de estos equipos al mismo tiempo;
 - Un UAV consume una cantidad de combustible menor al 20% de la que consume un aeronave convencional (dependiendo de la carga transportada).
 - Un pequeño UAV puede tomar tierra en una superficie plana de dimensiones más reducidas que la que precisa una aeronave convencional.

Como consecuencia de los menores costes de operación, un UAV puede sobrevolar varias veces una zona a prospectar de manera que se obtenga un gran volumen de datos, o bien la variación de los mismos con el tiempo, o incluso obtener con aplicaciones informáticas avanzadas modelos tridimensionales de los campos magnéticos y gravitacionales provocados por los yacimientos minerales que pudieran existir en el subsuelo.

- Los UAV son ambientalmente más sostenibles, ya que:
 - Requieren menos materiales para su fabricación.
 - Consumen menos combustible por cada km sobrevolado.
 - Provoca menos contaminación por cada km volado.
 - Genera menos ruido en vuelo.
 - Es más fácil su reutilización al final de su vida útil.

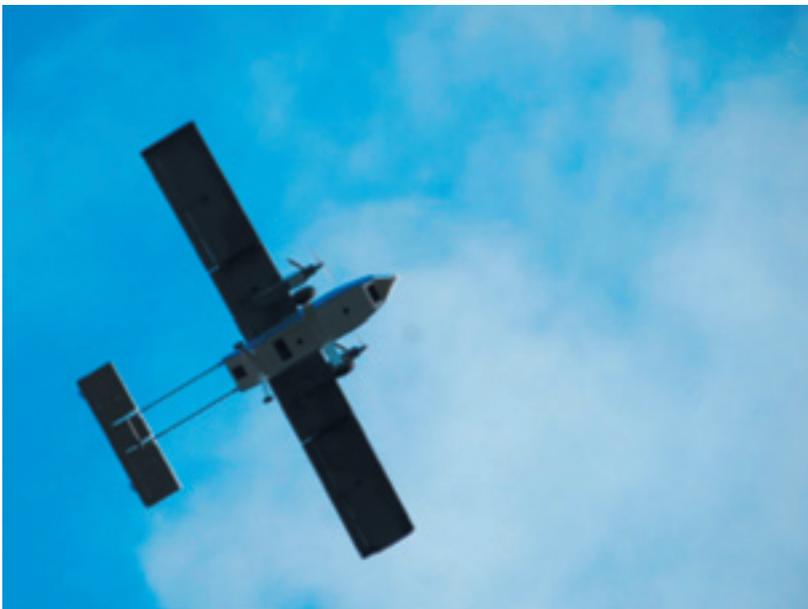


Figura 6.2. Aeronave no tripulada dedicada a la exploración y explotación minera.

6.3. Aplicaciones de los UAV a la Prospección, exploración y explotación de recursos mineros

Las actividades extractivas tienen, en general, tres etapas, que podrían denominarse genéricamente de riesgo como la prospección y exploración y de negocio donde encontramos la fase de explotación. La prospección comprende la búsqueda del yacimiento, la exploración es su descubrimiento, la determinación de la cantidad y calidad de los minerales que alberga, y el estudio de viabilidad de la explotación. Se denomina de riesgo por el dinero y el tiempo invertido por la empresa que nadie garantiza que pueda ser recuperado. Solamente, si el estudio de viabilidad es positivo se lleva a cabo el proyecto, pasando así a la etapa de producción, también denominada de negocio minero o explotación.

La prospección, como se ha dicho, consiste en la búsqueda de yacimientos, pudiendo hacerse con diferentes técnicas: recopilación de antecedentes históricos, fotografías aéreas e imágenes de satélites, prospección geológica mediante trabajos de campo, observaciones directas y toma de muestras, análisis y ensayos de laboratorio, prospección geoquímica, detección de anomalías geoquímicas, prospección geofísica, magnetometría, gravimetría, radiometría, etc.

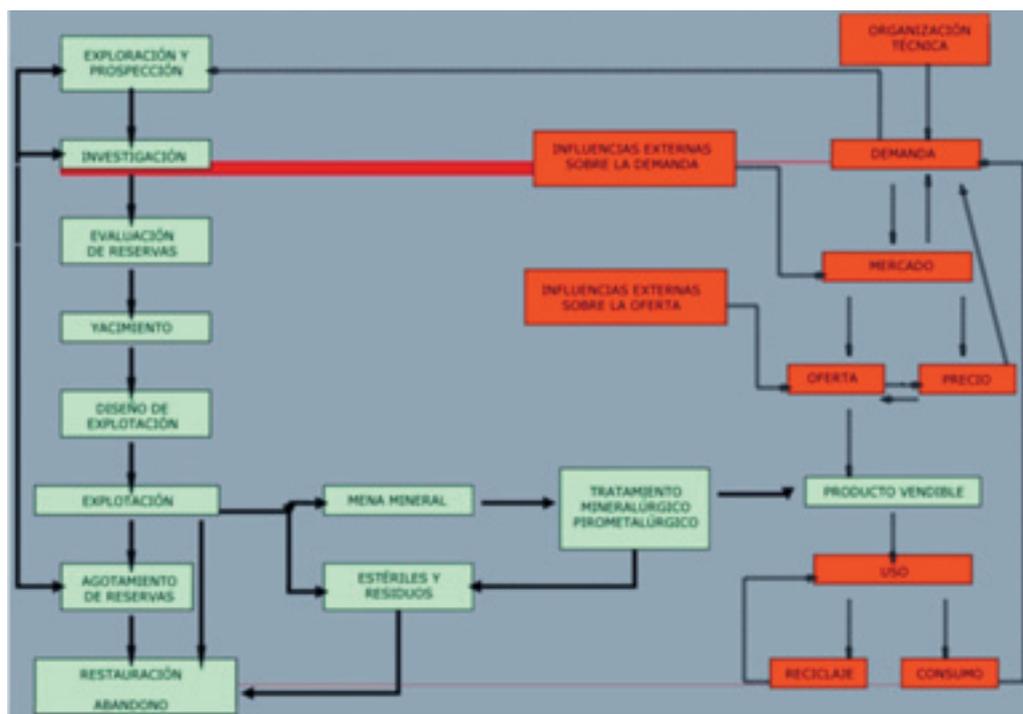


Figura 6.3. Desarrollo de un proyecto minero.

Una vez descubierto un cuerpo mineral, es necesario delimitar su forma y determinar su tamaño y la calidad de los minerales que lo componen. Para estos fines se lleva a cabo

la exploración o investigación, cuyo objetivo es evaluar cualitativa y cuantitativamente los recursos geológicos para definir la viabilidad técnico-económica de la explotación de un yacimiento.

Esta etapa se puede llevar a cabo desde la superficie mediante la realización de calicatas o pocillos y mediante labores subterráneas mediante pozos profundos y galerías de reconocimiento que buscan definir el cuerpo mineralizado en sus tres dimensiones, además de obtener muestras para conocer las calidades de los diferentes minerales. Muchas de esas labores se sustituyen por sondeos, tanto si son con recuperación de testigos, como si se realizan con circulación inversa y recuperación de detritus.

Con toda la información obtenida se modelizará el yacimiento y se evaluarán las reservas geológicas, para a continuación proceder al diseño geométrico de la explotación, tanto si es subterránea como a cielo abierto.

Volviendo a la etapa de prospección, la Geofísica es una rama de la Física Aplicada que se ocupa del estudio de las estructuras ocultas del interior de la Tierra y de la localización en esta de cuerpos delimitados por el contraste de alguna de sus propiedades físicas con las del medio circundante, por medio de observaciones realizadas en la superficie de la Tierra.

Los estudios suelen basarse en la medición de los efectos producidos por distintos campos físicos, tales como los gravitacionales, magnéticos, sísmicos, electromagnéticos u otros.

Los contrastes o anomalías de las propiedades físicas del terreno bajo estudio son la clave para lograr la información requerida, y a diferencia de otras ciencias, la geofísica suele usar métodos no invasivos para obtener sus datos, pudiendo ser aéreos, terrestres, satelitales y marinos.

En la Tabla 6.1 se reflejan las posibles áreas de aplicación de las principales técnicas geofísicas, tanto aéreas como terrestres, a diferentes tipos de yacimientos de minerales, diferenciando entre la prospección directa de los yacimientos y la prospección geológico-regional y estructural.

Si bien existen muchas técnicas geofísicas posibles de aplicar, cada una de ellas, normalmente, tiene ciertas aplicaciones para las cuales fueron especialmente desarrolladas y en donde se obtienen los mejores resultados.

El éxito de una campaña geofísica dependerá en gran medida de la técnica seleccionada para la aplicación, la metodología empleada en y la interpretación de los resultados.

Tabla 6.1. Aplicabilidad de los métodos geofísicos a la prospección de yacimientos mineros.

MÉTODO GEOFÍSICO	AÉREO O TERRESTRE	APLICACIÓN	DIAMANTES	ORO EN VETAS	YACIMIENTOS EN VMS	YACIMIENTOS DE Pb- Zn MVT	YACIMIENTOS SEDEX	YACIMIENTOS DE PORFIDOS CUPRIFEROS	YACIMIENTOS DE URANIO	YACIMIENTOS DEL TIPO PRESA OLÍMPICA	YACIMIENTO DE NI-CU-PGES MAGNETICO
MAGNÉTICO	Aéreo	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Terrestre	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ELECTROMAGNÉTICO	Aéreo	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Terrestre	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ELECTRICO	Terrestre	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
GRAVIMÉTRICO	Aéreo	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Terrestre	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
RADIOMÉTRICO	Aéreo	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Terrestre	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SÍSMICO	Terrestre	Marco geológico	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Búsqueda directa	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Aplicabilidad cualitativa del método geofísico:

Altamente efectivo ● Moderadamente efectivo ● Generalmente no efectivo ●

Con respecto a este último punto, cabe destacar que los fenómenos geofísicos tienen una base teórica que suele involucrar desarrollos matemáticos relativamente complejos, y que en general presentan muchas soluciones posibles; este hecho hace que las interpretaciones basadas exclusivamente en modelizaciones elaboradas por programas informáticos presenten a veces importantes errores conceptuales y a menudo no tengan relación alguna con la geología del terreno investigado (la mejor solución matemática no siempre es la que representa mejor la realidad).

Además de la experiencia del personal que intervenga en los trabajos de prospección se debe contar con algoritmos de interpretación y la interacción de dichos expertos geofísicos con los programas de interpretación automática.

La forma más eficiente de minimizar errores en la interpretación es la utilización de más de una técnica Geofísica

A continuación se describen someramente algunas de las técnicas geofísicas que se suelen utilizar durante la prospección de yacimientos:

• Magnetometría aérea

El campo magnético de la tierra puede ser alterado por la presencia de materiales magnetizables que se encuentren en las cercanías de la superficie del subsuelo, destacándose la magnetita, que normalmente está asociada a yacimientos de hierro.

Las medidas del campo magnético es el método geofísico más empleado y el más económico. Estas prospecciones se pueden realizar en forma terrestre o aérea.

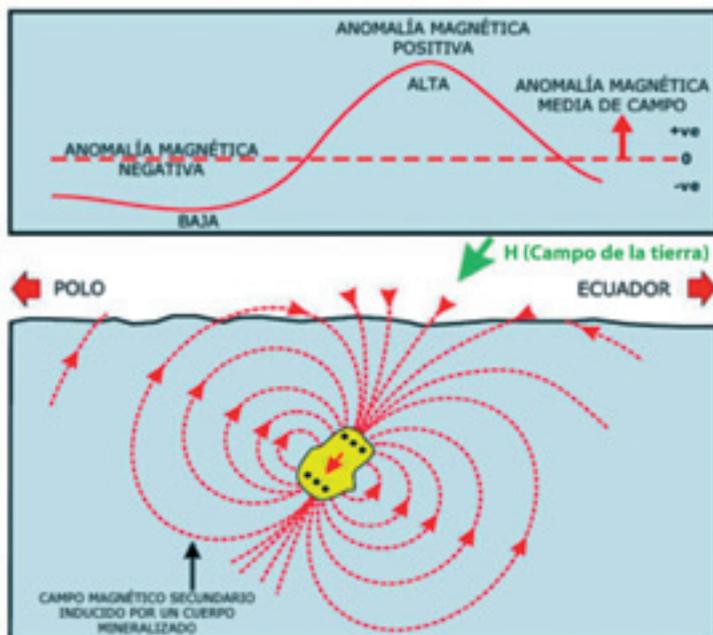


Figura 6.4. Anomalías magnéticas provocadas por un yacimiento de hierro.

Sin embargo, dicho campo también se ve afectado por otros factores como las mareas lunares y solares, tormentas solares y fenómenos de tipo meteorológico.

Por ello, junto con las mediciones de campo se requiere de la medición simultánea del campo magnético en un punto fijo denominado estación base, que registrará las variaciones del magnetismo terrestre mientras se efectúen los trabajos.

Después de efectuar estas compensaciones, se obtendrá un mapa magnético del sector cuyas variaciones o anomalías representarán las zonas de interés.

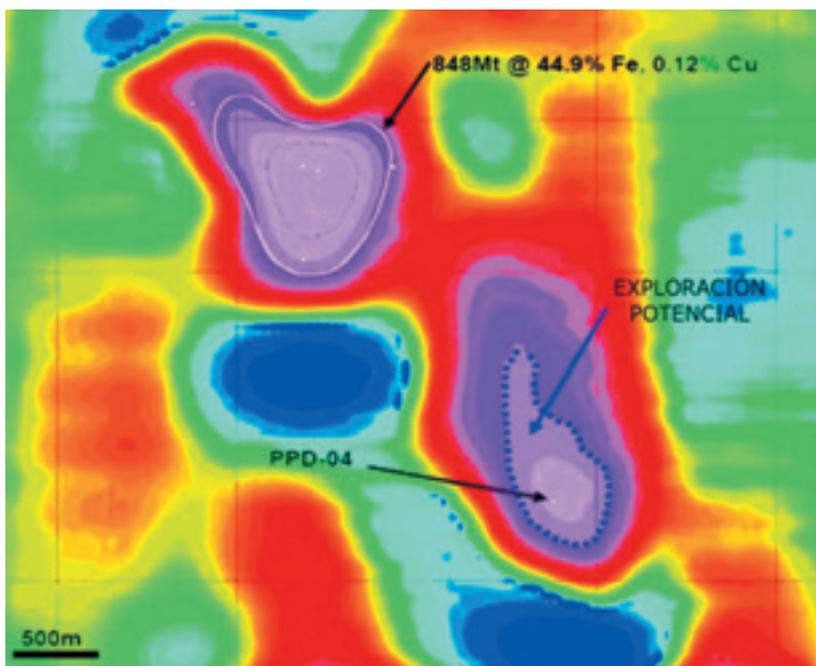


Figura 6.5. Resultados de un trabajo de prospección magnetométrico en un yacimiento polimetálico (Yacimiento de hierro Pampa de Pongo, Perú).

La medida de los campos magnéticos son efectuadas con diferentes tipos de magnetómetros: magnetómetros con saturación de núcleo (magnetómetro Fluxgate), magnetómetros Protón, magnetómetros de célula de absorción.

• Gravimetría aérea

El método gravimétrico consiste en la realización de medidas de alta precisión de los cambios de los valores de la gravedad, que son motivadas por las diferencias de la densidad de los materiales de la corteza terrestre.

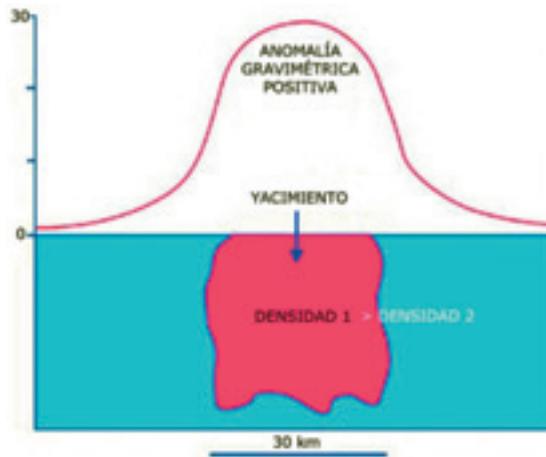


Figura 6.6. Anomalía gravimétrica provocada por un cambio de la densidad de los materiales del subsuelo.

Las diferencias de densidad pueden ser empleadas para la localización de las rocas siguientes:

- Rocas sólidas o duras y rocas sueltas o blandas.
- Rocas ácidas, básicas y ultrabásicas.
- Rocas densas y porosas.
- Rocas anhidras y saturadas.
- Minerales, etc.

En proyectos de ingeniería minera y medioambientales, suelen tener un amplio campo de aplicación, en dentro de los cuales destacan:

- Cartografía de cavidades cársticas bajo la superficie.
- Cartografía de basamentos rocosos.
- Cartografía de regiones con potencial de amplificación de tensiones (por ejemplo, irregularidades en zonas de fallas).
- Cartografía de regiones con potencial de debilidad (por ejemplo, paleo-grietas, fallas, etc.).
- Cartografía de rellenos.
- Determinación de la densidad (saturación de agua, porosidad) de las características topográficas.

Estas investigaciones solo son posibles cuando las variaciones de la masa (densidad) y los volúmenes de anomalías son lo suficientemente grandes como para producir la medición de campos anómalos. Sin embargo, las variaciones de la densidad en las zonas de interés tienden a ser menores y confinadas a volúmenes limitados, por lo que las anomalías gravitacionales resultantes son pequeños comparadas con los componentes externos (ruidos) producidos por fuentes no geológicas.

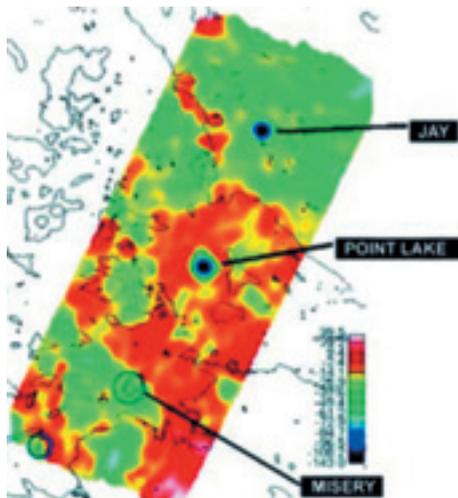


Figura 6.7. Imagen resultante de la campaña geofísica de un yacimiento de kimberlitas mediante gravimetría aérea.

• Electromagnetismo

Entre los métodos electromagnéticos más utilizados de forma aerotransportados tenemos el método de las dos bobinas en el que se genera un campo electromagnético (EM) primario que induce la zona de estudio.

En el caso de hallarse en el subsuelo un cuerpo con buena conductividad, se producirá un campo EM secundario, que será registrado en la bobina receptora.

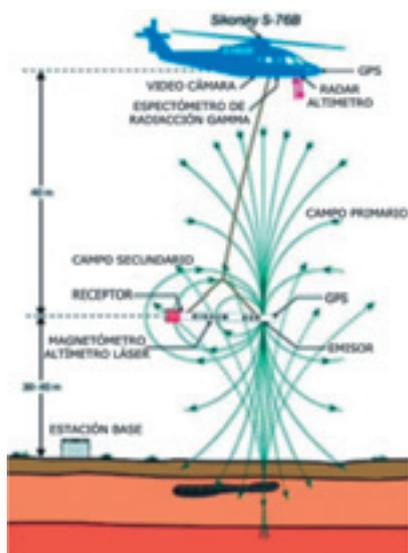


Figura 6.8. Fundamentos de una prospección aérea de electromagnetismo.

Los equipos que se emplean requieren una fuente de energía capaz de generar pulsos de corriente de 4 milisegundos con unas intensidades de hasta 1.000 Amperios. Esto supone que los sistemas actuales tengan un peso, por ejemplo para una bobina de 24 m de diámetro de 250 a 350 kg.

• Radiometría aérea

Con esta técnica se registran los rayos Gamma procedentes de la semidesintegración de elementos radioactivos incluidos en las formaciones geológicas como son el uranio, el torio y el potasio.

• Aplicaciones topográficas

Los requerimientos de información topográfica en las distintas fases de ingeniería -fases conceptuales básicas y constructivas- de los proyectos mineros, tienen soluciones variadas que incluyen vuelos LIDAR, aerofotogrametría y levantamientos topográficos de detalle.

La mejor solución para esta importante necesidad, se ha comprobado que es la obtención de imágenes digitales y puntos coordinados en la superficie con LIDAR y fotografías digitales simultáneas con una densidad ajustada a las necesidades del proyecto.

La gran precisión lograda con esta metodología permite el uso de los datos en las diferentes fases de los proyectos de ingeniería, tanto en la de ingeniería básica como en la de detalle, mientras que la flexibilidad de los formatos y sistemas coordinados permiten su uso bajo diferentes plataformas de desarrollo y explotación.

Las aplicaciones de la topografía se extienden a casi todos los ámbitos de la ingeniería, y de ahí la importancia de contar con una información de alta calidad.



Figura 6.9. Sensor Insitu ScanEagle que integra tres sensores diferentes (John Keller).

En el caso concreto de la minería a cielo abierto, las principales aplicaciones se pueden resumir en: planificación y seguimiento de los trabajos de excavación y vertido de estériles en escombreras, control de los volúmenes de agua embalsados en las presas de residuos, afección a los terrenos próximos por deslizamientos de taludes o hundimientos superficiales provocados por minas subterráneas, cubicación de acopios de productos vendibles, etc.

El levantamiento láser se efectúa mediante el sistema láser aerotransportado LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que consiste en usar un par transmisor-receptor de pulsos láser para hacer un barrido de la superficie del terreno y así registrar la topografía del área bajo estudio. También es posible obtener en forma simultánea fotos digitales y geo-referenciadas, llamadas ortofotos, mediante una cámara fotográfica digital de alta resolución acoplada al sistema.

El LIDAR se monta en un avión especialmente acondicionado, cuya trayectoria estará vinculada con una red de estaciones terrestres dotadas con GPS de alta precisión ubicadas en puntos de coordenadas conocidas. La alta densidad de puntos que se pueden medir con este sistema, junto a la elevada resolución que se puede alcanzar, lo convierten en una poderosa herramienta para los estudios de ingeniería básica y de detalle en los proyectos mineros.

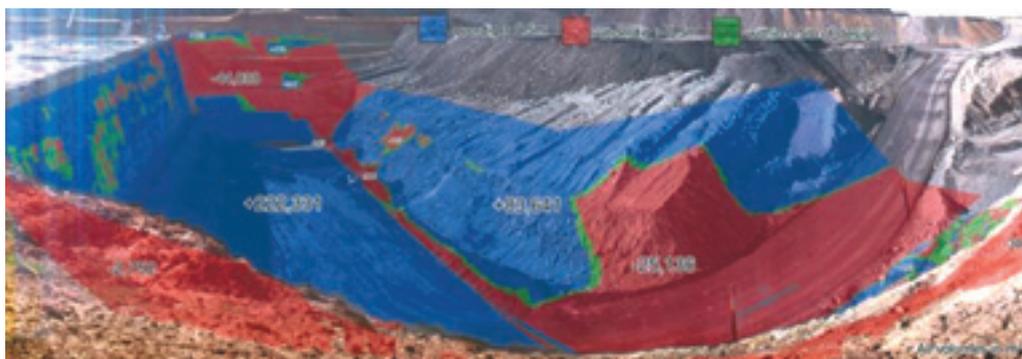


Figura 6.10. Imagen en 3D de una explotación a cielo abierto obtenida con un sistema láser LIDAR.

A diferencia de los métodos convencionales, la información obtenida no depende de fotografías, y por ello no se ve afectada por pendientes abruptas o muy suaves, contrastes de luz y sombra, etc. El procesamiento de la información permite generar planos a distintas escalas, georeferenciación en distintos sistemas coordenados, planimetrías, curvas de nivel, modelos de datos (MTD), delineación de estructuras y construcciones, etc.

Las principales ventajas de esta tecnología frente a los métodos terrestres son la capacidad de cubrir grandes extensiones de terreno en muy poco tiempo, alcanzar lugares de difícil acceso sin riesgo para las personas, complementar la información adquirida con fotografías de alta calidad, y el hecho de que con los datos tomados de un mismo vuelo se pueden generar planos a cualquier escala.

• Otras aplicaciones

Dentro del sector extractivo se encuentra el de la minería de carbón, que en muchas ocasiones requiere del tratamiento y acopio de dicho mineral, con el fin de eliminar ciertas impurezas —cenizas, etc.— o proceder a la mezcla de carbones de diferentes características y posterior expedición.

Las pequeñas cantidades de sulfuros metálicos que contienen, tanto los carbones como los estériles carbonosos producen reacciones exotérmicas que pueden dar lugar a la autocombustión de los materiales apilados, con las consiguientes repercusiones de riesgos e impactos negativos.

El seguimiento del estado de los minerales o estériles depositados puede efectuarse con cámaras termográficas, sensibles a longitudes de ondas de 7,5 a 13 μm y con pesos reducidos, p.e. de 1,4 kg.



Figura 6.11. Aeronave con cámara termográfica e imagen de infrarrojos captada en un acopio de carbón con una zona en autocombustión (FLIR).

Otra aplicación minera consiste en el seguimiento del agua embalsada en las presas de residuos, que es un aspecto relevante de cara a la seguridad de dichas estructuras, así como para la planificación y gestión de los recursos hídricos que se precisan en cada momento.

6.4. Los UAV ideales para la exploración y explotación de recursos minerales

Los sensores que se utilizan en minería, y en concreto en prospección geológico-minera, tienen actualmente unas dimensiones reducidas, por lo que se configuran como instrumentos idóneos para instalarse en los UAV.

En la Tabla 6.2 se recogen algunas características básicas de los sensores que se utilizan más habitualmente en exploración geofísica, así como los precios orientativos de estos.

Tabla 6.2. Ejemplos de sensores empleados con UAV en prospecciones geofísicas aéreas.

	Aeromagnética	Fotográfica	Estéreo CAM y Escaneado LIDAR	Imagen Hiperespectral
Coste por Hora de Vuelo	500 a 200 \$	135 \$	200 \$	1.000 a 2.500 \$
Carga	< 2 kg	2 kg	4 kg	5 kg
Altitud	80 m AGL / 120 m ASL	1.000 m +/- 50 m	400 m +/- 10 m	1.000 m +/- 100 m
Plan de vuelo	Tight-Drape + / -10m	Altitud Fija sobre el terreno	Altitud Fija sobre el terreno	Altitud Fija sobre el terreno
Velocidad	230 kph	120 kph	120 kph	80 kph
Espaciamento entre pasadas	200 m	100 m	400 m	250 m
Datos por hora de vuelo	< 1 MB	~25 GB (para Alta Resolución)	~48 GB (para Alta Resolución)	~1,5 GB (para Baja Resolución)
Lente		Resolución ~1 cm	Resolución ~1 cm	ResHorz < 5 m Baja Resolución
				ResHorz < 1 Alta Resolución
				256 longitudes de onda

Tal como puede verse en la tabla anterior, los magnetómetros de Cesium, tales como el modelo *Scintex CS-3S*, pesan unos 0,82 kg. En el caso de utilizarse cuatro de estos magnetómetros con el fin de mejorar la precisión del cálculo de la estructura tridimensional de los materiales, el peso total ascendería a 3,28 kg.

En lo relativo a la captación de imágenes de alta resolución en 2D y en 3D, se pueden llegar a utilizar en este último caso hasta cinco cámaras, que considerando cada una de ellas con un peso de 1,6 kg daría lugar a una carga total de 8 kg.



Figura 6.12. Modelo de UAV de la empresa CropCam destinado a la captura de imágenes de alta resolución.

Para la creación de los denominados Modelos de Elevación Digitales (MED), mediante escaneado LIDAR, los equipos láser empleados pesan unos 9 kg.

Para el análisis hiperespectral se utilizan normalmente generadores de imágenes de un peso del orden de 6,3 kg, al que se le añade una óptica y electrónica adicional de unos 2,7 kg, lo que da lugar a un peso total de unos 9 kg.

Se puede entonces afirmar que con esta tecnología de sensores, y para las aplicaciones más habituales en prospección geofísica, una carga máxima de unos 9 kg, es el objetivo a usar con los UAV.

Por otro lado, en lo relativo al alcance de los vuelos, suele ser habitual que en una campaña de investigación se cubra un área de unos 400 km², mientras que en una campaña de exploración o prospección se cubren hasta 10.000 km².

En el primer caso se necesitaría efectuar dos vuelos y un total de 1.569 km de líneas, con un espaciamiento entre éstas de unos 200 m, lo cual supondría unas 16,4 horas de vuelo para una velocidad de crucero de 100 Kph.

En el segundo caso, con un espaciamiento entre líneas de unos 400 m, se necesitarían 24 vuelos para hacer un total de 1.560 km en un tiempo de 15,7 horas, para una velocidad de crucero de 100 Kph.

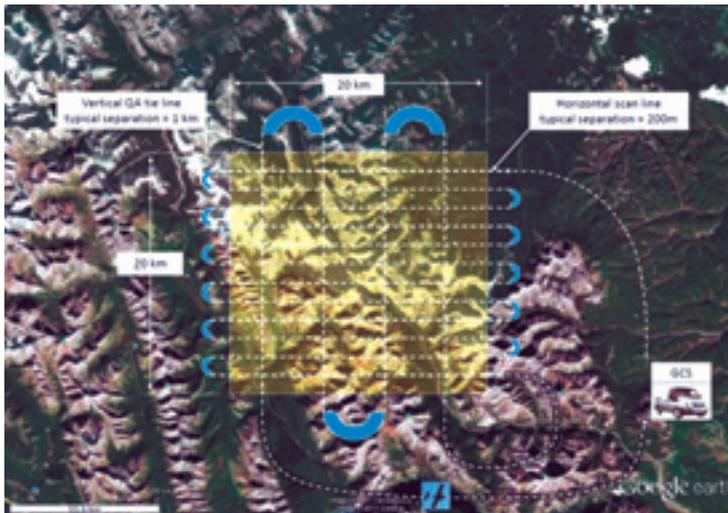


Figura 6.13. Ejemplo de trayectorias de vuelo en una campaña aeromagnética (Barnard, J., 2013).

Es posible afirmar que para estas aplicaciones un UAV con un alcance de unos 1.600 km podría ser adecuado para ambas aplicaciones.

Finalmente, se puede estimar el precio de un UAV si se conoce el peso del sensor a transportar y el alcance, aplicando la siguiente expresión propuesta por Barnard:

$$\text{PRECIO (k\$)} = 0,921 (\text{Carga} \times \text{Alcance})^{0,6}$$

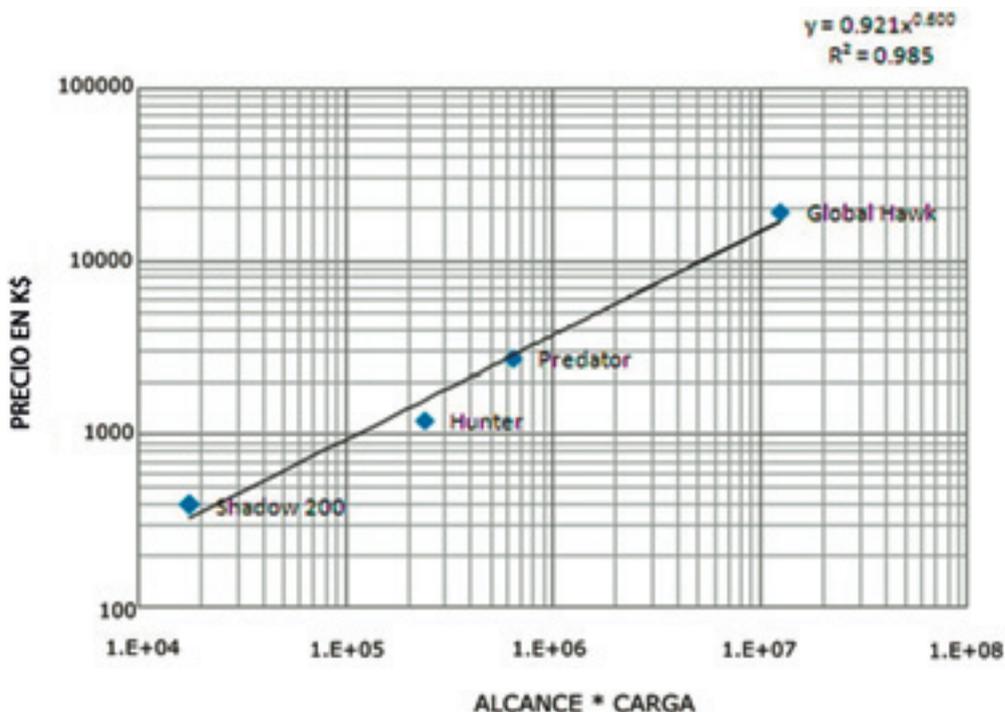


Figura 6.14. Ábaco de cálculo de los precios de los UAV a partir de las características básicas de operación.

6.5. Bibliografía

- ANONIMO (2014): «Flying solo». International Mining. April.
- ATEC-3D (2014): «UAV Mining Surveys».
- BARNARD, J. (2007): «The use of Unmanned Air Vehicles in Exploration and Production activities». Barnard Microsystems Limited.
- BARTLETT, M. y McMAHON, B. (2013): «Practical UAV Applications for Mining and Mineral Exploration». Newmont Mining Corporation.
- DONOHUE, V. (2014): «Identification of UVA Platforms and Payloads for Mineral Exploration and Applications in the Oil and Gas Industry». International Journal of Unmanned Systems Engineering. Vol. 2. N° 3.
- RUIZ DOMINGUEZ, F. (2013): «La importancia de RPAS/UAS para la Unión Europea». Instituto Español de Estudios Avanzados. Documento Opinión.
- SILENT FALCON™ (2013): «Información Técnica».

- THOMSON, S; FOUNTAIN, D. y WATTS, T. (2007): «Airborne Geophysics - Evolution and Revolution». Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration.
- WILLIAMS, W. y HARRIS, M. (2002): «The Challenges of Flight-Testing Unmanned Air Vehicles». Systems Engineering, Test & Evaluation Conference. Sydney. Australia.

Hugo RAMOS CASTRO y José Carlos MONTES NAVARRO*IXION Smart Automation*

7.1. Introducción

El término dron, palabra adoptada en español como sinónimo del término inglés *drone* o zángano, se empezó a utilizar en el mercado militar para designar vehículos aéreos no tripulados. Hoy en día la generalización del término engloba todo tipo de vehículos no tripulados y con el paso del tiempo estas plataformas han dado el salto y se han empezado a extender en todo tipo de aplicaciones civiles.



Figura 7.1. Distintos tipos de drones.

Tanto si se trata de vehículos aéreos, terrestres o submarinos su aplicación se encuentra en continua expansión y no es raro encontrar a diario en los medios de comunicación noticias acerca de nuevas aplicaciones y modelos de negocio generados entorno al uso de un vehículo no tripulado; como es lógico su aplicación se ha extendido también a multitud de campos de la ingeniería civil, entre ellos la hidrología o estudio de las características de las aguas continentales y oceánicas.

Los drones presentan multitud de ventajas que los han convertido en firmes apuestas a sustituir o complementar la actividad del ser humano en multitud de ámbitos. En la mayoría de los casos la ventaja principal es la flexibilidad de uso del recurso que representa el vehículo y la reducción del riesgo para la vida humana, en otras aplicaciones a estas ventajas se suma la simplicidad de uso y la reducción de costes respecto a otras soluciones posibles.

En los siguientes apartados se abordará de forma somera la aplicación de vehículos submarinos no tripulados y vehículos aéreos no tripulados de tipología multi-rotor en el ámbito de la hidrología.

7.2. Aplicación de los vehículos no tripulados en hidrología

Las grandes masas de agua representan un complejo reto tecnológico al mismo tiempo que un medio natural de expansión de la actividad humana. La complejidad de operación y caracterización de estas masas de agua (ya sean continentales u oceánicas) ha frenado hasta no hace muchos años la actividad del hombre en este medio.

Los recientes avances en tecnología de telecomunicaciones y electrónica e ingeniería en general han posibilitado un nuevo modo de acercamiento y conocimiento del medio.

Un reflejo de este aspecto de expansión se puede observar en la creciente instalación y operación de parques eólicos *off-shore* y *near-shore*. Esta instalación refleja una gran complejidad de desarrollo tecnológico por las condiciones de diseño que el océano supone pero al mismo tiempo brinda la oportunidad de explotar el recurso en zonas que anteriormente no se contemplaba esta posibilidad.

Así mismo, fenómenos como el cambio climático o el calentamiento global y la influencia de las grandes masas de agua en estos fenómenos han resaltado la creciente necesidad, no solo de caracterizar y conocer el comportamiento de las grandes masas de agua, si no de generar procesos de evaluación continua del impacto de la actividad del hombre en estas grandes masas de agua.

Entorno a todos los argumentos expuestos en los párrafos anteriores los vehículos no tripulados se están constituyendo como potentes y flexibles herramientas de monitorización y control de estas masas de agua.

La aplicación de vehículos no tripulados a hidrología e hidrografía representa un amplio campo de actuación en el que estas plataformas están ofreciendo servicios diferenciados con gran eficiencia.

7.2.1. Vehículos submarinos no tripulados usados en hidrología

Actualmente se pueden encontrar en el mercado civil varios tipos de vehículos submarinos no tripulados con un elevado potencial de adaptación de carga de pago que posibilita su aplicación a distintos tipos de operaciones.

Dentro de este tipo de plataformas se pueden encontrar las de tipo remotamente operadas (ROV) mediante cable umbilical, las plataformas completamente autónomas (UUV o UAV, dependiendo de la bibliografía) y conceptos híbridos que permiten distintos grados de autonomía y operaciones remotas con umbilical.

Los vehículos tipo ROV poseen la capacidad de operación remota en tiempo real, esto es posible gracias a una conexión de datos y una transmisión de potencia eléctrica establecida mediante el cable umbilical.

Esta conexión mediante umbilical limita el espacio físico de operación al mismo tiempo que posibilita abordar operaciones de alto consumo de potencia.



Figura 7.2. ROV, unidad básica, modulo brazo robótico y estación de operador.

Los vehículos tipo UUV son vehículos con elevada capacidad de movimiento en la columna de agua, pudiendo abordar operaciones que se desarrollen dentro de un marco espacial mayor que el de los ROV, dado que no poseen conexión en tiempo real con la estación de operador, típicamente dependiendo de la zona de operación comunican mediante sistemas de radio frecuencia, GSM o satélite con la estación de operador. Estos vehículos poseen capacidades de operación en el tiempo limitadas por la capacidad de sus baterías.



Figura 7.3. Vehículo autónomo submarino propulsado (programa US-GNR).

Dentro de los UUV se pueden encontrar vehículos híbridos, con capacidad de transmisión de datos y potencia mediante cable para ciertas operaciones; también se puede emplazar dentro de este grupo a los planeadores submarinos que variando su densidad relativa respecto a la masa de agua y combinando esta capacidad con una hidrodinámica específica son capaces de desplazarse a lo largo de grandes distancias en el océano durante largos períodos de tiempo.

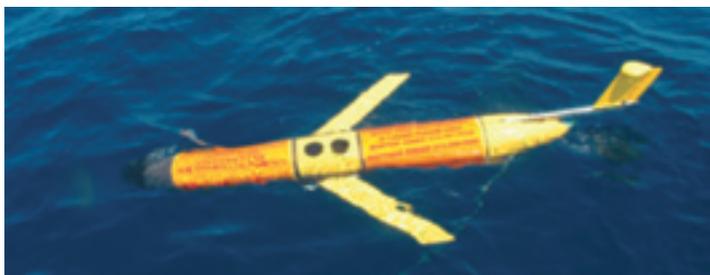


Figura 7.4. Planeador submarino Slocum

7.2.2. Casos de aplicación de los vehículos submarinos no tripulados en hidrología

A continuación se exponen casos de aplicación de vehículos no tripulados submarinos en hidrología, su forma de operar y los objetivos de ésta.

7.2.2.1. Estudio de la calidad del agua, detección y caracterización de contaminantes en las aguas oceánicas y continentales

Mediante la adaptación en la plataforma de sensores capaces de detectar y mediar la concentración de contaminantes en el agua se pueden generar históricos de concentración de estas sustancias y tomar muestras de agua que analizar a posteriori.

Este tipo de operaciones son abordables de forma efectiva por plataformas del tipo UUV y planeadores submarinos y son de aplicación en aguas de pantanos que alimenten las redes hídricas urbanas y zonas de aguas continentales y oceánicas de especial sensibilidad ecológica.

7.2.2.2. Estudio y caracterización de la batimetría de los fondos en aguas continentales y oceánicas

Mediante la fusión de información de sensores de navegación y el uso de tecnología sonar se puede obtener con una resolución espacial aceptable información acerca de las características de los fondos marinos de forma versátil. Estos datos pueden ser de interés estratégico para varias aplicaciones o sectores como por ejemplo el sector de operaciones de instalación de infraestructuras *offshore*, empresas de ingeniería civil que realicen obras portuarias o costeras, empresas que realicen estudios de impacto ambiental y todas las operaciones afines.

Este tipo de aplicaciones es, dependiendo de la extensión del área a estudiar, abordable por vehículos ROV o UUV por igual. Normalmente estas operaciones, cuando se trata de mapear o cartografiar en detalle amplias zonas son realizadas por UUV, y por el contrario, cuando se pretende obtener información detallada de un punto, zona o elemento concreto en el fondo marino se acude a la operación remota con visualización en tiempo real mediante el uso de ROV o plataformas híbridas.

7.2.2.3. Estudio de la composición y dinámica de los sedimentos tanto en lagos y pantanos como en zonas costeras y oceánicas

Mediante la adaptación de sistemas mecánicos.

7.2.2.4. Estudio de las corrientes marinas

Mediante la adaptación de sensores tipo DVL en vehículos se puede medir la velocidad del vehículo respecto al fondo marino al mismo tiempo que respecto a la lámina de agua, de este modo se pueden obtener datos que apoyan y mejoran la precisión de la navegación inercial de la plataforma así como datos al respecto de las corrientes que

están afectando el recorrido de la plataforma. A través de campañas de operaciones se puede establecer la estacionalidad, recorrido y magnitud de las corrientes.

Este tipo de misiones son, dependiendo de su duración en el tiempo, abordadas mediante el uso de UUV o planeadores submarinos. El planeador submarino ofrece una operación mucho más dilatada en el tiempo que el UUV (puede llegar a operar durante más de un mes en el agua) recorriendo mayores distancias; de esta manera cuando se trata de caracterizar las corrientes de zonas determinadas por cortos períodos de tiempo (desde horas hasta como máximo dos o tres días) se acude al uso de UUV propulsados convencionalmente, para operaciones de mayor duración en el tiempo se acude al uso de planeadores submarinos que ofrecen esta posibilidad de forma flexible.

7.2.2.5. Detección de fenómenos geológicos

Mediante un sistema compuesto por un vehículo en superficie o moviéndose en profundidad (pero con la capacidad de emerger) y un dispositivo posicionado en el fondo marino, se pueden detectar fenómenos geológicos como terremotos o erupciones volcánicas submarinas y transmitir la información al respecto de la detección usando como *link* o nexo de unión entre el fondo marino y el sistema satélites o transmisión de datos en superficie un vehículo no tripulado.

Esta aplicación ha sido recientemente realizada en el océano pacífico por un grupo de científicos e investigadores del JAMSTEC (*Japan Agency for Marine-Earth Science Technology*) con el objetivo de detectar *tsunamis* mediante un dispositivo posicionado en el fondo del mar y transmitir la información al respecto de la velocidad, intensidad y dirección del *tsunami* al vehículo autónomo que así mismo en superficie transmite esta información a un centro de control y monitorización en tierra. (http://www.hydro-international.com/news/id7320-Acoustic_Link_for_Realtime_Tsunami_Monitoring_System_in_Japan.html)

7.3. Aplicación de los vehículos aéreos no tripulados de tipología multirotores a la hidrología

Aunque algunos de los sistemas requieren para aplicaciones hidrológicas la incorporación de sensores para análisis, se pueden realizar mediante sistemas aéreos aplicaciones tales como:

- Fotogrametría
- Ortofoto
- Georeferenciación
- Topografía así como estudio de cauces de río, barrancos e inundación de zonas para análisis de desastres

Asimismo se realizan aplicaciones de contaminación mediante sensores embarcados tal como IR o multiespectral, en salidas de aguas residuales de fábricas a cauce de río pudiendo evaluar el impacto medioambiental, y la vigilancia sobre si las industrias poseen un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Salomón MONTESINOS ARANDA

SM GEODIM, S.L.

8.1. Agricultura de precisión y SARP

En el año 2013 se llevó a cabo el estudio «*El impacto económico de la integración del Sistema Aeroespacial No Tripulado en la economía de EE. UU.*» (AUVSI, 2013).

Este estudio recoge que de los múltiples usos de los SARP en el Sistema Aeroespacial de Estados Unidos (NAS, *National Airspace System*), los mercados civiles más prometedores son los de Agricultura de precisión y Seguridad Pública. Entre los dos, representan el 90% de los mercados potenciales conocidos para los SARP.

Este mismo estudio destaca que cada año que se retrasa la integración de los SARP en el NAS, los Estados Unidos pierden más de 10.000 millones de dólares en impacto económico. Lo que se traduce en una pérdida potencial de 27,6 millones de dólares al día.

En este capítulo se describen cuáles son las aplicaciones potenciales de los SARP en Agricultura de precisión, así como las ventajas e inconvenientes de esta plataforma de trabajo y los retos a los que se enfrenta para convertirse en una aplicación operativa con el impacto económico que se le supone.

La Agricultura de precisión es un concepto agronómico que consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola.

Para caracterizar esta variabilidad se utilizan herramientas tecnológicas como los Sistemas de Posicionamiento Global, conocidos popularmente como GPS, sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales obtenidas a partir de satélites, aviones o SARP Fig. 8.1.

Los datos captados por todos estos sensores se almacenan digitalmente en forma de tablas y mapas, a partir de los cuales se genera la información que ayuda al agricultor en la toma de decisiones en campo (fertilización, podas o aclareos).

El objetivo último de la Agricultura de precisión es la obtención de mayores rendimientos económicos, medioambientales y sociales, aumentando la competitividad a través de una mayor eficacia en las prácticas agrícolas.

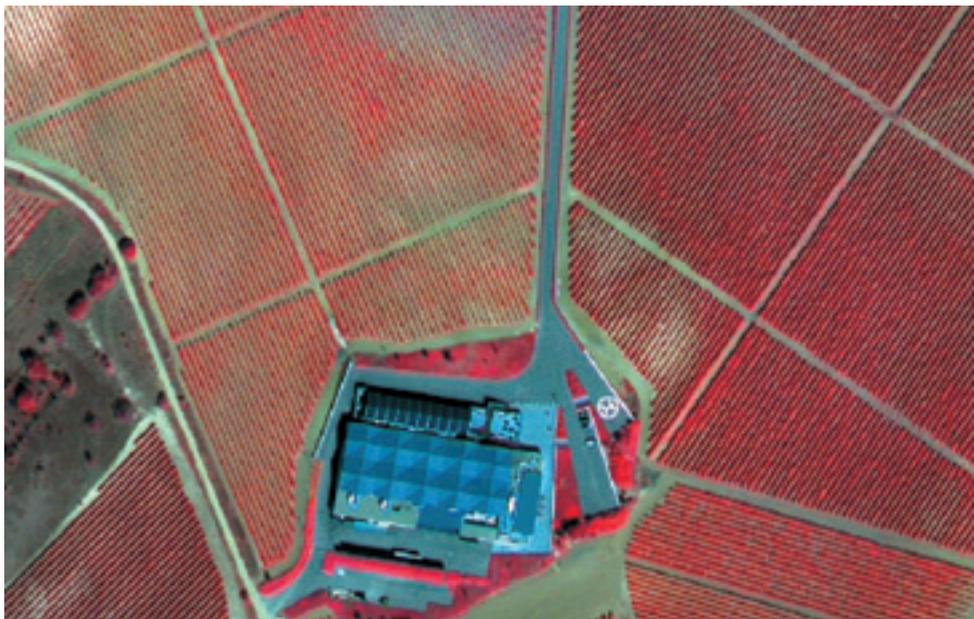


Figura 8.1. Imagen multiespectral en infrarrojo de una explotación vitícola. La observación de la realidad en rangos del espectro más allá de la región del visible nos permite captar la variabilidad existente en la finca.

Los SARP son vehículos aéreos no tripulados y remotamente pilotados, bien sean en forma de pequeños aviones de ala fija o de multicópteros.

En la literatura es fácil encontrar expresiones como: «*los UAV son capaces de detectar el estrés nutricional en los cultivos lo que facilita el uso óptimo de fertilizantes sólo en las zonas en las que es necesaria su aplicación y también son capaces de realizar una detección temprana de enfermedades y plagas*». Sin embargo, los SARP son solamente las plataformas sobre las que se instalan las cámaras y los sensores multiespectrales que nos permiten obtener datos de una explotación. No son el único tipo de plataforma, ya que estos sensores multiespectrales pueden estar instalados en satélites y en aviones; tampoco son la única fuente de datos, porque también podemos obtener la información que necesitamos para la toma de decisiones, por ejemplo, a partir de sensores planta-clima-suelo que se instalan directamente en campo.

Hoy en día, la mayoría de las aplicaciones operativas que utilizan los agricultores se basan en la integración de distintos tipos de sensores que caracterizan tanto la variabilidad espacial, como la variabilidad temporal de las fincas.

Por tanto, los SARP son vehículos que transportan sensores. Su potencialidad en agricultura para captar información viene dada por la precisión espacial con la que se puede tomar el dato y por la disponibilidad temporal de ese dato.

puede volar en condiciones meteorológicas adversas y suele hacerlo por debajo de las nubes, por lo que la capacidad temporal de adquisición de datos puede aumentar considerablemente frente a satélites y aviones.

8.2. Aplicaciones potenciales de los sarps en agricultura

La principal potencialidad del uso de los SARP en agricultura, es la de facilitar a los agricultores la capacidad de observar su explotación desde el aire, obteniendo así una perspectiva de su cosecha que les permita detectar las incidencias en cada campaña agrícola. Estas incidencias van desde problemas de fertirrigación hasta infestaciones de plagas y hongos que no se ven a ras de suelo.

Esta observación desde el aire no tiene porqué ser solamente en el rango del espectro visible que es lo que ve el ojo humano, sino que puede hacerse en las regiones del infrarrojo reflejado y del infrarrojo térmico, mediante cámaras multispectrales, donde la respuesta de los cultivos es más acusada Fig. 8.2, y permite una mejor caracterización de lo que está ocurriendo en la explotación.

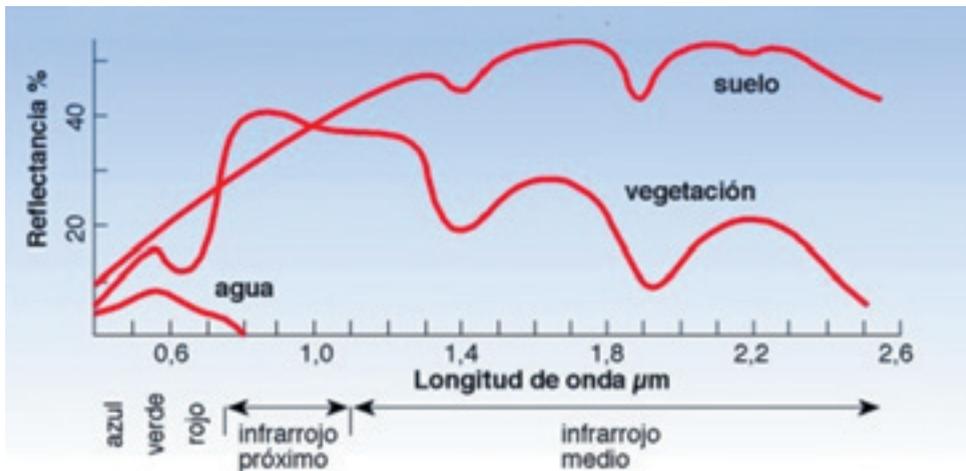


Figura 8.2. Curvas de reflectancia espectral de las principales coberturas de la superficie terrestre. En la curva de reflectancia espectral de la vegetación se puede ver como la reflectancia es mayor en los rangos del infrarrojo próximo que en la región del visible que es la que ve el ojo humano.

Además, disponer de un SARP nos permite volar los campos cada semana, cada día o incluso cada hora, permitiendo obtener una serie temporal, que facilita el seguimiento de la evolución de la cosecha y de las prácticas agrícolas que se realizan.

Potencialmente, los SARP son un servicio de información sobre el estado hídrico de los cultivos, su grado de desarrollo vegetativo y su estado sanitario, que se puede obtener en tiempo real para poder realizar riegos, fertilizaciones o tratamientos sanitarios en las zonas de las fincas agrícolas donde se detecten dichas necesidades y en el momento que se considere más adecuado.

A diferencia de lo que ocurre en Estados Unidos, donde existen reacciones en contra de los SARP ya que pueden invadir el derecho a la privacidad amparado en la Cuarta Enmienda de su Constitución, en Europa en la actualidad, existe una aceptación generalizada de su uso.

Aunque las aplicaciones de los SARP en agricultura son incipientes, los investigadores ya llevan varios años trabajando en potenciales aplicaciones. En España, destacan los trabajos que están llevando a cabo desde el Instituto de Agricultura Sostenible del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAS/CSIC).

López-Granados (2013) describe cómo se han usado Vehículos Aéreos No Tripulados en la evolución de la producción agraria. Se trata de varios trabajos sobre tres de los principales problemas que pueden afectar al rendimiento de los cultivos en diferentes escenarios agrícolas: *i) la detección de áreas infestadas por malas hierbas en cultivos herbáceos; ii) la detección de zonas que necesitan mayor o menor riego en frutales y iii) la detección de zonas infectadas por hongos en olivar.*

Todos estos trabajos persiguen la cartografía de dichas variables para una posterior gestión localizada de fitosanitarios y riego.

En la literatura se pueden encontrar muchas aplicaciones potenciales de los SARP en Agricultura. Sin querer que esto sea una recopilación exhaustiva, ni entrar en detalle en cada una de ellas, a continuación se relacionan las más generalizadas:

- **Manejo eficiente del agua.** El estrés hídrico en los cultivos provoca el cierre de los estomas, reduciendo la transpiración y aumentando la temperatura de las hojas. Este aumento de temperatura se puede monitorizar mediante sensores térmicos, Fig. 8.3. Estos sensores permiten estimar las necesidades hídricas de cada planta por lo que se puede llegar a aplicar la cantidad más adecuada de agua, con el consiguiente ahorro energético, especialmente si se trata de explotaciones con aguas subterráneas.

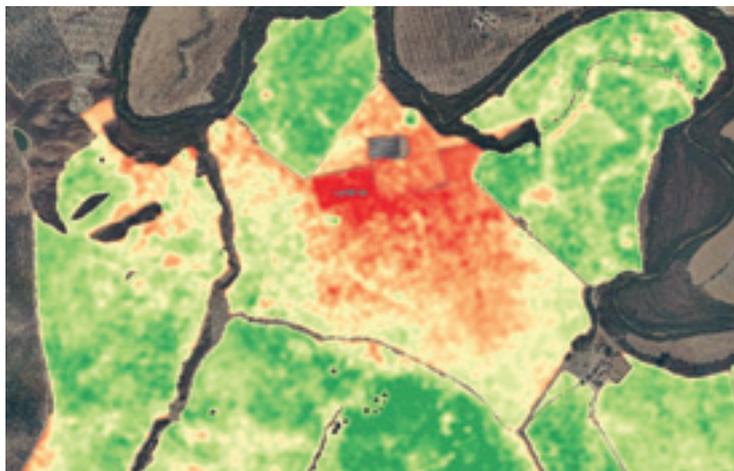


Figura 8.3. Cartografía del estrés hídrico en una explotación de olivo superintensivo en Jaén. Bellvert, *et al.* (2012 y 2013) han cartografiado el estado hídrico de un viñedo utilizando imágenes térmicas obtenidas desde un SARP.

- **Tratamientos localizados de herbicidas.** Para realizar tratamientos localizados de herbicidas sólo en las zonas infestadas y poder adaptar la dosis y el tipo de herbicida, es necesario detectar y cartografiar con precisión las malas hierbas.

En la mayor parte de los cultivos, los tratamientos se realizan en fases tempranas, cuando las malas hierbas y el cultivo están en un estado fenológico de plántula. En este estado de crecimiento tienen una respuesta espectral y una apariencia muy similar, por lo que para que el tratamiento sea localizado es necesaria su discriminación atendiendo a la composición y densidad de las malas hierbas.



Figura 8.4. SARP equipado con sensor multiespectral volando una parcela de maíz infestada de rodales de malas hierbas en época temprana (López-Granados, 2013).

- **Uso óptimo de fertilizantes.** La detección del *stress* nutricional en los cultivos, a partir de sensores multiespectrales que estiman el desarrollo vegetativo, permite la aplicación de fertilizantes sólo en las zonas en las que es necesario.
- **Detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos.** La capacidad de tomar imágenes multiespectrales en cualquier momento, nos permite detectar los cambios que se están produciendo en los cultivos. La combinación de estos datos con predicciones climáticas de detalle ayudarán a la detección de enfermedades, especialmente por hongos.

Calderón *et al.* (2013) detectaron los cambios fisiológicos que la enfermedad de la *Verticilosis* causa en el olivar con el fin de cartografiar los daños ocasionados en estados tempranos. Con esta información se pueden programar medidas de control que tienen efecto cuando los primeros olivos están afectados y la enfermedad está aún localizada en focos y no afecta al conjunto de la parcela.

A otro nivel, el CSIC también ha desarrollado drones biomiméticos para ahuyentar plagas aviares en cualquier tipo de cultivos agrícolas.

- **Supervisión de áreas fumigadas.** La vista de pájaro que nos permiten tener los SARP constituye una herramienta operativa para el seguimiento de las actuaciones que realizamos sobre nuestras fincas.

- **Indicadores de calidad en cultivos.** Las imágenes multispectrales obtenidas desde un SARP en combinación con parámetros medidos en campo permiten, en el marco de un Sistema de Información Geográfica, obtener indicadores de calidad o producción de los cultivos.
- **Generación de inventarios de cultivos.** La observación aérea ha sido desde siempre una herramienta potente para la generación de inventarios de cultivos. Aunque para grandes superficies los SARP no ofrecen las prestaciones de aviones y satélites de muy alta resolución, sin embargo, son una herramienta operativa en lugares de muy difícil acceso, en países con dificultades de infraestructura para operar aviones o en zonas con mucha cobertura nubosa.
- **Control de subvenciones agrarias.** En la actualidad la mayoría de controles de ayudas a la agricultura se realizan mediante imágenes de vuelos aerotransportados o imágenes de satélite. Sin embargo, los SARP pueden ser una herramienta de apoyo al control en campo, aportando una visión aérea de la totalidad de la explotación que facilita el seguimiento de los cultivos y de su estado de desarrollo vegetativo.
- **Conteo de plantas.** Las plantas crecen con la luz del sol, por ello el agricultor se asegura de que los cultivos se siembren de manera que les permita obtener el máximo de luz solar. Las plantas que crecen más tarde que otras, pueden causar todo tipo de daños en el crecimiento de las plantas que las rodean. En este proceso de organización del cultivo es esencial el recuento de soporte (Amago, 2014).

La forma tradicional de hacerlo es contar manualmente un área del campo y luego extrapolar los datos obtenidos a la totalidad de la finca. Los Vehículos Aéreos no tripulados proporcionan una nueva alternativa al método tradicional de recuento de soporte. En lugar de contar manualmente sólo una parte de la finca, permiten obtener información de todo el campo en el mismo tiempo que se habría utilizado para hacer el recuento de un área limitada.

La información obtenida en los recuentos de soporte es la base para determinar los próximos pasos que puede realizar el agricultor para la mejora de su cultivo. Además, las experiencias obtenidas permiten establecer estrategias futuras de marco de plantación.

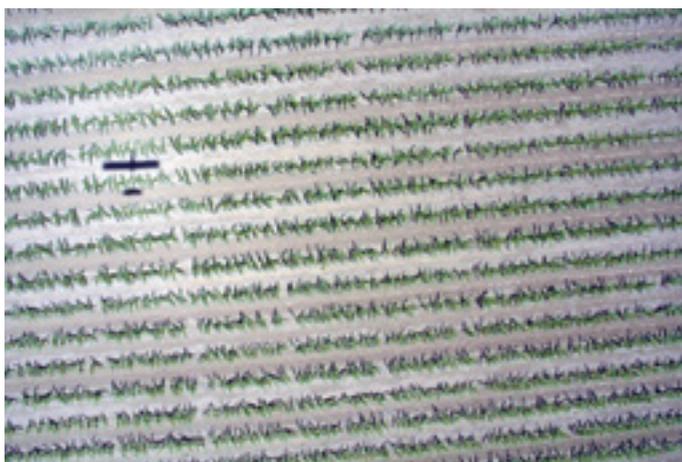


Figura 8.5. Cuento de plantas de maíz utilizando SARP (Amago, 2014).

- **Peritación de cultivos.** Cada vez más, la peritación de cultivos ante un siniestro, se apoya en imágenes multiespectrales obtenidas a partir de aviones y satélite. Estos datos permiten identificar con gran fiabilidad aquellas zonas que o bien no han sido afectadas o lo han sido al 100%. Sin embargo, la fiabilidad de esta peritación disminuye cuando el cultivo se ha visto afectado parcialmente, siendo necesario que el perito se desplace a campo (Erena, *et al.*, 2009).

La posibilidad de volar sobre la parcela afectada y obtener imágenes multiespectrales de la finca puede ser una herramienta objetiva en los procesos de peritación.



Figura 8.6. Arriba. Imagen multiespectral infrarroja con la localización de las parcelas de cítricos sujetas a peritación por un siniestro de helada. **Abajo.** Diferencia del Índice de Vegetación antes y después de la helada. Las parcelas son pre-clasificadas en función de la respuesta espectral de la vegetación y pueden ser contrastadas con los datos de campo de la peritación para detectar inconsistencias en el procedimiento.

8.3. Aplicaciones operativas en agricultura de precisión

Berni, *et al.* (2009) consideran que los SARP vienen a cubrir dos limitaciones que tiene actualmente el uso de satélites en el manejo de cultivos en tiempo real, como son la falta de imágenes con resolución espacial y espectral óptimas y una mejora en la capacidad de revisita necesaria para detectar determinados problemas que afectan al desarrollo de los cultivos. Las alternativas basadas en plataformas aéreas tripuladas tampoco resultan efectivas debido a sus altos costes operativos.

Un requisito fundamental para proporcionar productos útiles de detección remota en agricultura es la capacidad de combinar alta resolución espacial y tiempos de respuesta rápidos. Los sensores multiespectrales colocados en vehículos aéreos no tripulados pueden llenar este vacío, proporcionando métodos de bajo coste para satisfacer los requisitos críticos de resolución espacial, espectral y temporal.

Hasta ahora hemos visto las potencialidades y las principales ventajas del uso de SARP en Agricultura de precisión sin embargo, todas las experiencias que se han presentado se han llevado a cabo en el campo científico o experimental, sin que puedan considerarse aplicaciones operativas.

Una aplicación operativa es aquella que resuelve un problema real a un coste razonable. Las aplicaciones operativas en Agricultura de precisión dependen:

- a) **Del valor añadido del cultivo.** De nada sirve realizar una agricultura de precisión, si esto no se traduce en un incremento del precio final del producto o en un ahorro significativo en los costes de producción.

En España, la viña y el olivo son los cultivos en los que más se aplican estas técnicas, ya que una mejora en la calidad del vino o del aceite se traduce en un incremento de su precio. Sin embargo, distintas experiencias en cítricos han demostrado que pese a la mejora en el calibre de fruto obtenido, el incremento de precio del producto no compensa los costes añadidos que supone aplicar estas técnicas de precisión.

Los cultivos destinados a generar bioenergía también tienen un atractivo para utilizar técnicas de precisión, ya que un proceso industrializado como es la generación de biogás o biocombustibles depende de una materia prima (soja, forrajeras, cañas, etc.) que debe garantizar la sostenibilidad del proceso de producción.

- b) **De que la variabilidad influya en la producción/calidad final del producto.** El principio de la Agricultura de precisión es la caracterización de la variabilidad existente en un cultivo, pero esto no siempre es malo, por lo que es necesario conocer si esa variabilidad influye en la producción o en la calidad del producto.
- c) **De que se pueda caracterizar la variabilidad.** La variabilidad de una explotación viene dada principalmente por tres factores: suelos/litología, morfología y desarrollo vegetativo del cultivo. Por tanto, es necesario contar con sensores capaces de caracterizar estos tres factores.
- d) **De que la información obtenida permita la mejora del manejo del cultivo y de su productividad.** Muchas veces la detección de un problema no implica que se le pueda dar una solución, al menos fácil y económicamente rentable. Esto ocurre por ejem-

plo, cuando existe un sistema de riego por sectores y, dentro de cada sector, existen zonas con requerimientos hídricos distintos. Pese a la caracterización de la demanda hídrica de cada planta, el agricultor no puede realizar riegos diferenciados.

En España, las aplicaciones comerciales de agricultura de precisión a partir de imágenes multispectrales tomadas desde SARP, aviones o satélites, están relacionadas con la viticultura y la olivicultura y están dirigidas, no tanto a la reducción de insumos, como a la mejora y caracterización de la calidad.

Un elemento fundamental a la hora de diseñar una aplicación operativa son los requisitos de usuario (¿Qué es lo que el usuario quiere y necesita?). En la Tabla 8.1 podemos ver un resumen de los requisitos que un usuario de viticultura u olivicultura en España demanda a las imágenes multispectrales obtenidas desde SARP, avión o satélite.

Tabla 8.1. Requisitos de usuario y características de las principales plataformas.

RESQUISITOS	AGRICULTOR	SATÉLITE	AVIÓN	SARP
Resolución espacial	50 cm	50 cm	30 cm	20 cm
Resolución temporal	a demanda	a demanda	permisos	a demanda
Resolución radiométrica	10 bits	10 bits	10 bits	10 bits
Resolución espectral	RGB+NIR	RGB+NIR	RGB+NIR	RGB+NIR+TIR
Costes de adquisición	(*)	25,00 \$/km ²	Variable (**)	
Adquisición mínima	Tamaño de la finca	100,00 km ²		
Costes de operación		0,00 €/km ²	0,000 €/km ²	(***)

(*) Los costes deberían estar en torno al coste de un tratamiento fitosanitario.

(**) El coste de adquisición de imágenes multispectrales desde avión depende de muchos factores. En nuestra experiencia en agricultura de precisión los costes de adquisición han oscilado entre 0,30 €/ha hasta los 3 €/ha.

(***) En la actualidad el alquiler de un SARP con operador es de unos 600 € por medio día de trabajo. El precio no incluye gastos de transporte y viaje mayores de 50 km.

RGB: Región del visible (Rojo-Verde-Azul).

NIR: Infrarrojo próximo.

TIR: Infrarrojo térmico.

Si analizamos las imágenes atendiendo a los 4 tipos de información que aportan, los usuarios requieren datos con una resolución espacial entorno a los 50 cm. Resoluciones mayores encarecen los tratamientos digitales que se realizan a la imagen original y aportan una información excesiva que el agricultor no aprovecha ya que, en el mejor de los casos, se va a posicionar en el campo con sistemas GPS portátiles que ofrecen una precisión de 2,5 a 3 (en el 95% del tiempo).

La resolución temporal que requiere el usuario es «a demanda». No existe un criterio definido (diario, semanal, quincenal, etc.) y suele depender de las observaciones y de las experiencias del agricultor en su trabajo cotidiano en campo.

La resolución radiométrica, que expresa la capacidad de un sensor en una banda espectral determinada para distinguir señales electromagnéticas de energía diferente, es decir, el número de posibles valores que puede tomar cada medida de energía, siendo

un concepto muchas veces desconocido para el usuario, se acepta que sea de un byte (256 intensidades) o 10 bytes (1024 intensidades). Es un concepto que se acepta dentro de las prescripciones técnicas de los sensores multiespectrales.

La resolución espectral principalmente se centra en la región del visible y en la banda del infrarrojo próximo (NIR) a partir de las cuales se obtienen la mayoría de los índices de vegetación.

El usuario no entiende de costes de adquisición o de operación. El coste económico total de aplicar estas técnicas debe estar en torno al coste de un tratamiento fitosanitario. Los costes deben adecuarse al tamaño de la explotación y al valor añadido que se obtenga con esta información.

El usuario no entiende de escenas, polígonos o superficies mínimas y quiere que los datos sean de la totalidad de su finca.

Frente a estos requisitos de usuario, las distintas plataformas existentes en el mercado (SARP, avión y satélite), deben dar respuesta a estas necesidades. De poco sirve que se tenga una capacidad de obtener imágenes con resolución milimétrica, si al agricultor le basta con resoluciones cuasi-métricas.

Si se considera la resolución espacial, existen varios satélites que presentan resoluciones entorno a los 50 cm, como *QuickBird*, *WorldView* o *GeoEye*. En el caso de los aviones, la altura de vuelo y las características de la cámara condicionan la resolución espacial de las imágenes. En nuestra experiencia con el sensor multiespectral ADS40 de Leica, las resoluciones con aviones no presurizados están en torno a los 30-35 cm. Por último, los SARP también dependen de la cámara y la altura de vuelo.

En la Fig. 8.7 se puede ver un cuadro con las características principales de la cámara Tetracam Mini-MCA utilizable con SARP. Para obtener una resolución de 50 cm necesitamos que el SARP vuele a una altura de casi 1.000 m.

Tetracam Mini-MCA (con objetivo de 9,6 mm)			
Ejemplos de Resolución Base y Campo de Visión			
Parámetros del sensor y la lente	Distancia del objeto (Altitud sobre el nivel del suelo en metros)	Resolución base en mm por píxel	Campo de Visión (Ancho x alto) en metros
Los valores mostrados a la derecha se obtuvieron desde el Calculador Óptico de FOV (Field Of View - Campo de Visión) que incluye el software Tetracam PixelWrench2 (suministrado con la cámara) usando los valores que se muestran a continuación: Dimensiones del sensor (mm): 6.66 X 5.32 Tamaño del píxel (micrones): 5.2 Longitud focal de la lente de la cámara (mm): 9.6	122m (~400 pies)	66	84 x 67
	213,4m (~700 pies)	116	148 x 118
	365,8m (~1200 pies)	198	254 x 203
	915 m (~3000 pies)	496	635 x 509

La resolución temporal en los tres tipos de plataformas es «a demanda», si bien en el caso de los aviones es necesario contar con el permiso de vuelo de la dirección General de Aeronáutica Civil.

Los satélites dependen de su modelo orbital (cuándo pasarán por la zona de interés) y de la existencia de cobertura nubosa.

Cuando se cursa una petición de adquisición, la empresa que gestiona el satélite abre una ventana de adquisición en la que garantiza la captura de la imagen si las condiciones son favorables.

La ventaja de los SARP es que si pueden volar por debajo de las nubes y no necesitan de permisos administrativos, la adquisición de la imagen está prácticamente garantizada en el momento en que se desee.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la captura de una zona amplia no es instantánea por lo que la toma requerirá de un tiempo en el que las condiciones climáticas y de iluminación pueden cambiar sustancialmente.

Una ventaja operativa sustancial de los SARP viene de su capacidad de montar no sólo sensores en el rango del visible y del infrarrojo próximo, sino también en el térmico.

Los satélites de muy alta resolución no cuentan con sensores que capten la radiación electromagnética en la región del térmico y, los satélites que cuentan con sensores térmicos lo hacen con resoluciones muy pequeñas (60 a 100 m de resolución espacial).

En cuanto a los costes de adquisición, actualmente, las imágenes de satélite tienen unas condiciones claras y sencillas.

Una imagen de muy alta resolución, de cualquier parte del mundo, con bandas en el visible y en el infrarrojo, con una superficie mínima de adquisición de 100 km², adaptable a una poligonal con los límites de la zona de interés, cuesta unos 1.975 € (0,20 €/ha o 25 \$/km²).

En el caso de los vuelos con aviones tripulados es mucho más difícil establecer un precio unitario, ya que depende de la existencia de permisos, de la coincidencia con otras campañas que tenga la operadora del vuelo, de la superficie total a volar y de la distancia y dispersión de las fincas agrícolas.

En nuestra experiencia en Agricultura de precisión los costes de adquisición han oscilado entre 0,30 €/ha hasta los 3 €/ha.

Si no tenemos un SARP, ni los sensores en propiedad y hay que alquilarlos, los costes son de unos 600 € por medio día de trabajo con operador especializado. No incluye los gastos de transporte y de viaje a distancias de más de 50 km.

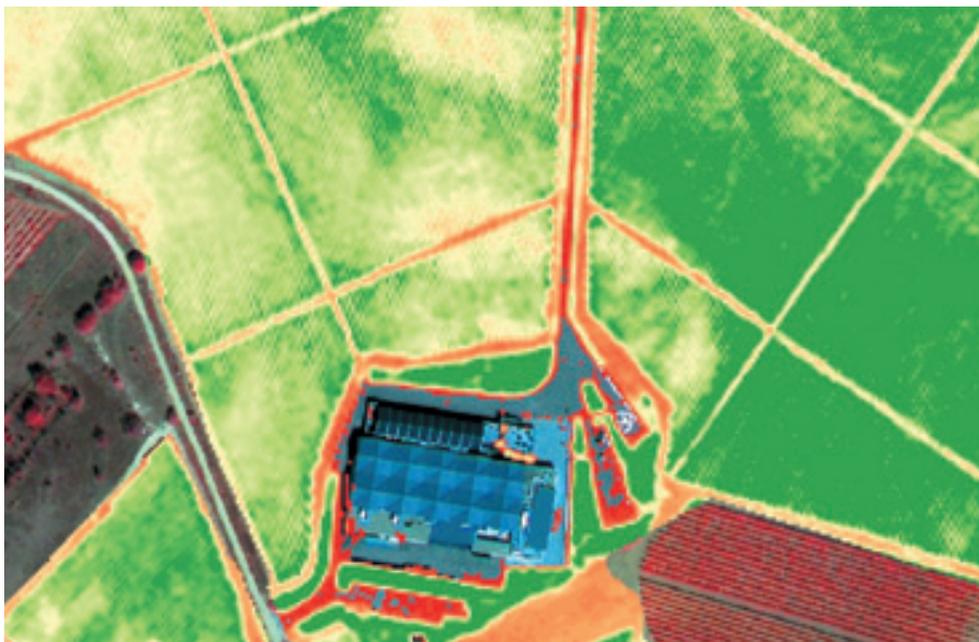


Figura 8.8. Índice de vegetación a partir de una imagen multispectral. Estos índices de vegetación nos permiten conocer el desarrollo vegetativo del cultivo. Si contamos con una plataforma de captura de datos de alta periodicidad, como son los SARP, podemos conocer la evolución de la cosecha y compararla con otras de referencia.

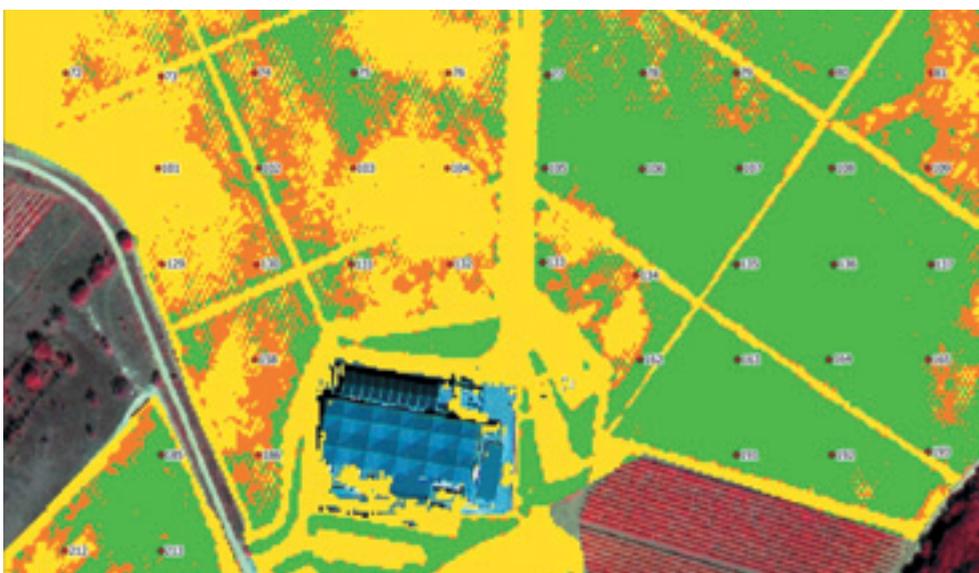


Figura 8.9. Cluster de una explotación viñícola y la distribución de los puntos de muestreo en campo. Muchas de las propiedades que determinan la calidad de la uva (pH, carga, etc.) no pueden ser obtenidas por sensores y deben ser muestreadas en campo. Las imágenes multispectrales capturadas desde un SARP son una fuente de datos necesaria, pero no suficiente y debe ser integrada con otros datos para obtener aplicaciones operativas.

Sobre todo, lo que se debe tener en cuenta para el desarrollo de aplicaciones operativas es que las imágenes multiespectrales, por sí solas, no son suficientes para caracterizar la variabilidad de una finca y es necesario combinarlas con la información aportada por sensores planta-clima-suelo y muestreos de campo, Fig. 8.8 y 8.9.

Desde el año 2004, se está utilizando imágenes multiespectrales obtenidas a partir de satélites, aviones y SARP, junto con los datos aportados por sensores planta-clima-suelo, para caracterizar la variabilidad espacial y temporal de los cultivos (Romero, *et al.*, 2013; Montesinos, *et al.*, 2007; Alvarez, *et al.*, 2006). Algunas de las lecciones aprendidas son:

- a) **Ni todos los cultivos, ni todas las explotaciones permiten aplicar técnicas de agricultura de precisión.** Si no existe una variabilidad en el cultivo que caracterizar y un valor añadido significativo, el agricultor no se plantea utilizar estas técnicas. En España, además, el nivel de parcelación es muy elevado, lo que dificulta la aplicación de estas técnicas. Un reto que hay por delante es que las asociaciones de agricultores (cooperativas, denominaciones de origen o comunidades de regantes) incorporen estas técnicas como pieza básica de su gestión.
- b) **Cada cultivo y hasta cada cosecha es diferente.** Cada cultivo tiene que ser medido y tratado de forma diferente para generar la información que requiere el agricultor. No existe una solución única, y es importante contar con especialistas en cada tipo de cultivo, que en última instancia, son los que pueden ofrecer soluciones a los agricultores.
- c) **Cada explotación agrícola es diferente.** Cada explotación agrícola es singular, por su climatología, por su localización, por las prácticas agrarias que lleva a cabo o por el producto que pretende colocar en el mercado. Esto obliga a establecer métodos objetivos que faciliten la comparación entre parcelas y entre fincas.
- d) **Los agricultores conocen sus fincas.** Es un error ofrecer soluciones cerradas que van a solucionar todos los problemas del agricultor. Los agricultores conocen sus fincas mejor que nadie y en muchos casos cuentan con casos de éxito (y de fracaso) que les permiten tener una visión muy clara de su negocio. Además, son ellos los que se juegan su dinero con un objetivo: poner en el mercado el mejor producto posible al mejor precio posible.
- e) **Los SARP son vehículos sobre los que instalar sensores.** Lo importante no es la técnica: es la solución de un problema real. A la hora de elegir los SARP como una herramienta para obtener la información que necesitamos para gestionar eficientemente la finca, hay que tener en cuenta sus ventajas, pero también sus inconvenientes y las alternativas existentes.
- f) **Los satélites de muy alta resolución y los aviones son alternativas reales al uso de los drones.**
- g) **Los técnicos de las explotaciones no quieren volar SARP.** El agricultor está interesado en la imagen, no en la adquisición de la imagen. Los usuarios no quieren procesar datos, quieren información que les ayude en la toma de decisiones.

Por tanto, la operación y captura de datos desde un SARP debe ser totalmente autónoma, desde el despegue hasta el aterrizaje. La experiencia debe ser tan sencilla

como pulsar un botón «inicio» y que la información aparezca en los dispositivos del agricultor (ordenador, tableta o móvil).

- h) **Los usuarios quieren información contrastada.** Los agricultores saben de la complejidad de su trabajo y no creen en las soluciones milagrosas.

No esperan que una sola técnica les solucione el problema, esperan soluciones integradas en las que los datos procedentes de distintas fuentes (muchas de ellas gratuitas) son sometidos a contradicción.

- i) **La información para la toma de decisiones no la aporta una sola técnica.** La mejor información la aporta la integración de datos procedentes de distintas fuentes.

- j) **Los drones son un elemento de marketing para una explotación.** La utilización de satélites y SARP para obtener un producto de calidad llama la atención del público por la singularidad del tema.

Tras la presentación de un vino, los titulares de prensa destacan el proceso de cómo se ha obtenido el producto: «*Viticultura desde satélite*» o «*Drones para mejorar la calidad del vino*».

8.4. Un futuro operativo

En la actualidad, existen ya empresas que alquilan o comercializan drones. El coste de alquiler por jornada completa con operador especializado puede variar entre 600 € a 3.000 € y, en el caso de compra, existen drones por precios entre 6.000 y 8.000 € hasta rangos entre 30.000 a 45.000 € en función de la tecnología y fiabilidad.

Desde nuestro punto de vista, el futuro no va a estar en el modelo de negocio basado en el alquiler o en proporcionar el servicio al agricultor, ya que existen alternativas más económicas y un abaratamiento importante de los alquileres supondría una falta de atractivo económico para el emprendedor.

El problema no son los costes del SARP y su amortización, sino el coste de desplazar a pilotos hasta las explotaciones.

El futuro de los SARP en agricultura puede venir por dos vías: por un lado, por la incorporación de **los SARP como una herramienta agrícola más** para el agricultor, como es ahora el tractor, Fig. 8.10, y por otro, por **SARP con una autonomía de cientos de kilómetros**, que puedan ser programados desde las explotaciones y operen como los vuelos aerotransportados actuales, pero sin piloto.

Para que los SARP sean una herramienta agrícola, es necesario un abaratamiento de los costes de adquisición, mayor robustez, bajo mantenimiento y una automatización de todo el proceso de adquisición hasta obtener la imagen, que el agricultor utilizará para decidir qué tratamiento fitosanitario o qué actuación debe realizar en su finca.

No hay que olvidar que con toda la información generada no estamos curando al enfermo, sino diagnosticando la enfermedad.



Figura 8.10. Recreación de una explotación agrícola donde el tractor y el SARP cohabitan como herramientas agrícolas habituales.

Por otro lado, la otra posibilidad es que los SARP no sean pequeños y manejables, sino grandes y con una gran autonomía y en este caso, una empresa opere el SARP a demanda.

En este modelo, no existiría desplazamiento del piloto al campo, sino un seguimiento de la adquisición de imágenes desde una base a cientos de kilómetros (al estilo de los actuales drones militares). Este tipo de drones pueden tener instaladas varios tipos de cámaras y sensores a la vez (video, visible, infrarrojo, térmico, etc.), facilitando y mejorando la disponibilidad de datos.

Los costes se reducirían drásticamente, utilizando itinerarios que visitasen varias parcelas en una jornada.

La principal dificultad con la que se enfrenta este modelo es una regulación restrictiva del sector, que impida a este tipo de SARP, llevar a cabo este tipo de trabajos.

Mirar al futuro siempre es apasionante, pero también incierto.

8.5. Agradecimientos

Mi agradecimiento personal a Rafael Álvarez de Verde Smart Co. y a Manuel Erena del Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (IMIDA), por la revisión

crítica de este capítulo y a Bodegas Emilio Moro por permitir usar imágenes de su explotación Cepa 21 (Valladolid).

8.6. Referencias bibliográficas

- ÁLVAREZ, R.; HUETE, J.; LÓPEZ, M.; BEA, M.; FERNÁNDEZ, L. y MONTESINOS, S. (2006): «Integración de nuevos métodos de diagnóstico en la gestión de información agrícola para mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad». *Revista Fruticultura profesional* n.º 161: 81-87. ISSN: 1131-5660.
- AMAGO, I. (2014): «Utilizing the UAV for effective stand counting». <http://media.precisionhawk.com/topic/utilizing-the-uav-for-effective-plant-stand-management/>
- AUVSI (2013): «The economic impact of Unmanned Aircraft Systems integration in the USA». http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/958c920a-7f9b-4ad2-9807-f9a4e95d1ef1/UploadedImages/New_Economic%20Report%202013%20Full.pdf
- BELLVERT, J.; ZARCO-TEJADA, P. J.; GIRONA, J. y FERERES, E. (2013): «Mapping crop water stress index in a «Pinot-noir» vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle». *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-013-9334-5.
- BELLVERT, J. y GIRONA, J. (2012): «The use of multispectral and thermal images as a tool for irrigation scheduling in vineyards». in Erena, M.; López-Francos, A.; Montesinos, S. y Berthoumieu, J.F. (2012): «The use of remote sensing and geographic information systems for irrigation management in Southwest Europe». *Options méditerranéennes. Serie B: studies and researchs*. Number 67:131-138.
- CALDERÓN, R.; NAVAS-CORTÉS, J. A.; LUCENA, C. y ZARCO-TEJADA, P. J. (2013): «High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices». *Remote Sensing of Environment*, 139: 231–245.
- ERENA, M.; PÉREZ, P.; MONTESINOS, S.; BEA, M.; SÁNCHEZ, S.; GONZÁLEZ, M.; RUÍZ, L. A.; RECIO, J. y HERMOSILLA, T. (2009): «Ensayos para la estimación de daños producidos por heladas y sequías en cítricos mediante imágenes de alta resolución espacial». XIII Congreso Internacional de Teledetección. Calatayud, 23 al 26 septiembre 2009. ISBN: 978-84-613-4257-0: 73-76.
- LÓPEZ-GRANADOS, F. (2013): «Uso de Vehículos Aéreos No Tripulados para la evaluación de la producción agraria». *Revista Ambienta* n.º 105: 40-52.
- MONTESINOS, S.; BEA, M.; FERNÁNDEZ, L. y ÁLVAREZ, R. (2007): «Las imágenes de satélite en la gestión de la viña». *Revista Enología*, n.º 5. Año IV Septiembre-October 2007. ISSN: 1668-3889.
- PEÑA, J. M.; TORRES-SÁNCHEZ, J.; DE CASTRO, A. I.; KELLY, M. y LÓPEZ-GRANADOS, F. (2013): «Weed mapping in early-season maize fields using object-based analy-

sis of unmanned aerial vehicle (UAV) images». *PLOS ONE*. DOI: 10.1371/journal.pone.0077151.

- ROMERO, M.; PITA, M. F. y MONTESINOS, S. (2013): «Aplicación de técnicas de teledetección y geoestadística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura». *Geofocus*, n.º 13-1: 177-194. ISSN: 1578-5157.

APLICACIÓN AL SEGUIMIENTO FITOSANITARIO DE MASAS FORESTALES

M.^a José CHECA ALONSO, M.^a del Rosario ESCUDERO BARBERO,
Francisco José LARIO LEZA y Pilar PORCEL PRADO

TRAGSATEC. Grupo TRAGSA

9.1. Introducción

Durante los años 2013 y 2014, el Grupo Tragsa ha formado parte del consorcio internacional a cargo del proyecto SUDOE FORRISK, cofinanciado con ayuda FEDER por el Programa Interreg IVB SUDOE, con referencia FORRISK–SOE3/P2/F523.

Este proyecto pretende conocer el estado y los riesgos que afectan a las masas forestales del sudeste europeo (incendios, plagas, etc.), con el objetivo de probar y desarrollar innovaciones técnicas que contribuyan a reducir los daños forestales producidos por factores bióticos y abióticos.

Dentro del Grupo Tragsa, el Departamento de Teledetección de Tragsatec ha empleado las técnicas de la Teledetección para explorar la utilidad de distintos tipos de datos de observación de la Tierra, en el seguimiento fitosanitario de las masas forestales. El desarrollo del trabajo se ha basado en la utilización de diversos índices espectrales, que proporcionan información sobre el estado de la vegetación, y que han sido contrastados con datos de verdad terreno.

Este proyecto de I+D+i, se ha planteado a dos escalas de trabajo, una regional, para la que se han utilizando datos de observación de la Tierra procedentes de plataformas basadas en satélite, y otra local, a partir de imágenes adquiridas con sensores a bordo de sistemas de aeronave pilotada por control remoto (RPAS).

En este artículo, solamente se aborda el trabajo realizado a escala local, con datos adquiridos utilizando plataformas basadas en RPAS.

9.2. Zona de estudio

La zona de estudio comprende un polígono de 13 hectáreas, ubicado en el paraje Pena de Francia, en el municipio pontevedrés de Dozón. La masa forestal en la parcela de estudio está compuesta mayoritariamente por *Pinus pinaster*, de unos 14 años de edad, en estado de latizal y afectados por **Armillaria mellea**, según estudios previos, Figs. 9.1 y 9.2.

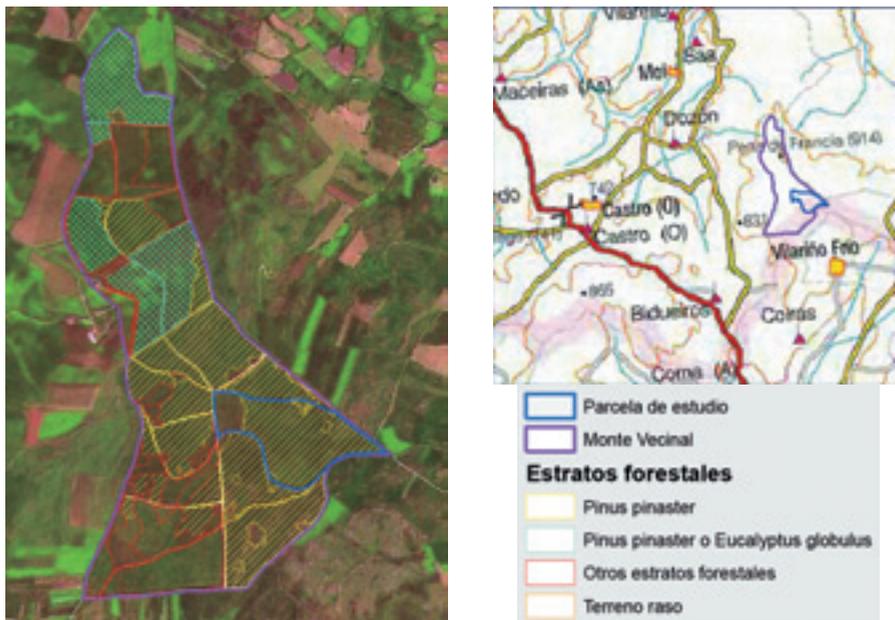


Figura 9.1. Situación de la parcela de estudio dentro del Monte Vecinal de Pena de Francia (Dozón, Pontevedra).

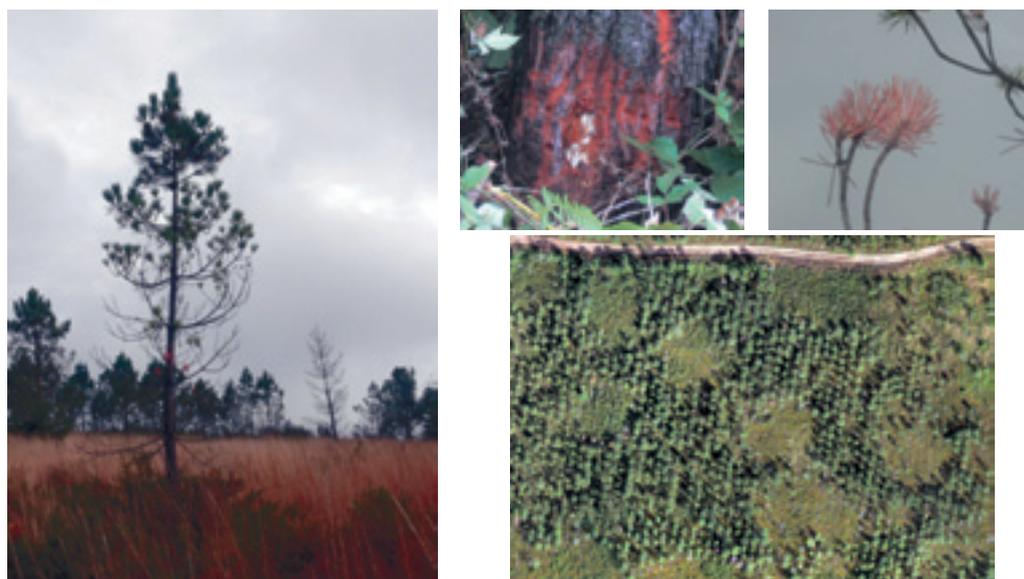


Figura 9.2. Izquierda, árboles con distinto grado de afección. En primer término, un pino afectado por Armillaria y, en segundo término, un pino muerto, dentro de una amplia zona en la que han ido desapareciendo los árboles, como consecuencia de la expansión del hongo. Parte superior derecha, síntomas observados en campo en árboles enfermos: base de un tronco en la que se ve el micelio blanco y acículas secas. Parte inferior derecha, ortofotografía en la que se observan claros en la plantación, con patrones circulares, como consecuencia de la extracción de los árboles muertos.

La infección por *Armillaria mellea* afecta al sistema radicular de los árboles. Las plantas enfermas se desarrollan más lentamente y muestran un decaimiento general, con hojas más pequeñas y cloróticas. Cuando el sistema radicular está completamente afectado, se produce el rápido decaimiento de la copa del árbol y su muerte, pudiendo pasar muchos años hasta que los síntomas se hacen evidentes.

La vía de propagación más habitual es por contacto de los rizomorfos con las raíces de los árboles sanos a su alrededor, lo que provoca un patrón característico de grupos de árboles muertos, como se aprecia en la parte inferior izquierda de la Fig. 9.2.

9.3. Datos de observación de la tierra

Como ya se ha comentado, el estudio comprende dos escalas de trabajo: regional y local. Para el trabajo a escala regional, se han utilizado dos imágenes de verano (años 2010 y 2014), adquiridas por el satélite *WorldView 2*. Los datos proporcionados por esta plataforma incluyen una banda pancromática, con una resolución espacial de 50 cm, y ocho bandas multiespectrales, de dos metros de resolución espacial. El ancho de barrido del sensor es de 16 km.

La configuración de las bandas multiespectrales proporcionadas por *WorldView 2* abarca desde el espectro visible, hasta el infrarrojo cercano, lo que permite la caracterización y seguimiento del estado de la vegetación.

En cuanto al trabajo a escala local, se utilizaron dos plataformas basadas en RPAS de ala móvil, de tipo multirrotor (Microdrones GmbH, MD4-200 y MD4-1000), al ser el tipo de aeronave más adecuada para un entorno forestal, debido a las limitaciones del espacio disponible para el despegue y aterrizaje.

Respecto a los sensores embarcados, fueron una cámara digital, RGB, de pequeño formato (Canon IXUS 125 HS) y una cámara multiespectral Tetracam Mini-MCA6. Ésta última, dispone de seis canales, de banda estrecha (ancho de banda de 10 nm), con una configuración espectral adaptada a los estudios de vegetación.

Tabla 9.1. Configuración de las bandas del sensor Tetracam Mini-MCA de 6 bandas empleado en el estudio.

ESPECTRO VISIBLE: VERDE			E. VISIBLE: ROJO	BORDE DEL ROJO	INFRAR. CERCANO
530 nm	550 nm	570 nm	670 nm	700 nm	800 nm

Simultáneamente al vuelo de los RPAS, se tomaron puntos GPS, utilizados en el proceso de georreferenciación de las imágenes, y se realizaron medidas de la intensidad de la luz, con un fotómetro solar, usadas en la corrección atmosférica de las imágenes multiespectrales.

9.4. Campaña de campo

En diciembre de 2013, se realizó una primera campaña de campo, en colaboración con la Estación Fitopatológica de Areeiro, que consistió en el análisis fitopatológico

sobre presencia/ausencia de *Armillaria* en el suelo, y de otros hongos en la parte aérea de los pinos.

Los resultados de esta campaña no fueron clarificadores, debido a que *Armillaria* estaba extendida por toda la zona de estudio, sin que exista ninguna diferencia en la incidencia entre las zonas definidas, inicialmente, como afectadas y como sanas.

En verano de 2014, se realizó una segunda campaña de campo, con el objetivo de establecer relaciones experimentales entre variables fisiológicas asociadas al estrés hídrico (los síntomas de la infección por *Armillaria mellea* son similares a los del estrés por sequía) y los índices de vegetación derivados de las imágenes multiespectrales.

Tabla 9.2. Parámetros fisiológicos medidos en campo.

PARÁMETROS FISIOLÓGICOS	OBJETIVO
Potencial hídrico	Detectar síntomas de estrés hídrico
Fluorescencia	Determinar la capacidad fotosintética
Contenido en clorofila	Detectar estados de clorosis
Índice de área foliar (LAI)	Evaluar el grado de defoliación

9.5. Control de calidad de los datos adquiridos con RPAS

Las imágenes adquiridas con plataformas RPAS fueron suministradas por la empresa Zumain Ingenieros, S.L., en colaboración con el IAS-CSIC de Córdoba.

En cuanto al control de calidad realizado en el Departamento de Teledetección de Tragsatec sobre esos productos Tabla 9.3, se centró en dos aspectos fundamentales, geometría (precisión planimétrica de los datos) y radiometría.

Tabla 9.3. Resumen de los productos adquiridos con RPAS suministrados y su nivel de procesado.

PRODUCTO RPAS	FECHA	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL	NIVEL DE PROCESADO
Imágenes multiespectrales	07-10-2014	Multiespectrales VIS-NIR: 3 bandas en el verde, 1 en el rojo, 1 en el borde del rojo y 1 en el infrarrojo cercano.	10 cm	Georreferenciadas y corregidas atmosféricamente
Ortomosaico	24-09-2013	Visible (VIS): RGB	5 cm	Ortorectificadas
MDS derivado del vuelo RGB	24-09-2013	—	21 pto/m ²	Nube de puntos

Como resultado de estos controles, se comprobó que la calidad geométrica era suficiente para el objetivo del estudio, mientras que no sucedía lo mismo con la calidad radiométrica de las imágenes. Tanto éstas, como los productos derivados, presentan una serie de deficiencias, que dificultan su utilización en este tipo de proyectos:

- Desalineación de las bandas en el mosaico multiespectral, posiblemente debido al proceso de generación del mosaico (Fig. 9.3, parte superior izquierda).
- Desalineación de las bandas multiespectrales en las escenas individuales, probablemente ocasionada por el diseño del sensor, con 6 cámaras independientes, que presentan un desplazamiento físico entre ellas y una posible falta de sincronización en los obturadores. Este efecto es más marcado en el borde de las escenas multiespectrales (Fig. 9.3, parte inferior derecha).
- Blurring o desenfocado, originado por vibraciones transmitidas al sensor, como consecuencia de un aislamiento deficiente del posicionador. Este problema se observa tanto en las imágenes RGB, como en las multiespectrales, en las que es especialmente relevante (Fig. 9.4 izquierda, y Fig. 9.5 izquierda).
- Vignetting o diferencias de iluminación radiales entre las zonas centrales y marginales de la imagen. Este problema denota una baja calidad óptica del sensor, afecta a las imágenes multiespectrales y es muy notable en algunas de las bandas (ver figura 4 derecha).
- El modelo digital de superficies presenta zonas con muy baja densidad en la nube de puntos, debido a problemas de correlación de las imágenes durante el proceso de aerotriangulación (Fig. 9.5 derecha).

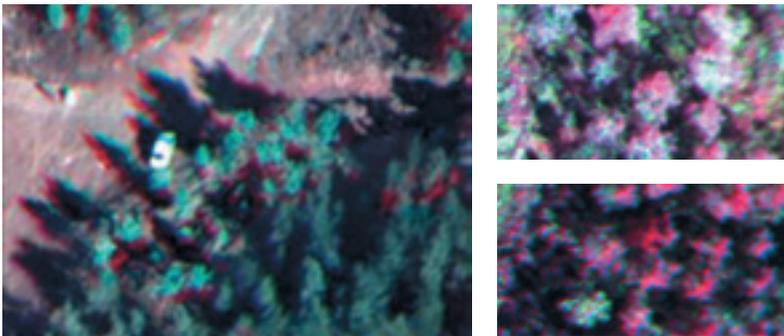


Figura 9.3. Desalineación de bandas en el mosaico (izquierda) y en las escenas individuales (derecha) La figura superior derecha corresponde a la zona central de la escena y la inferior derecha al borde de la misma (donde la desalineación es mayor).

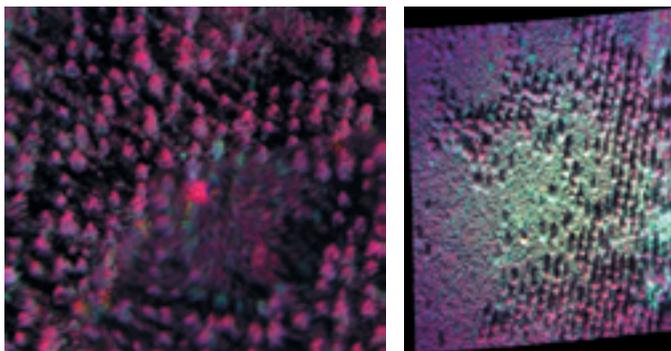


Figura 9.4. «Blurring» o desenfocado (izquierda) y «vignetting» a nivel de escena multiespectral (derecha).

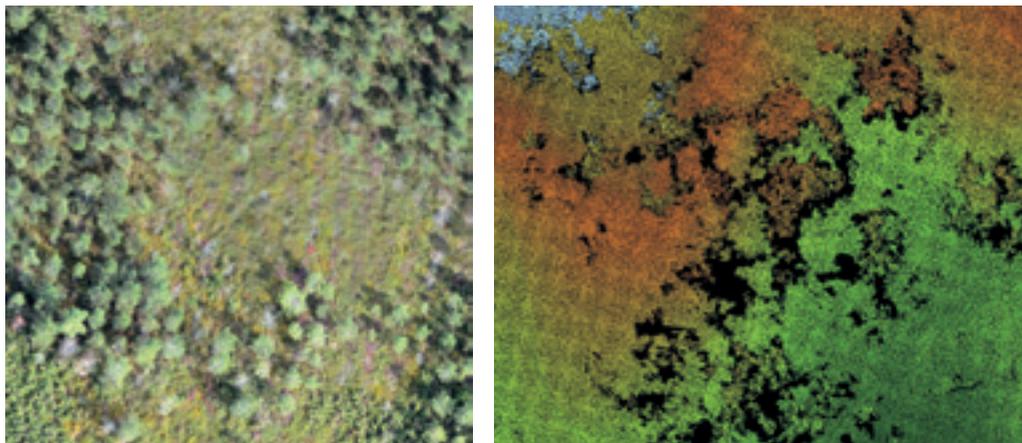


Figura 9.5. Problemas de «blurring» detectados en el ortomosaico RGB y zonas de baja densidad (áreas en negro) en la nube de puntos del modelo digital de superficies (MDS).

9.6. Análisis de las imágenes

La metodología aplicada para el análisis de las imágenes consistió en:

- Extracción de una máscara de arbolado, con el fin de facilitar el análisis de la vegetación objeto de estudio.
- Cálculo de índices de vegetación relacionados con distintos parámetros con significado biofísico.
- Análisis de los índices de vegetación y correlación con los datos de parámetros medidos en campo.

9.6.1. Extracción de la máscara de arbolado

La extracción de la máscara de arbolado se llevó a cabo por clasificación de las bandas multiespectrales, en el caso de las escenas adquiridas con la cámara Tetracam.

Debido a las características de la zona de estudio, cubierta por un sotobosque muy heterogéneo y de gran desarrollo, se produjeron frecuentes confusiones entre los distintos tipos de vegetación (matorral y arbolado). Con el fin de depurar la máscara de arbolado, se evaluó el uso de un modelo de altura de la vegetación, derivado del modelo digital de superficie (MDS). En este último caso, los resultados no fueron satisfactorios, como consecuencia de las numerosas imprecisiones del MDS, especialmente en las transiciones entre el arbolado y el sotobosque, y allí donde había pies de árboles aislados.

9.6.2. Cálculo de índices de vegetación

Cada tipo de cobertura presenta una firma espectral típica, directamente relacionada con sus características de composición, geometría, etcétera. De esta forma,

la proporción de luz incidente que es reflejada, absorbida o transmitida depende de las características de la cobertura del suelo y de la longitud de onda analizada.

La firma espectral de la vegetación está condicionada por la presencia de pigmentos, la estructura de la hoja y su contenido en agua, que variará en función de la especie, su estado fenológico, salud, y otros factores. En el espectro visible (400 a 700 nm), los pigmentos fotosintéticos son los que condicionan la respuesta espectral de la vegetación, mientras que en la región del infrarrojo cercano (700 a 1.350 nm), es la estructura interna de la hoja el factor condicionante.

Normalmente, las concentraciones altas de clorofila se relacionan con una buena salud de las plantas, mientras que, un incremento en la concentración de carotenos y antocianinas se vincula a situaciones de estrés o senescencia (tonos amarillos y rojos de las hojas; Fig. 9.6 izquierda).

Los índices que se han aplicado sobre las imágenes multiespectrales se pueden agrupar en tres categorías:

- Índices relacionados con la concentración en pigmentos, como el ARI (*Anthocyanin Reflectance Index, Gitelson, et al., 2001*), que informa sobre la concentración en antocianinas.
- Índices estructurales relacionados con la actividad fotosintética de las plantas, como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index, Rouse, et al., 1973*).
- Índices relacionados con la eficiencia en el uso de la luz, como el PRI (*Photochemical Reflectance Index, Gamon, et al., 1992*).

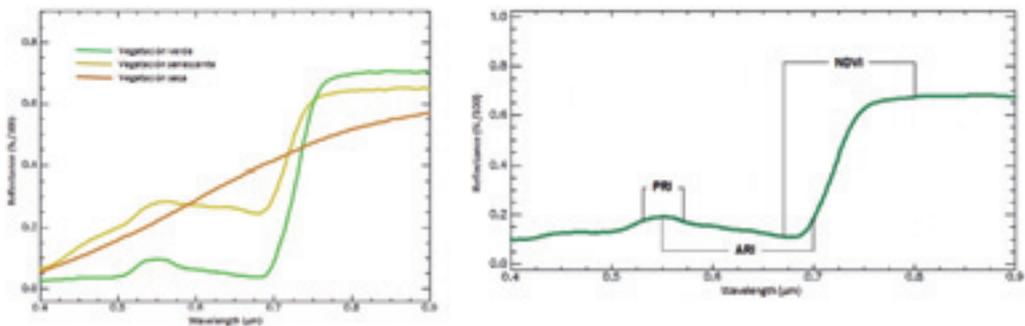
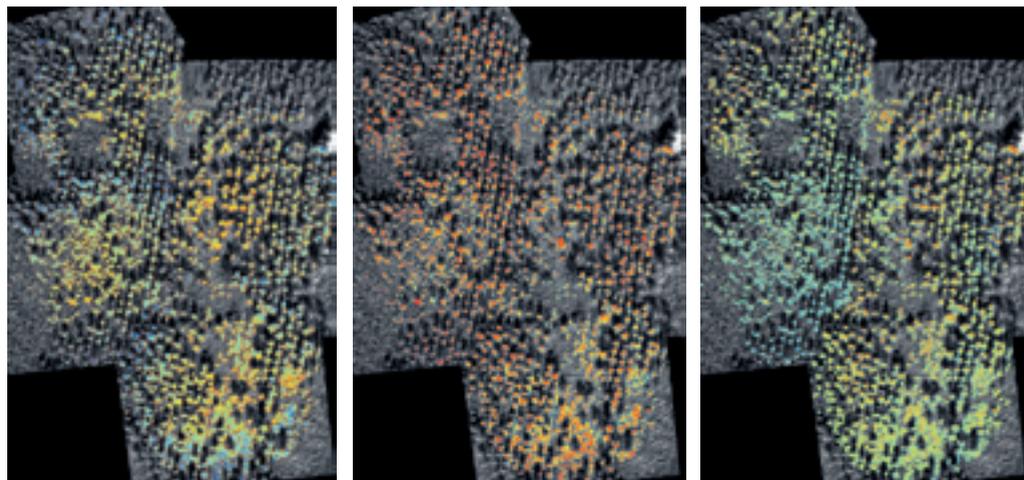


Figura 9.6. Izquierda, respuesta espectral de la vegetación verde, senescente y seca. Derecha, bandas espectrales utilizadas en los índices de vegetación ARI (concentración en antocianina), NDVI (actividad fotosintética) y PRI (eficiencia en el uso de la luz).

Muchos de estos índices fueron diseñados originalmente para trabajos con imágenes hiperespectrales y se calculan utilizando bandas espectrales estrechas (2 - 10 nm). Estos índices están diseñados específicamente para ver picos de absorción muy concretos y en la mayoría de las ocasiones, con rangos de variaciones muy pequeños, por lo que requieren datos y mediciones muy precisas.



Concentración de pigmentos: ARI-NIR.

Los valores más altos indican mayor concentración en antocianina.

Índices estructurales: NDVI.

Los valores más altos indican mayor actividad vegetativa.

Eficiencia en el uso de la luz: PRI.

Los valores más extremos indican menor eficiencia en el uso de la luz en los procesos de fotosíntesis.

Figura 9.7. Ejemplo de tres de los índices aplicados sobre las escenas multiespectrales Tetracam.

Como se observa en la Fig. 9.7, los índices calculados a partir de bandas espectrales cuyas diferencias en los valores de reflectividad son muy pequeños (PRI y ARI, Fig. 9.6 derecha), la información aportada queda enmascarada por las fuentes de ruido del sensor (vignetting, principalmente). Por ello, estos índices no se pueden considerar fiables cuando se calculan con imágenes de tan poca calidad radiométrica.

Sin embargo, otros índices en los que intervienen bandas espectrales con rangos amplios de valores de reflectividad, como el NDVI (Fig. 9.6 derecha), sí muestran una gradación de valores entre los árboles sanos y los enfermos.

9.6.3. Correlación con los datos de campo

Aunque en el momento de escribir este artículo no ha concluido el análisis de correlación entre los parámetros fisiológicos medidos en campo y los índices de vegetación derivados de las imágenes multiespectrales, lo que sí podemos afirmar del análisis a nivel de árbol es que existe un gradiente desde las zonas centrales de los claros, con presencia de árboles muertos y pies más dispersos, a las zonas de la plantación menos afectadas o sanas.

Como se ve en la Fig. 9.8, los valores de NDVI más altos se corresponden con los árboles con mayor vigor vegetal, situados en las zonas más densamente arboladas, mientras que los valores de NDVI más bajos se registran en los árboles más aislados en la zona central (muy afectada por la infestación) y en los bordes de los claros, situados en lo que sería el frente de avance del hongo.

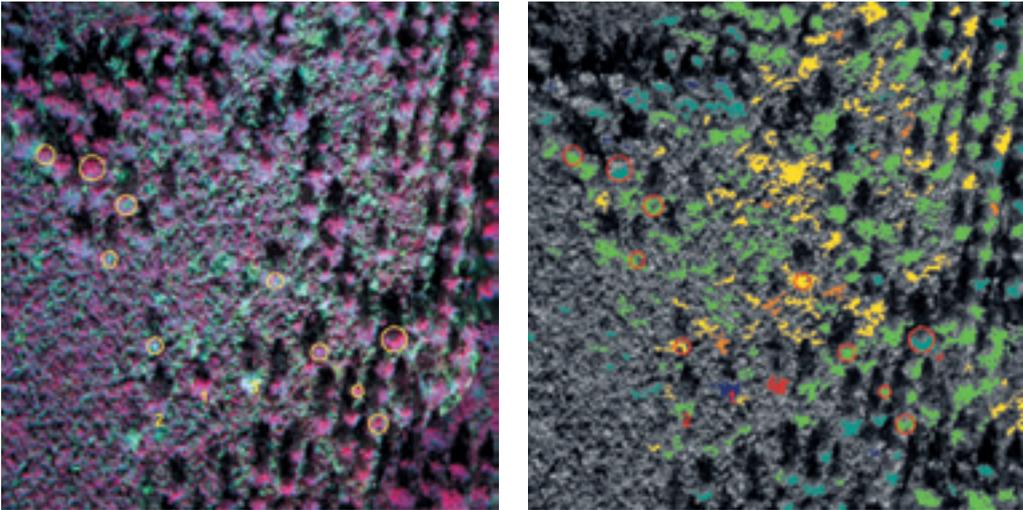


Imagen multiespectral Tetracam en composición en falso color RGB, bandas a 800, 670 y 550 nm.

Sobre la imagen se han representado con círculos en amarillo los árboles muestreados en campo.

Como referencia también se han indicado tres árboles fuera de la muestra:

- 1 *Pseudotsuga menziesii*.
- 2 *Pinus pinaster* aparentemente afectado con defoliación.
- 3 *Pinus pinaster* con las acículas secas.

Leyenda NDVI

Puntos de muestreo en campo

Valores medios NDVI

	0.55 - 0.60	– vigor vegetal
	0.60 - 0.65	
	0.65 - 0.70	
	0.70 - 0.75	
	0.75 - 0.80	
	0.80 - 0.85	+ vigor vegetal

Figura 9.8. Detalle de la zona de muestreo en campo (izquierda) y del NDVI (derecha) en la que se han señalado una serie de árboles de referencia.

9.7. Conclusiones

Las principales columnas a las que se ha llegado durante el desarrollo de los trabajos son los siguientes:

- Este proyecto ha permitido explorar el potencial de los datos RPAS junto con otros datos de observación de la Tierra en aplicaciones de sanidad forestal. Para este tipo de estudios, se recomienda hacer el seguimiento a escala regional de la masa forestal utilizando sensores multiespectrales a bordo de satélites, mientras que para el seguimiento frecuente, a escala local, de los puntos de interés, que requieran gran nivel de detalle, se recomienda el uso de sensores embarcados en RPAS.
- Los RPAS pueden ser una alternativa viable, tanto desde el punto de vista técnico, como económico, frente a los sensores aerotransportados y las imágenes de satélite de muy alta resolución espacial, en los casos en que la superficie a estudiar sea pequeña (decenas de hectáreas).
- A la hora de elegir esta tecnología, hay que valorar sus ventajas (alta disponibilidad, facilidad de operación) y sus inconvenientes, ligados a las limitaciones operacionales

(reducida autonomía, condiciones meteorológicas, limitaciones legales) y a la escasa oferta de sensores.

- Para aplicaciones de teledetección, es necesario desarrollar metodologías de trabajo adaptadas a las particularidades de este tipo de datos, incluyendo el proceso de captura y la preparación de las imágenes. También se requieren nuevas herramientas informáticas, que permitan su uso eficiente y rentable en un entorno productivo.

9.8. Agradecimientos

Este proyecto ha sido posible gracias al trabajo de coordinación y a la colaboración del Grupo de I+D+i del Grupo Tragsa y especialmente, a Asunción Roldán.

Agradecemos también el asesoramiento de la Dra. Alicia Palacios, de la ETSI de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, durante la fase de análisis de las imágenes e interpretación de resultados.

9.9. BIBLIOGRAFÍA

- GAMON, J.; PENUELAS, J. y FIELD, C. (1992): «*A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency*». Remote Sensing of Environment 41: 35-44.
- GITELSON, A.; MERZLYAK, M. y CHIVKUNOVA, O. (2001): «*Optical properties and non-destructive estimation of anthocyanin content in plant leaves*». Photochemistry and Photobiology 71: 38-45.
- HERNÁNDEZ, R. (2012): «*Detección de estrés en coníferas mediante teledetección hiperespectral y térmica de alta resolución y modelos de transferencia radiativa*». Tesis doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- LALIBERTE, A. S.; Goforth, M. A.; Steele, C. M. y Rango, A. (2011): «*Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: image processing workflows and applications for rangeland environments*». Remote Sensing, 2011, 3, 2529-255. ISSN 2072-4292.
- ROUSE, J.; HAAS, R.; SCHELL, J. y DEERING, D. (1973): «*Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*». Third ERTS Symposium, NASA: 309-317.

Luis M.ª BORDALLO ÁLVAREZ y Alexander BURWITZ SCHWEZOFF

NITROFIREX, S.L.

10.1. Introducción

Puede que sea el controvertido cambio climático o puede que sea la presión humana sobre el entorno natural o por ambos a la vez, pero lo cierto es que, año tras año, alarmantes noticias sobre devastadores incendios forestales acaparan los medios informativos. Los pasados veranos se pudieron ver como catastróficos incendios forestales asolaban EE. UU., Portugal, Canadá y, especialmente, España, en temporadas anteriores fueron Rusia, Bolivia, Israel, California, Australia o Grecia las que soportaban impotentes la devastación de su patrimonio natural y por desgracia en los años venideros es más que probable que se siga sufriendo esta moderna plaga que asola nuestros bosques.

Ante esta amarga realidad hay que preguntarse si tanto a nivel político como económico y técnico se están aportando los recursos necesarios para solucionar o, al menos, paliar tanto desastre. Por desgracia no cabe otra respuesta que una rotundamente negativa.

Según estimaciones del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) los incendios forestales suponen entre un 14 y un 20% de todo el CO₂ proyectado a la atmósfera anualmente, en cambio toda la actividad de la aviación comercial a nivel mundial significa un 2% de todas las emisiones. Pues bien, se está invirtiendo una gran cantidad de recursos políticos, económicos y científicos para reducir del 2% al 1% las emisiones de CO₂ que implica la actividad aérea comercial.

Un ejemplo de ello es el proyecto europeo *CLEANSKY*, con un presupuesto estimado en 1.600 millones de € y que trata de conseguir este objetivo obteniendo una mayor eficiencia de los motores, con el empleo de biocombustibles, con alas inteligentes, reduciendo el peso de los aviones, etc. y paradójicamente se realiza muy poco esfuerzo tecnológico en evitar o reducir ese 14 - 20% de emisiones que implican los incendios forestales, sobre todo con los medios aéreos que son los más versátiles y eficaces.

¿Cómo con la inquietud social que causan, preocupación política que suscitan y las cuantiosas pérdidas económicas que generan los incendios forestales, se utilizan tan pocos recursos tecnológicos para combatirlos con la mayor eficacia posible? ¿Cómo, por ejemplo, disponiendo de tecnologías que nos permiten literalmente «colar» por una ventana una bomba guiada, con 200 o 300 kg de explosivo, soltada por un caza a decenas de kilómetros, no se emplean esa misma tecnología para «descargar», de noche 2.000 o 3.000 litros de agua sobre una masa forestal en llamas?

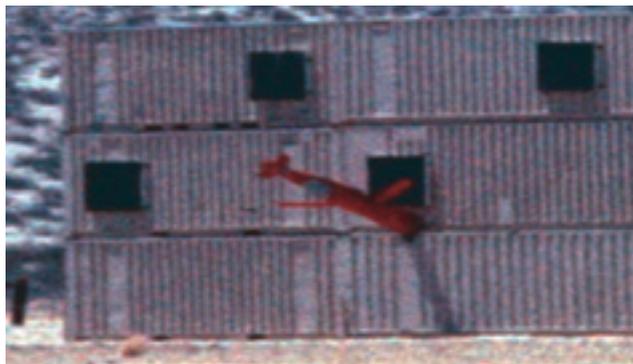


Figura 10.1. Bomba guiada.

¿Cómo en un sector de la aeronáutica que mueve anualmente tantos miles de millones a nivel mundial se sigue utilizando una operación de alto riesgo para las tripulaciones con métodos, técnicas y procedimientos desarrollados hace más de 60 años? ¿Cómo no se integran tecnologías disponibles para desarrollar la capacidad de descargar sobre el incendio más cantidad de agente extintor en menos tiempo, sin riesgo para las tripulaciones, a menor coste por litro lanzado pero sobre todo poder hacerlo de noche que es la gran carencia operativa de los medios aéreos actuales?

10.2. Estado del arte

Las aeronaves de ala fija empleadas en la actualidad en la extinción de incendios desde el aire, son principalmente turbohélices lentos que realizan sus descargas de manera aislada y por medios visuales en una operación de alto riesgo para las tripulaciones y que solo puede realizarse de orto a ocaso. Además en su mayoría son aviones de uso exclusivo para esta actividad.

Excepto en la plantas motrices que han pasado de pistón a turbinas, los medios aéreos empleados en la extinción de incendios han experimentado muy pocos avances técnicos desde su implantación después de la II Guerra Mundial a pesar de que en otras ramas de la aeronáutica los avances han sido espectaculares.

Ante esta perspectiva a nivel empresarial y académico existe gran inquietud por dar solución al problema, habiendo surgido durante la última década diferentes iniciativas. Un ejemplo de estas es el empleo de grandes aviones de transporte para ser capaces de lanzar mucha más cantidad de agua sobre los incendios, como son los dos DC-10 o el B-747 Jumbo empleados por la compañía americana Evergreen (<http://www.evergreen.com>)

Evidentemente, con estos aviones se logra descargar gran cantidad de agente extintor, pero dado su escasa maniobrabilidad a baja altura los entornos orográficos de operación se reducen en gran manera, además dado sus elevados tiempos de reacción y costos de operación no son efectivos para su empleo en «primer ataque» al fuego sino cuando el incendio ha adquirido grandes dimensiones.

Pero sobre todo lo que no soluciona el empleo de estos grandes aviones es la operación nocturna de extinción de incendios, dado su imposibilidad de operar por la noche en condiciones visuales a baja altura.

Otro proyecto igualmente dirigido a cambiar los métodos y técnicas empleados en la extinción de incendios forestales desde el aire es el *Precision Container Air Delivery System (PCADS)* apoyado por las compañías Boeing y Weyerhaeuser consistente en extraer con un paracaídas por la rampa trasera de aviones de carga pesados y sin ningún tipo de guía, una cadena de contenedores cúbicos de material biodegradables con un capacidad de 250 gal (unos 950 litros) de agente extintor, soltados a unos 500 pies sobre el nivel del terreno. Una vez en el aire y a unos doscientos pies sobre el suelo los contenedores se abren y esparcen su carga sobre el fuego (<http://www.flexiblealternatives.com/products/pcads>). Un sistema similar al anterior es el israelita *Caylym Guardian Deployment System* (<http://www.caylym.com/the-guardian/>) en este caso los contenedores se lanzan a unos 1.500 pies (sobre el nivel del terreno).

La precisión del punto de descarga efectuado por un paracaídas sin ningún tipo de guía en un entorno atmosférico adverso con vientos, turbulencias y corrientes térmicas producida por el mismo incendio no parece que sea suficiente para producir una acción extintora coordinada y eficaz, además este concepto entraña que todas los componentes sólidos del contenedor impactan contra el suelo y pueden producir daños al personal que se dedica a la extinción desde tierra o a personas y bienes en las inmediaciones del incendio, además todos estos componentes, aunque biodegradables, quedarían esparcidos a lo largo y ancho de la zona de extinción. Tampoco permitiría la operación nocturna dado la baja altura que implica su operación.

Igualmente auspiciado por la compañía Boeing, se propuso el uso de «*wáter bombs*» (*bomblets*), una especie de esfera/dodecaedros biodegradables llenos con 50 libras de agua (23 litros), de caída completamente libre, sin ningún tipo de guía, de los cuales un C-17 sería capaz de lanzar, por su rampa trasera hasta 2.800 por vuelo, soltados entre 1.000 y 2.000 pies sobre el incendio utilizando sistemas de calculo de trayectoria (web: http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2003/august/i_ids4.html).

Asumiendo que los sistemas de cálculo de trayectoria aporten suficiente precisión para que la caída se produzca en la zona asignada, este planteamiento implica el «impacto» de las bomblets contra la superficie a alta velocidad en su caída libre, por lo que en primer lugar entraña un evidente riesgo para los equipos de extinción terrestre así como para los bienes o personas existentes en las inmediaciones de incendio y en segundo lugar al producirse el impacto contra la superficie el agua producirá evidentemente acción extintora pero esta no será optima al no producirse la siempre deseada atomización y por tanto máxima transferencia de energía requerida para conseguir el máximo efecto extintor.

Este concepto, igual que en los dos anteriores, tampoco sería aplicable a la operación nocturna, por la baja altura de operación que implica, en el caso de incrementar la altura de suelta hasta una «altura de seguridad» disminuiría la precisión de los impactos y aumentaría todavía más los riesgos de la operación al aumentar la velocidad de impacto de las *water bombs*.

Otra aportación a la extinción de incendios es la realizada por la compañía española Embention que propone la utilización de «bombas guiadas», con 200 litros de agente extintor, guiados por GPS/INS e infrarrojos lanzados desde aviones o helicópteros. Aunque guiada, la trayectoria de las bombas es «balística corregida». Instantes antes del impacto contra la superficie la unidad de control se separa del cuerpo de la bomba y por medio de un paracaídas es recuperada para su reutilización (<http://www.embention.com/>)

Al no implicar bajas alturas de operación para los aviones o helicópteros que los lancen permite la operación de noche, pero igual que en el caso anterior implica el impacto de objetos con alta energía contra la superficie, en este caso de más de 200 kg, por lo que las mismas consideraciones sobre la seguridad de las personas o bienes o la no optimización de la acción extintora que se han visto en las propuestas anteriores pueden ser igualmente asumidas.

Por otra parte a la cantidad de 200 litros por bomba parece del todo insuficiente para producir una acción extintora efectiva sobre el frente de llamas de un incendio forestal a no ser que se empleen de manera masiva y simultánea centenares de ellas (para conseguir una capacidad de descarga de agente extintor sobre el incendio equivalente a los medios actuales) con lo que se agravarían los anteriormente mencionados problemas de seguridad en tierra además de la nada deseable dispersión, desde el punto de vista ecológico, en las zonas afectadas por los incendios de miles carcacas de bombas.

Por ultimo la compañía española Singular Aircraft propone un hidroavión bimotor de hélice no tripulado con una carga útil de 1.500 - 2.000 litros (en su configuración de extinción de incendios) y una velocidad de operación de 130 knots para aplicarlo entre otros empleos a la extinción nocturna de incendios forestales (<http://www.singularaircraft.com>).

La operación de toma de agua en el mar o en un pantano de un hidroavión no tripulado, tanto de día como de noche, presenta hoy por hoy problemas de seguridad y regulación de difícil solución en el mundo de los UAV. Si su empleo fuera terrestre, dado su carga útil y su velocidad de operación debería ser desplegado y empleado en gran numero simultáneamente para aportar una capacidad de descarga de agente extintor similar a los medios aéreos diurnos actuales, con lo que encarece su empleo y complica su operación.

10.3. El concepto NITROFIREX

La madurez de las tecnologías para el guiado y control de los Sistemas Aéreos no Tripulados (UAV) permite plantear innovadoras opciones operativas como es la capacidad de «rociar» (un líquido) o esparcir (un sólido en polvo) una cantidad importante de agente en un punto programado de la atmósfera.

Es el caso de NITROFIREX, un innovador proyecto español que integra tecnologías de la industria de Defensa para alcanzar esta capacidad operativa que puede ser de aplicación en la lucha contra incendios forestales, en el combate contra una emergencia atómica, química o biológicas, para actuar en fenómenos meteorológicos (provocar lluvia, evitar pedrisco, diseminar nieblas) para luchar contra plagas o sembrar en lugares remotos y/o inaccesibles e incluso para la fumigación nocturna de plantaciones de droga.

De todas estas posibles aplicaciones la extinción de incendios forestales es, debido al daño ecológico que ocasiona, a la alarma social que genera y a las pérdidas humanas y económicas que producen, la que el proyecto NITROFIREX pretende desarrollar con máxima prioridad, sobre todo su empleo nocturno planteado como necesario complemento de los medios aéreos de lucha contra incendios diurnos.

La capacidad de transportar gran cantidad de carga útil (agente extintor en caso de los incendios forestales) a la zona de operaciones lo realizan aviones de transporte pesado que estén diseñados para acarrear gran cantidad de carga de pago a gran velocidad y a un coste por unidad transportada muy inferior a un avión pequeño.

Lo que NITROFIREX efectúa es transportar esa carga útil desde el avión de transporte al punto programado de suelta (rociado o espolvoreado) y posteriormente recupera el vehículo para su reutilización.

Por ello el concepto NITROFIREX consiste en unos Depósitos Planeadores Autónomos (DPA) no tripulados que contienen una cantidad de 2.500 ± 250 litros de carga útil. Tras ser lanzados desde la rampa trasera de aviones de transporte pesado, que actúan como Avión Lanzador (AL) se dirigen autónomamente al foco del incendio para descargar su contenido con gran precisión y recuperarse posteriormente a base mediante un pequeño motor a reacción Fig. 10.2.



Figura 10.2. Depósitos planeadores Autónomos.

Una vez efectuada la descarga del agente extintor sobre el incendio, estos depósitos son recuperados mediante una maniobra de «escape» de la zona de peligro aprovechando tanto su gran y repentina pérdida de peso como su velocidad remanente.

Antes de alcanzar el punto más alto de la maniobra de escape el vehículo, ya vacío, comienza a propulsarse con su reactor lo que le permite retornar autónomamente a la base de operaciones del avión lanzador para estar disponible lo antes posible.

10.4. Proyecto NITROFIREX

Aunque como citábamos en el párrafo anterior el concepto es de amplia aplicación, NITROFIREX es un proyecto completamente innovador encaminado a la extinción de incendios forestales desde el aire por la noche.

Como veíamos, el elemento principal a emplear son DPA lanzados a media cota, por la rampa trasera de la bodega de carga de aviones de transporte pesado, como pueden ser los C-130 Hércules, AN-12, KC-390, A-400M, IL-76, C-17 o incluso aviones con mayor capacidad de carga, que actúan como AL.

Estos depósitos conteniendo agente extintor, tienen capacidad de planeo y están dotados de un sistema de guiado (satélite, inercial e infrarrojos) para dirigirse de manera autónoma a la zona incendiada y descargar su contenido en el foco del incendio, de manera secuencial con gran precisión.



Figura 10.3. Avión de transporte de los DPAs.

Principalmente por seguridad, pero también por economía, los «Depósitos Planeadores» son recuperables.

Una vez efectuada la «suelta» de su carga útil de agente extintor sobre el incendio, el depósito planeador efectúa una maniobra de «escape» de la zona de peligro aprovechando tanto su gran y repentina pérdida de peso como su velocidad remanente, finalizada la cual el depósito planeador vacío se transforma, gracias a la activación de un pequeño motor que lo propulsa, en un UAV cuyo objetivo es recuperarse autónomamente a la base de operación del avión lanzador para ser reutilizado lo antes posible.

En definitiva, el DPA vuela durante no más de 90 segundos desde el avión lanzador al punto de descarga sobre el incendio como una bomba guiada, con más carga útil, más superficie alar e igual capacidad de planeo y guía, y como un UAV que navega de noche, a 1.000 pies sobre el suelo y 70 knots de velocidad, desde la finalización del «escape» a la toma de tierra.



Figura 10.4. Descarga de un DPA sobre un incendio.



Figura 10.5. Aterrizaje de un DPA en la base de operaciones del avión lanzador.

En modo alguno el proyecto NITROFIREX pretende sustituir a los medios aéreos diurnos, que han demostrado su eficacia durante décadas, sino ser su complemento nocturno para conseguir que el combate contra los incendios forestales desde el aire sea H-24 («*non stop fighting*») y aprovechar, como bien saben las esforzadas tripulaciones que a ello se dedican, las mejores condiciones meteorológicas que para ello ofrece la noche.

En los gráficos de las Figs. 10.6 a 10.8 se puede analizar las ventajas que tanto desde el punto de vista operativo (litros lanzados por hora de operación) como económico (litros lanzados por hora de vuelo y coste del litro lanzado) y según los tipos de AL utilizados, aporta el desarrollo del concepto NITROFIREX.

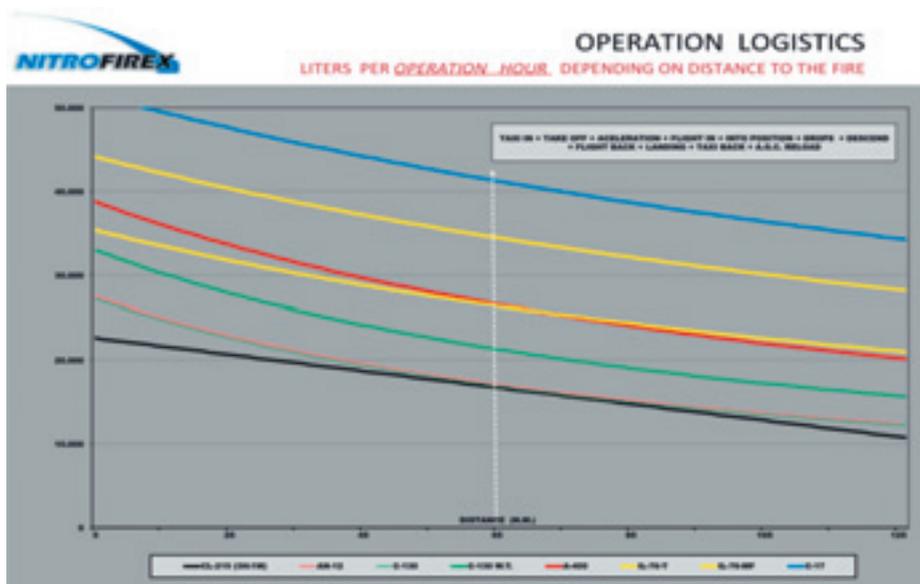


Figura 10.6.

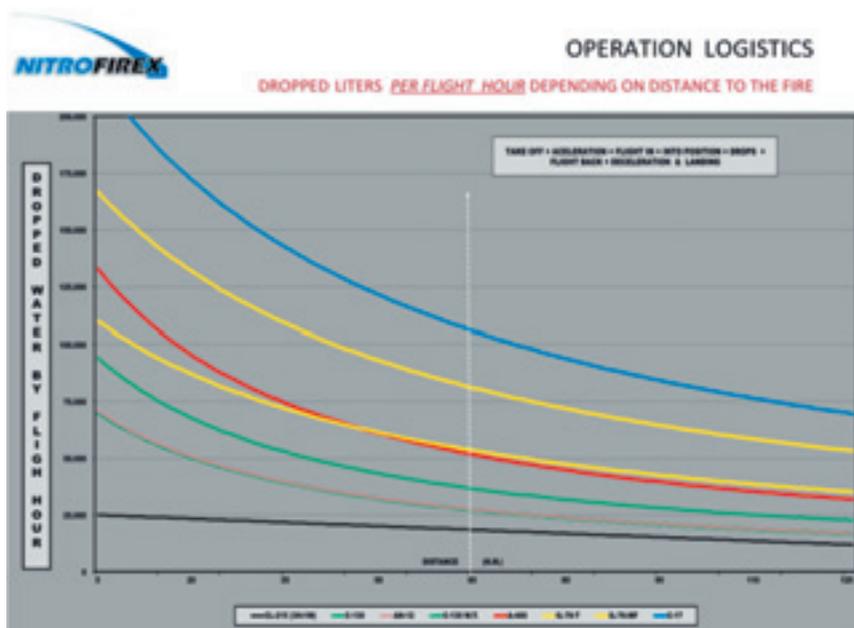


Figura 10.7.

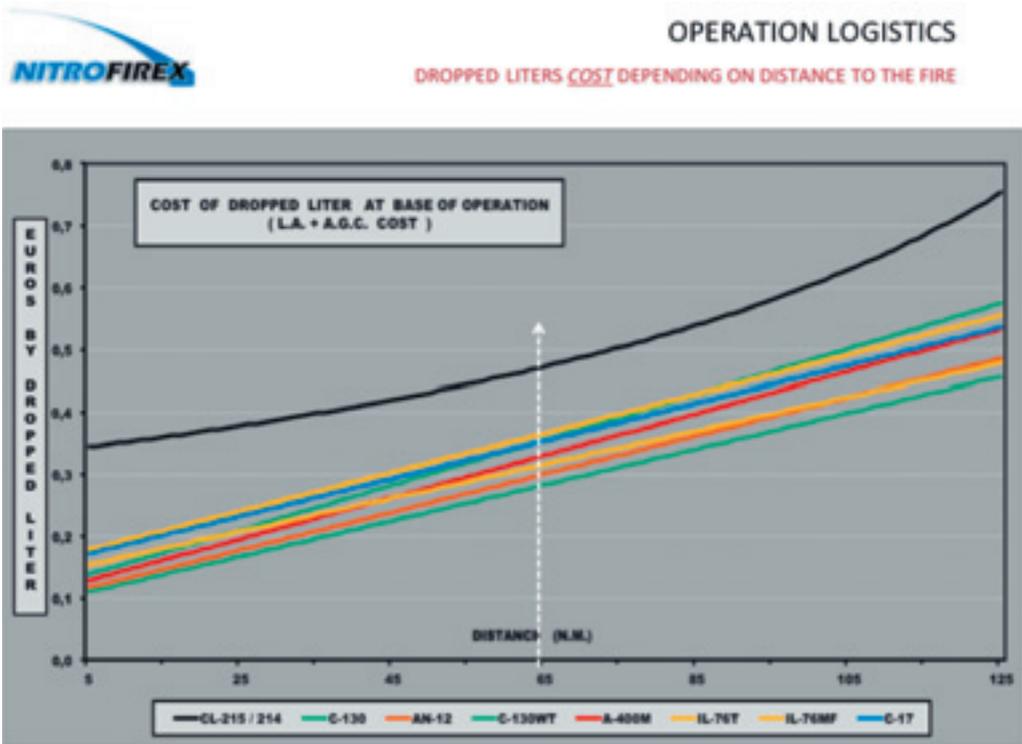


Figura 10.8.

10.5. Despliegue operativo

Dado la capacidad de carga y velocidad de desplazamiento que aportan los AL propuesto por NITROFIREX implica una nueva concepción del despliegue operacional, incluiría una base regional de operaciones que podría estar situada estratégicamente acorde al área de operaciones.

Si se plantea una operación supranacional, bases idóneas para cubrir toda la cuenca mediterránea podrían ser Marsella en Francia u Olbia en Cerdeña, aeropuerto desde los que sería posible volar en el mismo día a cualquier otro aeropuerto de alguno de los país de la citada cuenca, dado que al ser nocturno el planteamiento operativo y complementario de los medios aéreos convencionales, el AL en condiciones normales dispondría de más de medio día para desplegarse al aeropuerto disponible más cercano al incendio y estar al ocaso completamente listo para iniciar las operaciones.



Figura 10.9. Base en Marsella.

Los DPA se transportarían desde la base regional de operaciones a la base de despliegue (aeropuerto, base aérea o aeródromo disponible más cercano al incendio), en las bodegas de carga de los AL en un «rack» o estantería diseñado al efecto para poder llevar dos juegos de DPA vacíos estibados en dos niveles. Posteriormente, durante el despliegue, este mismo «rack» es el que se usaría para la rápida recuperación (revisión, repostaje, llenado de agua y estiba) de los DPA que regresan del incendio.

Una vez activada la alarma por incendio forestal, el AL se posicionarían a la «base de despliegue», donde iniciaría la operación descargando el «rack» con los DPA vacíos y resto de equipamiento necesario, procediendo a continuación a preparar el primer juego DPA (nivel inferior del «rack») llenándolos del agente extintor que se volverían a estibar en el AL dejándolos listo para el despegue al ocafo.

Al anochecer se desplazaría a las inmediaciones del incendio y en una acción coordinada con los medios terrestres, a los que debe proporcionar apoyo directo, comenzaría a lanzar los DPA, en grupos, con «angle off» de 90° con respecto al frente del incendio, con objeto de que nada más salir del AL los DPA viren 90°, como en una «rotura» y se dirijan en «pescadilla» al incendio donde descargarían el agente extintor en la zona prefijada por el director de extinción maximizando su eficacia al solapar su descargas. El avión lanzador volvería a la base para embarcar el segundo juego de DPA y regresar de nuevo a las proximidades del incendio manteniendo así un ataque continuo sin tregua o atacar más de un fuego simultáneamente. Los DPA se recuperarían en la base de operaciones autónomamente tras cada descarga.

A modo de ejemplo, podemos considerar la operación de un A-400 con una capacidad de carga de 12 DPA, llenos, con lo que se desplazaría a la base de operación con el «rack» llevando 24 depósitos vacíos, al ocafo empezaría a realizar vuelos lanzando en cada uno de ellos 12 depósitos llenos de agente extintor y volviendo rápidamente a por los otros doce. En el caso del A-400 la carga útil de cada DPA sería de 2.583 litros con lo que podemos establecer que un vuelo de A-400 equivaldría aproximadamente a 6 descargas de aviones Canadair CL-125/415. A una distancia de 120 km (65 N.M.) entre la base de operación y el incendio un A-400 puede realizar 9 vuelos en una noche descargando 12 DPA en cada vuelo.

Según los análisis operativos realizados por NITROFIREX, asumiendo unos coeficientes de revisión y estiba para los DPA iguales para todos los AL propuestos, se puede establecer

que, disponiendo de un AL y sus dos correspondientes juegos de DPA, siempre que la distancia entre el incendio y la base de operación sea igual o inferior a 120 km (65 N.M.), se puede establecer el «turn around» de los AL y de los DPA de manera que no se produzcan retrasos en la operación de los AL por falta de DPA disponibles para su estiba en la base de despliegue.

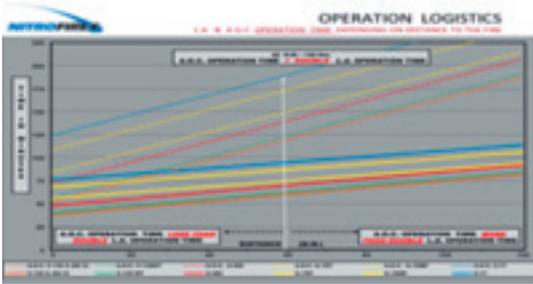


Figura 10.10.



Figura 10.11. Bases de despegue.

10.6. Optimización de las descargas

Los medios aéreos empleados actualmente en la extinción de incendios forestales realizan las descargas de agente extintor sobre la zona a extinguir o a enfriar de manera totalmente manual, dependiendo por tanto de la experiencia y habilidad del binomio piloto/coordinador el que la eficacia de la descarga sea la óptima a efectos de extinción o enfriamiento.

Si la descarga se efectúa a excesiva altura, el agua se atomiza en su caída y por el efecto de la ascendencia térmica no llega a alcanzar el núcleo del fuego con lo que su acción extintora se reduce notablemente pudiendo llegar a ser en algunos casos nula. Si por el contrario la descarga es excesivamente baja el agua alcanza la superficie todavía compactada, sin atomizarse totalmente, haciendo que capacidad de extinción no sea óptima.

Cuando la descarga se realiza a la altura adecuada se consigue que la mayor parte de agua atomizada alcance el núcleo de fuego y con ello se obtiene la máxima transferencia de energía entre el fuego y el agua por lo que la acción extintora de la masa de agua se puede considerar óptima.

Los factores fundamentales para la descarga son la altura sobre el terreno y la velocidad de la aeronave en el punto de descarga. Contando con estos dos parámetros fundamentales, se puede optimizar el tamaño mínimo de las gotas a la llegada al suelo dependiendo de la estrategia de lanzamiento deseada.

Otros parámetros a considerar a la hora de optimizar la descarga son el ángulo de picado en el momento de la suelta y el empleo de espesantes para variar la tensión superficial del agua y poder actuar sobre el tamaño de la gota de agua en el momento de la atomización para conseguir una mayor energía cinética de esta, asegurándose así una mayor capacidad de penetración en el núcleo del fuego.

En el proyecto NITROFIREX, los DPA efectuarán la descarga de manera completamente automática por lo que nos debemos plantear la búsqueda a priori de unos parámetros de suelta (altura, velocidad, ángulo de picado, tensión superficial) con el fin de conseguir la máxima eficacia de la descarga.

La «suelta» de una masa de agua considerable, miles de litros, desde un vehículo aéreo, un avión, helicóptero o DPA, a una velocidad relativamente alta se puede estudiar inicialmente desde el punto de vista teórico como un problema de dinámica de fluidos con objeto de establecer un modelo matemático que permita establecer los parámetros óptimos de la descarga.

La idea consiste en establecer un modelo simplificado a fin de optimizar la operación, para lo cual hay que tener en cuenta que se trata de flujos bifásicos (aire-agua), turbulentos y con diferentes zonas dentro de un mismo penacho de agua. Los principales parámetros que determinan la naturaleza del problema son los números adimensionales de Reynolds (turbulencia) y Weber (efectos de la tensión superficial), que pueden considerarse infinitos a efectos prácticos en la zona de salida o compuerta de la descarga del depósito planeador.

El problema de la descarga se puede dividir en varias regiones desde el depósito al suelo: la primera región se puede considerar de flujo potencial justo en la salida del depósito planeador, a la que sigue una región en la que se realiza una atomización primaria y se consigue el diámetro de gotas más pequeño, y se comienza a configurar una zona donde predomina una inestabilidad de tipo Rayleigh-Taylor, tras la que se produce una zona de atomización secundaria y donde el tamaño de gotas es algo mayor por la disminución de velocidad del penacho de agua. De esta manera, conociendo parámetros tales como velocidad, altura y ángulo de picado, se puede estimar un promedio o distribución estadística del tamaño de las gotas y por tanto ajustar esta distribución para realizar la descarga de agua más efectiva para cada momento.

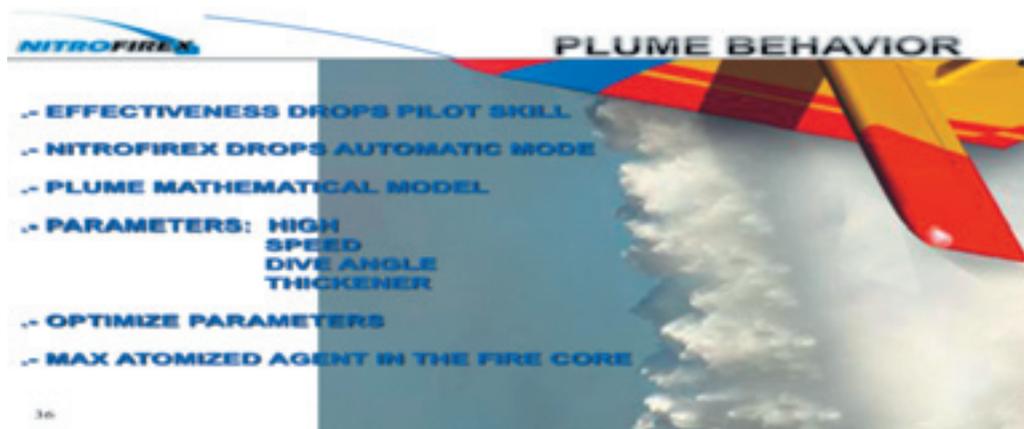


Figura 10.12. Problemas de la descarga.

El estudio para la optimización de la descarga es un proceso que requiere tanto investigación básica en mecánica de fluidos como investigación aplicada, y que puede ayudar también a mejorar la operación de los medios aéreos convencionales.

10.7. Coordinación y seguridad

Los que se dedican a las labores de extinción de incendios desde el aire saben la importancia que, para la eficacia de la operación, tiene una correcta coordinación con los equipos de tierra. Por ello en el entorno de operación nocturna propuesto por NITROFIREX los protocolos de ejecución y normas de comunicación con los equipos de tierra necesitan adaptarse a los nuevos requerimientos y capacidades operativas.

Deberán, por tanto, ser los jefes de extinción los que mantengan contacto por radio con los AL y la base de despliegue al objeto de coordinar toda la operación, principalmente, los puntos de espera de los AL así como las rutas de aproximación y puntos de descarga de los DPA.

Asimismo adquiere gran importancia de noche que los equipos de tierra puedan ver la aproximación y descarga de los DPA por ello estos irán equipados además de las luces estándar de cualquier aeronave (luces de navegación, *beacon*, estroboscópicas y logo), con luces de iluminación del fuselaje y con potentes faros enfocados hacia delante y situados en la punta de los planos con objeto de que los equipos de tierra puedan apreciar la distancia y velocidad de acercamiento al punto de suelta y hacia atrás con objeto igualmente de que los equipos de tierra puedan ver con claridad el punto de la descarga de agua y su efecto extintor.

En cualquier tipo de operación aérea la seguridad es un factor primordial a la hora de planificarla, por lo que NITROFIREX no es ajeno a ello. Consecuentemente los DPA, tanto en su fase de aproximación a la descarga como en su fase de recuperación a la base tendrán sus parámetros de vuelo programados y deberán realizarlos de manera autónoma y automática, pero el concepto de seguridad «*one man in the loop*» para abortar la descarga o reprogramar la ruta de recuperación se consideran primordiales para la seguridad de la operación.

Por lo tanto, durante la fase de aproximación, los DPA tendrán capacidad, manual o automática de abortar su aproximación al punto de descarga, realizando la suelta del agente extintor en el punto de aborto y pasando automáticamente a la fase de escape y recuperación.

El aborto puede ser manual, ejecutado por los operadores de los DPA en la base de despliegue o en el AL y decidido por cualquiera de ellos o por el jefe de extinción, si su trayectoria de vuelo se desvía de la establecida o cualquier imprevisto durante la aproximación al punto de suelta aconseja no continuar con esta. O automático realizado por el DPA si su trayectoria de vuelo no coincide con la programada o se aproximase a la superficie en una altura y/o localización no deseada.



Figura 10.13. Medidas de seguridad.

De cualquier manera un DPA nunca alcanza la superficie lleno de agente extintor, si algo no va según lo programado suelta su carga útil donde se encuentre y pasa a recuperarse.

Por otra parte la ruta de regreso de los DPA a la base de despliegue será programada (se tiene todo el día para ello) de noche a 1.000 pies o inferior y por zonas no habitadas, de tal manera que ante la eventualidad de que se le parase el motor durante el regreso el DPA ira equipado con un paracaídas y airbag que se desplegaría automáticamente y le permitiría realizar un *soft landing* sin causar ningún daño.

10.8. Regulacion tecnica de la operación de los UAV

Hoy por hoy, el gran escollo para la operación de los UAV en operaciones aéreas de carácter puramente civiles es la falta de regulación y normativa para poder operar en un mismo espacio aéreo aeronaves tripuladas y no tripuladas. Con objeto de favorecer el desarrollo de dicha normativa se han establecido a nivel internacional dos tipos básico de operación de los UAV, que son: VLOS y BVLOS.

VLOS son aquellos UAV que operan en condiciones de *Visual Line Of Sight* es decir, en todo momento, hay contacto visual entre el vehículo y el operador siendo este el responsable de evitar cualquier situación que pueda suponer un peligro para otro vehículo Aero (tripulado o no) o personas o bienes en al superficie. La regulación internacional de los UAV volando en condiciones VLOS se prevé que este disponibles para el año 2015 ya que no presenta mayores inconvenientes técnicos y regulatorias siendo el operador y único responsable de la seguridad del vuelo.

BVLOS son aquellos UAV que operan en condiciones de «*Beyond Visual Line Of Sight*» es decir que dados las distancias y altitudes requeridas para su empleo el operador pierde contacto visual con el vehículo aunque lógicamente mantenga contacto/control electrónico del mismo. Estos UAV suelen tener gran autonomía de vuelo y requieren normalmente espacios aéreos y altitudes de operación en los que vuelan aviones tripulados.

Por ello, su regulación se presenta compleja y problemática al haber mas «comensales» implicados, operador de UAV, servicios de trafico aéreo y pilotos de aviones tripulados requiriendo mayores exigencias tecnológicas y regulatorias.

Lógicamente NITROFIREX está dentro de este segundo grupo de UAV operando «mas allá de la línea de vista», pero el espacio aéreo requerido para la operación propuesta por el proyecto NITROFIREX es realmente marginal, no más de 90 segundos como depósitos planeadores llenos, en un entorno de altura y distancia no superiores a 6.000 pies y 6 NM respecto al incendio en un espacio aéreo «segregado» por causa del incendio y posteriormente no más de una hora navegando entre el incendio y la base de operación del avión lanzador, como UAV vacíos, a 1.000 pies o inferior sobre el suelo.

¿Que avión tripulado puede estar volando por la noche en el entorno propuesto, es decir a una altura de 1.000 pies o inferior sobre el suelo, entre un incendio y la base de operación del AL? Es por ello por lo que se plantea precisamente la operación exclusivamente nocturna, para que su regulación sirva de peldaño inicial para la futura reglamentación de la operación de otros UAV en un entorno civil que requieren mucho mas tiempo de vuelo y espacio aéreo para sus maniobras.

Por todo lo anterior, y en un contexto de regulatorio de BVLOS, el perfil del vuelo de recuperación de los DPA propuesto por NITROFIREX debería ser el primero en regularse ya que las horas de operación y espacio aéreo requerido no puede afectar a tráficos tripulados, sirviendo para validar de manera segura y eficaz el empleo de UAV en un entorno civil de BVLOS y a su vez aprovechar como «punta de lanza» para posteriormente regular operaciones BVLOS en capas superiores de espacio aéreo donde los requerimientos seguridad y coordinación son muy superiores debido a las altitudes y tiempos de vuelo necesarios para la operación de los UAV.

En una palabra, si en una operación BVLOS el bajo perfil de vuelo propuesto por NITROFIREX no es regulado, difícilmente se podrán regularse perfiles que requieren mucha mas altitud y tiempo de permanencia.

10.9. Perspectiva socio/política de la operación de los UAV

Debido a la madurez de las tecnologías aplicadas en los UAV y su demostrada capacidad operativa en aplicaciones militares la implantación de los vehículos aéreos no tripulados en el mercado civil de trabajos o vigilancia aéreos es imparable dado que su eficacia operativa y eficiencia económica son mucho mayores a los realizados por aviones tripulados.

Pero precisamente por su origen militar así como que principalmente los UAV están pensados y diseñados para labores de inteligencia, reconocimiento y vigilancia, su empleo en entornos puramente civiles genera todo tipo de recelos y desconfianzas tanto a nivel social como político y mediático, argumentando que dicha operación puede afectar a la seguridad y/o a la privacidad de las personas.

Como veíamos en el epígrafe anterior la gran mayoría de los casos en los que se pretende el uso puramente civil de UAV en el entorno operación de «mas allá de la línea de vista», requieren un perfil de misión de decenas de horas de vuelo a varios miles de metros sobre las áreas a reconocer o vigilar.

Todo ello podría suponer un hipotético riesgo para el tráfico aéreo o para la seguridad de las personas en caso de que el UAV se precipitase por avería en zona habitada e igualmente podría suponer un atentado a la intimidad de las mismas si la información obtenida por los sensores electroópticos de estos vehículos no estuviera debidamente controlada y regulada por las autoridades competentes. Por ello la operación civil de los UAV volando en entorno BVLOS demanda tanto una regulación técnica como una legislación específica que le permitan superar estas barreras.

De manera análoga al planteamiento del epígrafe anterior el perfil de vuelo que plantean los DPA de NITROFIREX, de noche a 1.000 pies o inferior y por zonas no habitadas, no supone ningún riesgo para las personas ni puede afectar a su vida privada, por lo que sus requerimientos regulatorios serían mucho más simples que en los supuestos anteriores.

Tanto a nivel social como político y mediático, el desarrollo operacional del concepto NITROFIREX, supondría validar el empleo civil de los UAV en funciones de evidente utilidad pública, como la extinción nocturna de incendios forestales, sin que ello pueda suponer peligro alguno o menoscabo de la privacidad ciudadana, y debería servir como «punta de lanza» para la posterior regulación de los UAV en otras operaciones de carácter civil que demanden más tiempo, espacio y altitud.

10.10. La industria aeronáutica española y los UAV

En el incipiente y prometedor mundo de los UAV, tanto las empresas aeronáuticas como los diferentes gobiernos y organismos procuran tomar posiciones con objeto de estar bien situados en la apasionante carrera por el futuro mercado, civil y militar, que las múltiples aplicaciones de los vehículos aéreos sin pilotos pueden aportar.

Por supuesto España con su industria aeronáutica y sus organismos oficiales, participa en esta carrera con diferentes productos e iniciativas. Pero por un lado la profunda crisis económica y por otro la falta de regulación hacen que a corto y medio plazo el futuro de los UAV en nuestro país sea bastante incierto.

Además, en una profunda crisis económica como ésta, los presupuestos de defensa y seguridad son los primeros que se resienten y ajustan, por lo que en las circunstancias actuales, la industria española de los UAV debería recurrir a proyectos de carácter ecológico y apelar al respaldo social y político que estos temas suscitan a fin de encontrar el apoyo económico y el soporte institucional que le permitan mantener viva su participación en el desarrollo del naciente mundo de los vehículos aéreos no tripulados, posponiendo para tiempos mejores otros proyectos más caros y complejos.

Por todo lo anterior y ante las circunstancias actuales, el planteamiento debe ser el de buscar proyectos cuyo coste no sea demasiado elevado y que plantean su operación

en «espacios aéreos marginales» con el fin de que las objeciones de los organismos reguladores sean las mínimas posibles.

El proyecto NITROFIREX reúne todas las connotaciones citadas en los párrafos anteriores. Como vehículo aéreo es «lo menos que se despacha», evidentemente debe «volar» tanto en su fase de depósito planeador como de UAV propiamente dicho y por supuesto debe navegar y soltar su carga útil según lo programado, pero poco más; en modo alguno se plantea una aeronave o vehículo con alto rendimiento aerodinámico o de elevadas performance aeronáuticas, por lo que el estudio, desarrollo y coste final del mismo en ningún modo debe alcanzar al de otros proyectos con objetivos técnicos y operativos muchos más exigentes.

Además teniendo en cuenta las circunstancias actuales, les compete a los organismos y empresas involucrados en el desarrollo de UAV el invocar las pérdidas económicas, la preocupación política y la alarma social que los incendios forestales generan a fin de conseguir el apoyo económico y sobre todo político que un proyecto de esta índole necesita para su desarrollo.

Dada su relativa simplicidad técnica y su mínimo requerimiento normativo comparados con los de otros proyectos de UAV, el proyecto NITROFIREX puede y debe ser abordado en solitario por la industria aeronáutica española, sin tener que recurrir a complejas y problemáticas alianzas internacionales, permitiendo a nuestras empresas, en momentos tan difíciles como los actuales, hacerse un hueco en el complejo y competitivo mundo de los vehículos aéreos no tripulados, sirviendo de punta de lanza de la industria aeronáutica española que le permita estar posicionada favorablemente en el mercado mundial de UAV para cuando la normativa internacional regule el tráfico aéreo para el empleo civil de este tipo vehículos.

NITROFIREX se ha presentado en Madrid en la cumbre española de vehículos no tripulados UNVEX-12 y en la feria de Defensa y Seguridad HOMSEC13 habiendo despertado, en ambos casos, gran interés entre organismos oficiales (españoles y europeos) y empresas privadas del sector dada la exclusividad y originalidad de su planteamiento tanto a nivel operativo como técnico.

En estos eventos que patente que mientras la gran mayoría de los UAV están concebidos para empleos militares o para-militares y consecuentemente diseñados para transportar carga tecnológica compuesta por sensores y/o cámaras con objeto de obtener y/o transmitir información y van normalmente pintados de colores discretos sin ningún tipo de iluminación para no ser vistos y/o detectados.

Por el contrario los DPA de NITROFIREX están pensados para aplicaciones prioritariamente civiles y concebidos para rociar/espolvorear cantidades importantes de sustancias no tecnológicas en un punto programado de la atmósfera y van lógicamente pintados de colores llamativos e iluminados (vuelo nocturno) o señalizados con generadores de humo (vuelo diurno) precisamente para ser visibles por todos los agentes implicados en la operación.

Igualmente hizo su presentación en el *International Aerial Fire Fighting Meetig*, en Aix-en-Provence (Marsella) en abril pasado, despertando igualmente interés entre

la comunidad aeronáutica internacional de extinción de incendios, quedando patente en dicho evento la importancia e inquietud que la operación nocturna suscita y la necesidad de afrontarla con seguridad y eficacia al ser al ser la gran carencia operacional de los efectivos aéreos.

La compañía NITROFIREX tiene desarrollada la fase conceptual del proyecto tanto a nivel técnico como operativo o económico encontrándose en fase de consolidación de acuerdos con socios industrial/tecnológicos para afrontar en primera fase la realización de un demostrador de concepto y posteriormente el desarrollo del Proyecto.

Asimismo el concepto NITROFIREX esta patentado en aquellos países que teniendo capacidad económica y aeronáutica para afrontar este tipo de proyectos tienen además problemas graves de incendios forestales, como son EE.UU., Canadá, Australia, Federación Rusa y Europa (España, Francia, Italia, Alemania, Inglaterra, Suiza y Suecia). Además NITROFIREX es miembro del organismo Europeo EUROCAE y lidera el grupo de trabajo GW93 para redactar la normativa correspondiente a la primera fase que regula el vuelo de UAS en espacio aéreo no segregado en Europa.

10.11. Conclusiones

Cuando tanto a nivel político como social y económico, la ecología es un tema candente en todas su vertientes (cambio climático, emisiones de CO₂, deforestación, etc.), carece de sentido que, en pleno siglo XXI, con las tecnologías que hay disponibles no nos hayamos preocupado de integrarlas para poder combatir los incendios forestales por la noche.

El empleo de depósitos planeadores autónomamente guiados, como los propuestos en el Proyecto NITROFIREX, permiten la operación nocturna desde el aire en la extinción de incendios forestales, eliminando los riesgos para las tripulaciones y aumentando la precisión y concentración de las descargas, además de incrementar la cantidad de agua lanzada tanto por hora de operación como por hora de vuelo y abaratar el coste del litro lanzado con respecto a los medios aéreos empleados en la actualidad.

Además, al ser los aviones lanzadores aviones de transporte pesados no exclusivos, es decir, que pueden seguir volando como cargueros pesados el resto del año una vez concluida la campaña estival de incendios forestales, permite disminuir en gran medida el coste final por hora de vuelo realizada (un avión dos misiones) tanto en las realizadas en tareas de extinción de incendios así como en las efectuadas como transporte (amortización, mantenimiento, abastecimiento, personal, etc.).

Con la ingente cantidad de recursos económicos que estas flotas mueven a nivel mundial, no deja de ser una paradoja que la industria aeronáutica a nivel nacional o internacional no se haya planteado invertir para modernizar la operación la extinción de incendios forestales además evitar riesgos a las tripulaciones que lo realizan.

Las tecnologías están desarrolladas, maduras y disponibles desde hace tiempo, sólo hay que conseguir su integración para el objetivo que nos atañe y preocupa. Compete por tanto, a los responsables políticos y técnicos de la operación asumir la gravedad del

problema y plantear una nueva estrategia ante el daño ecológico, la pérdida económica y la alarma social que producen los incendios forestales, y al mundo empresarial y académico aceptar el reto que supone en I+D+i un proyecto de esta índole y envergadura.

Dado que la integración que se pretende parte de tecnologías ya desarrolladas, el proyecto podría llevarse a cabo por la industria española. Por ello NITROFIREX busca inicialmente el apoyo de empresas nacionales lo que permitiría a España colocarse en una situación privilegiada dentro del incipiente mundo de las aeronaves no tripuladas y le aportaría una ventaja tecnológica respecto a otros países.

Los trabajos aéreos de extinción de incendios son realizados por flotas de aviones mayoritariamente lentos, que operan solo en condiciones visuales, en una operación de alto riesgo para las tripulaciones, y utilizando técnicas y procedimientos desarrollados hace más de 60 años. Se trata de aportando e integrando medios técnicos y tecnológicos disponibles, desarrollar la capacidad de descargar sobre el incendio más cantidad de agente extintor en menos tiempo; pero sobre todo poder hacerlo de noche que es la gran carencia operativa de los medios aéreos actuales.

En definitiva consiste en aprovechar las mejores condiciones meteorológicas que ofrece la noche con el descenso de la temperatura, del viento y las turbulencias, así como el aumento de humedad relativa que son los factores que determinan la virulencia del incendio. Por ello, NITROFIREX podría y debería plantearse en el futuro como el complemento nocturno a los medios aéreos de extinción convencionales para conseguir que el combate contra los incendios forestales desde el aire sea H-24: «*non stop fighting*».

11.1. Antecedentes

La ejecución de cualquier obra es un proceso vivo y como tal requiere de un seguimiento continuo que permita la supervisión geométrica en la ejecución, de impacto visual y medioambiental y sobre todo el control económico de la misma.

En el proceso de ejecución tanto de obras como en explotaciones de canteras o minería a cielo abierto se pasa por distintas fases:

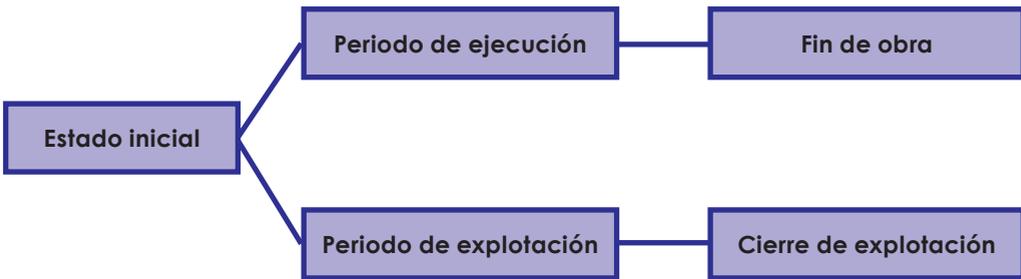


Figura 11.1. Fases de ejecución de los trabajos.

El desarrollo de todas y cada una de las fases requiere de mediciones para evaluar estados, diseñar soluciones, certificar procesos de ejecución y estados finales. Conjugar componente geométrica y temporal es fundamental para un eficiente análisis.

En el caso de la construcción, dirección de obra y constructora, en el caso de las explotaciones a cielo abierto y minería, propiedad y dirección facultativa, necesitan:

- MEDICIÓN INICIAL para diseño de proyecto y estudio de impactos medioambientales.
- SEGUIMIENTO VISUAL para controlar procesos internos así como subcontratas, previsión de zonas de restauración, valoración de impactos y generación de medidas correctoras
- MEDICIONES PARCIALES para certificaciones de obra, seguimiento, propuesta de modificaciones y planes de labores
- MEDICIÓN FINAL para cierre de obra o de explotación.

En los cuatro apartados anteriores se tiene aplicación tanto para el estudio y control de las mismas, como del impacto medioambiental ocasionado por las diferentes actividades y las acciones de restauración de las mismas. Disponer de datos reales, sin interpretaciones, referidos al mismo espacio temporal, y de precisiones homogéneas, proporciona una herramienta de análisis muy ventajosa.

Hasta el momento actual, las técnicas empleadas para estos trabajos han sido topografía clásica y fotogrametría, con las siguientes características:

Topografía clásica: La topografía clásica tiene costes elevados en cuanto al personal necesario y el tiempo requerido para su obtención y los datos que nos facilita son discretos y dispersos, aunque muy precisos. De forma más concreta se puede decir que los datos generados son:

- MUY PRECISOS: alto valor métrico.
- DISCRETOS: no tienen continuidad en la toma y requieren de interpolaciones. El criterio del operador puede condicionar el resultado final derivado.
- DISPERSOS EN EL TIEMPO: la toma de los datos se puede producir en diferentes momentos.
- OMISIONES DE DATO: las dos circunstancias anteriores pueden provocar que el dato no tomado en el momento adecuado se necesario se pierda. Los datos ligados a procesos tienen una variable temporal a tener en cuenta. El dato no tomado no se repite y por tanto se pierde.

Fotogrametría: La fotogrametría soluciona los problemas de los datos discretos y de la homogeneidad de los mismos pero plantea otros eventualidades como son:

- DISPONIBILIDAD SELECTIVA: las infraestructuras de vuelo y sus elevados costes no permiten realizar todas las tomas de datos que interesan y el caso de hacerlas los costes se multiplican.
- NECESIDAD DE GRANDES INFRAESTRUCTURAS PARA SU PROCESADO: Se requieren caras licencias y equipos para su procesado así como personal exclusivamente dedicado a este tipo de producción.

La evolución de la tecnología ha permitido el desarrollado de soluciones basadas en datos capturados por Drones/UAV, mediante la utilización de la plataforma de vuelo adecuada, el sensor correspondiente a la solución a proveer y sin duda, el procedimiento en la captura, análisis y tratamiento de datos para convertirlos en información

Drones: Los Drones y sus características permiten cubrir las necesidades en el control de la obra recogiendo bondades tanto de la topografía clásica como de la fotogrametría, reduciendo considerablemente sus inconvenientes. Los Drones, la integración de los sensores adecuados y el diseño de la metodología de captura correspondiente, permiten:

- DATOS MUY PRECISOS O NO TANTO: El juego de alturas de vuelo y precisiones de los sensores embarcados nos permiten equilibrar la precisión del dato adquirido y así adaptarlo a las necesidades reales del proyecto.

- VUELOS REPETITIVOS: Se pueden hacer tomas de datos recurrentes puesto que sus costes no se van a disparar. Esto a su vez permite tener datos de toda la obra en series temporales.
- SOLO SE PROCESA LO NECESARIO: Al realizar toma de datos sistemáticos de toda la obra, se procesan, en cada caso, los datos que se requieran teniendo la posibilidad de transformar en información los datos almacenados.
- SIN PERDIDA para posteriores tratamientos. Trazabilidad completa de la obra.
- CONTROL VISUAL: Aquí aparece un valor añadido, y es que los mismos datos de toma geométrica posibilitan el análisis global de la obra de forma visual ya sea con fotografías panorámicas sin carácter métrico como con ortofotografías.
- DATOS CONTINUOS: Al tratarse de un método de toma de datos masivos, como lo es la fotogrametría, no se tienen datos discretos ni interpolados. Son datos homogéneos tanto en calidad como en cantidad.
- COSTES BAJOS: tanto los instrumentos de medición así como las licencias de cálculo tienen costes reducidos.
- POSIBILIDAD DE GESTION INTERNA. Planificación, vuelo y procesado pueden realizarse por un único operador.

Podemos resumir las bondades de los Drones en que las mediciones realizadas con los mismos son rápidas, sistemáticas, precisas y económicas.

11.2. Procedimiento de trabajo con sistemas drone

A continuación se describe un caso práctico del proceso de seguimiento de una explotación. Para este caso se han empleado un Microdrones MD4-1000 con una cámara Sony Nex7 embarcada.



Figura 11.2. Plataforma empleada (Md4-1000) con cámara fotográfica RGB.

● **Calibración de cámara**

El hecho de trabajar con cámaras no métricas obliga a realizar un proceso de calibración de lentes. Dicho proceso básicamente consiste en sacar una serie de fotografías con una metodología estudiada para el posterior cálculo de los parámetros del sensor y de distorsiones de lente.

● **Planificación de vuelo:**

Para la ejecución del vuelo fotogramétrico hay que hacer una planificación del mismo de forma que, a partir de una resolución fijada y teniendo en cuenta las características del equipo fotográfico, se determinen altura y velocidad del vuelo así como tiempos de disparo y distancias entre pasadas para asegurar los recubrimientos fotográficos necesarios para su posterior tratamiento.

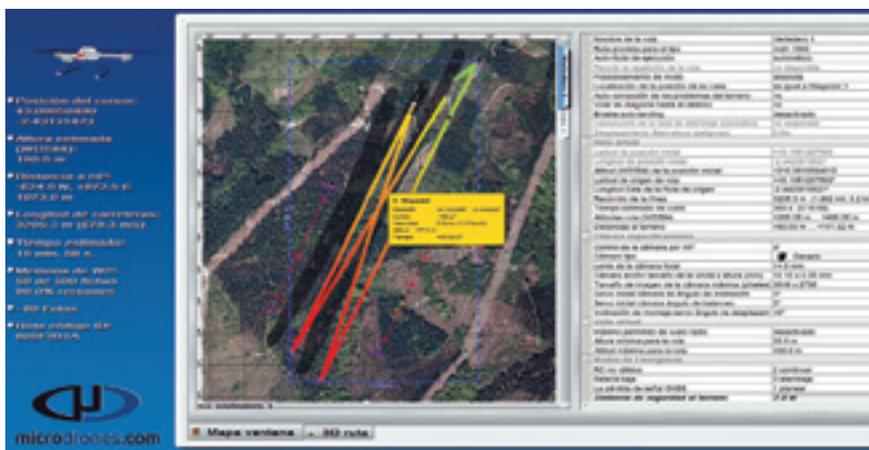


Figura 11.3. Software Micro Drones de planificación de vuelo.

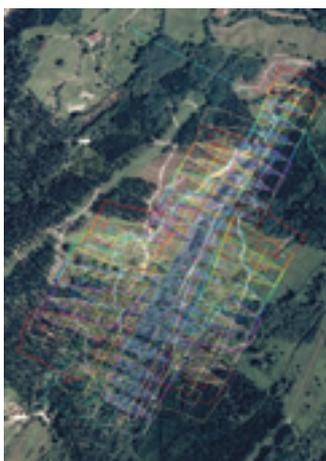


Figura 11.4. Software de Airstudio para Control de recubrimientos de pares estereoscópicos.

• **Análisis de vuelo realizado**

Puntos de apoyo:

Para poder realizar el proceso de aerotriangulación se distribuyen dianas con coordenadas GPS para utilizarlas como puntos de apoyo. Estas dianas junto con las bases topográficas, van a definir el sistema de referencia de representación y ejecución de la obra

Datos de vuelo:

Cada dato (fotografía, datos medioambientales, etc.) está referido a los datos de vuelo (posición, velocidad, inclinaciones, etc.) en el momento de la toma.

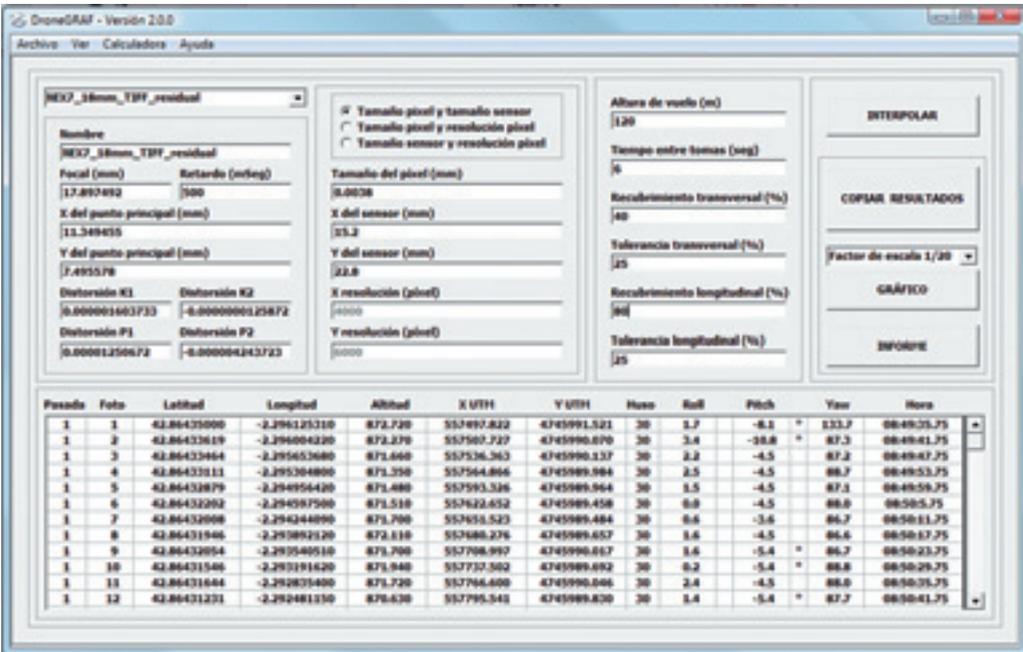


Figura 11.5. Software DroneGRAF desarrollado para análisis y control de datos de vuelo realizado.

Proceso de cálculo:

El proceso de cálculo comienza con la aerotriangulación a partir de la identificación automática de puntos homólogos entre fotogramas y de los puntos de control observados en campo dando como resultado:

Relación de puntos de control

Layer Name	CONTROL_POINTS		
Accuracy [m]	0.0162	0.0162	0.0162
Control Point Coordinates			
PointName	X[m]	Y[m]	Z[m]
PA1	545.542,0520	4.772.843,0050	203,1230
PA2	545.493,3490	4.772.863,8610	203,7120
PA3	545.457,0520	4.772.735,0600	220,2910
PA4	545.368,8380	4.772.776,3540	244,6630
PA5	545.444,4920	4.772.572,4000	253,7610
PA6	545.384,9260	4.772.590,7590	233,9240
PA7	545.303,4220	4.772.620,8210	265,8010
.....			
.....			
Number of Control Points	23		

Parámetros de imágenes

Number of Images 118	
Image 1	
Image Name	PB240991
Width [pixels]	4.032
Height [pixels]	3.024
x Resolution [mm]	0,004300
y Resolution [mm]	0,004300
Camera Name	3_260911 EP1 14mm JPG
Image 2	
Image Name	PB240992
Width [pixels]	4.032
Height [pixels]	3.024
x Resolution [mm]	0,004300
y Resolution [mm]	0,004300
Camera Name	3_260911 EP1 14mm JPG
Image 3, Etc.	

Coordenadas calculadas de puntos de apoyo y residuales:

PointName	X[M]	Y[M]	Z[M]	DX[M]	DY[M]	DZ[M]
PA1	545.542,0590	4.772.843,0122	203,1219	0,0070	0,0072	-0,0011
PA2	545.493,3426	4.772.863,8535	203,7138	-0,0064	-0,0075	0,0018
PA3	545.457,0518	4.772.735,0591	220,2901	-0,0002	-0,0009	-0,0009
PA5	545.444,5017	4.772.572,4042	253,7622	0,0097	0,0042	0,0012
PA6	545.384,9213	4.772.590,7554	233,9254	-0,0047	-0,0036	0,0014
PA8	545.412,9118	4.772.495,0448	268,5740	-0,0142	-0,0012	-0,0010
PA10	545.332,4984	4.772.455,6560	261,2610	-0,0106	-0,0040	0,0010
PA13	545.372,0620	4.772.395,3037	293,2353	0,0070	0,0007	-0,0027
PA17	545.254,1530	4.772.325,9176	293,3194	-0,0050	-0,0044	0,0014
PA18	545.318,0844	4.772.253,0955	339,8487	0,0034	0,0065	0,0007
.....						
.....						
Standard Deviation [m]			0,0062	0,0041	0,0021	
Maximum Residuals [m]			-0,0142	0,0087	-0,0047	
Number of Calculated Coordinates			19235			
Number of Control Points			23			

Parámetros de orientación de fotografías

Camera positions and angles						
ImageName	Xo[m]	Yo[m]	Zo[m]	Omega[deg]	Phi[deg]	Kappa[deg]
PB240991	545.543,4010	4.772.876,1118	297,3982	-15,905	0,328	-151,366
PB240993	545.528,2282	4.772.841,3504	300,5106	-15,209	-1,922	-153,512
PB240995	545.513,0474	4.772.805,8834	303,4899	-13,496	-1,528	-153,743
PB240997	545.497,6196	4.772.770,1236	306,9807	-14,459	-2,379	-154,179
PB240999	545.487,8149	4.772.744,8528	309,9205	-13,186	-2,681	-155,411
.....						
.....						
PB241117	545.102,9993	4.772.304,5882	455,9868	-16,138	-1,217	-152,298

11.3. Aplicaciones y/o uso de productos derivados

Como resultados finales tenemos nube densa de puntos, modelo digital de terreno y orto-foto para poder utilizarlos tanto en cubicaciones como en diseño de proyectos de explotación.

- Cartografía, MDT y nube densa de puntos

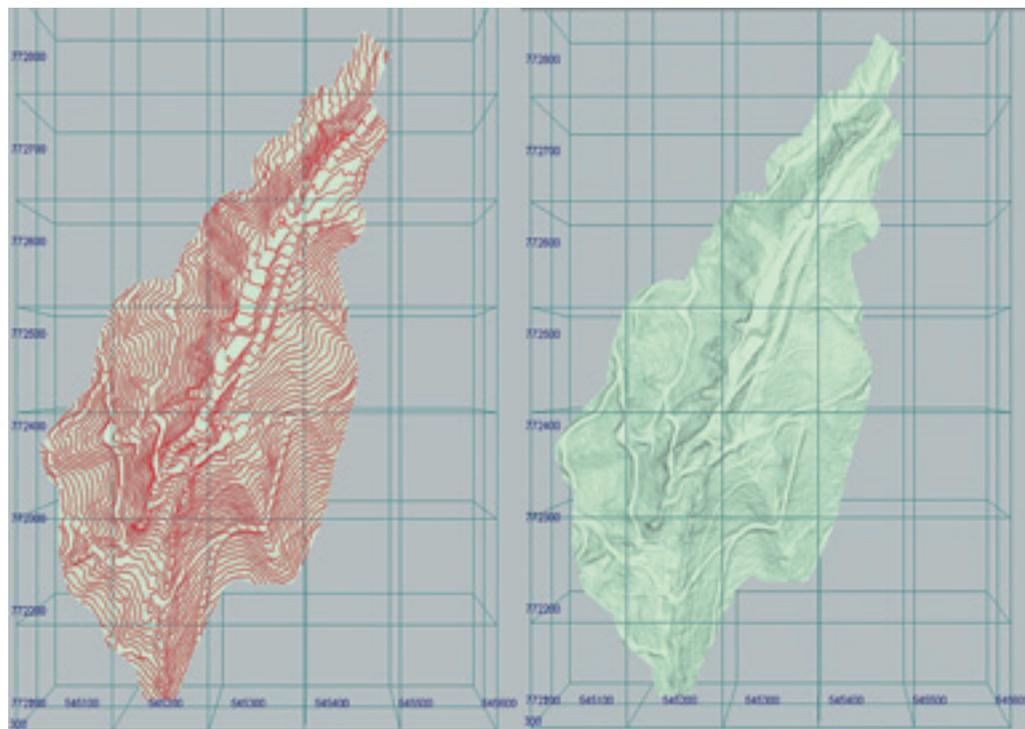


Figura 11.6. Curvado y MDT.



Figura 11.7. Vista general de nube densa de puntos y detalle.

- **Ortofotografía:**

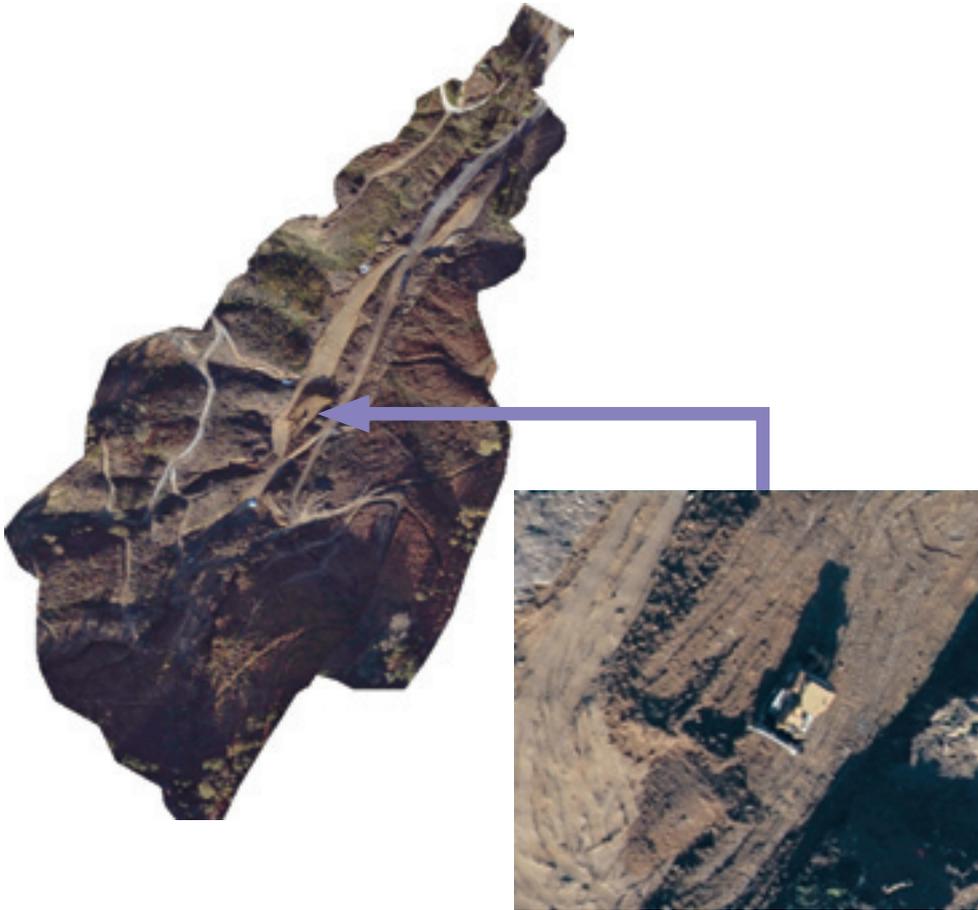


Figura 11.8. Ortofoto y detalle de resolución.

- **Fotografía oblicua: seguimiento visual de obra**

Al igual que se puede realizar seguimiento de obras a nivel métrico como se ha visto en el caso anterior, también es de gran interés la posibilidad de hacer seguimientos visuales realizando vuelos regulares de la obra en estudio. Este tipo de trabajo permite tener una visión global de la obra para poder llevar un control más exhaustivo del avance de la misma, desviaciones, documentación de modificaciones y registro temporal de actuaciones realizadas durante la obra.



Figura 11.9. Imágenes de seguimiento visual de diferentes obras

11.4. Conclusiones

La inclusión de los Drones en la obra, permite hacer de forma sistemática, precisa, rápida y económica seguimiento de las obras ya sea con carácter métrico para realización de certificaciones y proyectos, como para seguimiento visual del proceso constructivo mediante la realización de vuelos regulares que permitan tener una vista global de la obra a lo largo de toda la línea temporal de la misma para su análisis. La unificación de los datos en cuanto a calidad, precisión, cantidad, homogeneidad temporal, capacidad de procesamiento y análisis en series temporales, hace de los Drones una herramienta muy apropiada para el control de las obras y el análisis del impacto de las mismas.

La variedad de aplicaciones de Drones en las obra se amplía considerablemente en el momento que se empieza a trabajar con otro tipo de sensores. Actualmente, Airestudio en su desarrollo de soluciones está ampliando la gama de productos asociados y aplicaciones. La posibilidad de embarcar, no solo cámaras RGB, si no también cámaras multispectrales, hiperspectrales, térmicas, sensores medioambientales, radar de apertura sintética, LIDAR, etc., abren más, si cabe, el abanico de elementos trazables en la obra mediante el uso de Drones.

lizar y aislar fenómenos de todo tipo que produzcan diferenciales de temperatura en los materiales. Los sensores atmosféricos nos permiten valorar y cuantificar el impacto ambiental de la obra. Aquí se muestran una serie de ejemplos de aplicaciones posibles:

- **Detección de betas de material en frentes de cantera:**

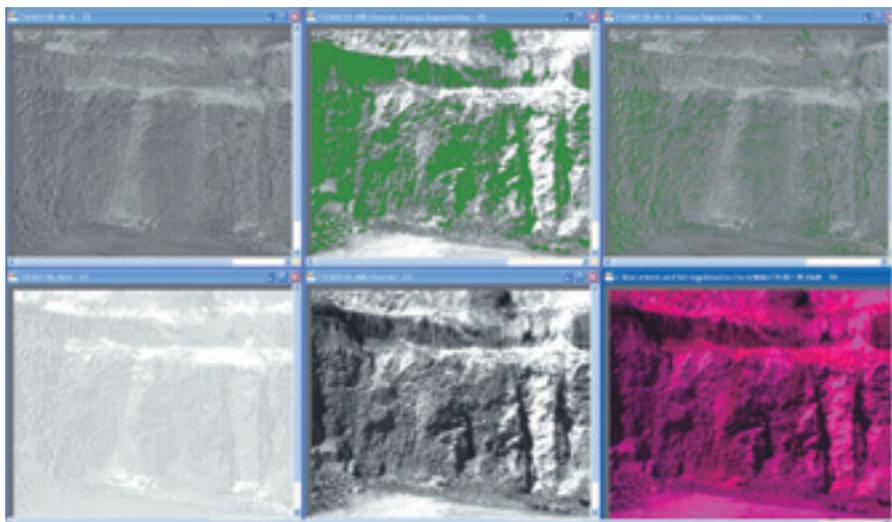


Figura 11.9. Análisis de frente de cantera para valoración del grado de disgregación de materiales.

- **Análisis del impacto ambiental de la obra:** En el entorno de afección de la obra podemos analizar el estado de vigor de la foresta de forma recurrente para poder analizar si se ha visto afectada o no por la actividad constructiva. Del mismo modo se pueden detectar vertidos contaminantes voluntarios o no que puedan darse a lo largo del proceso de explotación en arroyos, lagos, etc.
- **Análisis del estado de materiales:** los materiales constructivos pueden sufrir degradaciones y defectos de origen o provocados por la interacción con el medio a lo largo de su vida útil. Estos cambios producen diferencias en la reluctancia de los materiales a una iluminación dada. Mediante el juego de filtro de distintas longitudes de onda se pueden llegar a aislar e identificar estos fenómenos que a simple vista difícilmente podríamos identificar.
- **Detección de cambios de forma automática:** Airestudio está trabajando en sistemas inteligentes de análisis de imágenes. Mediante estas herramientas se pueden realizar labores de control de acceso a obras así como control de movimientos no deseados en estructuras o taludes o inventariados automáticos.
- **Detección de vicios ocultos:** Las termografías nos permiten detectar estos vicios ocultos así como valorar aspectos importantes en la eficiencia energética de los edificios construidos.

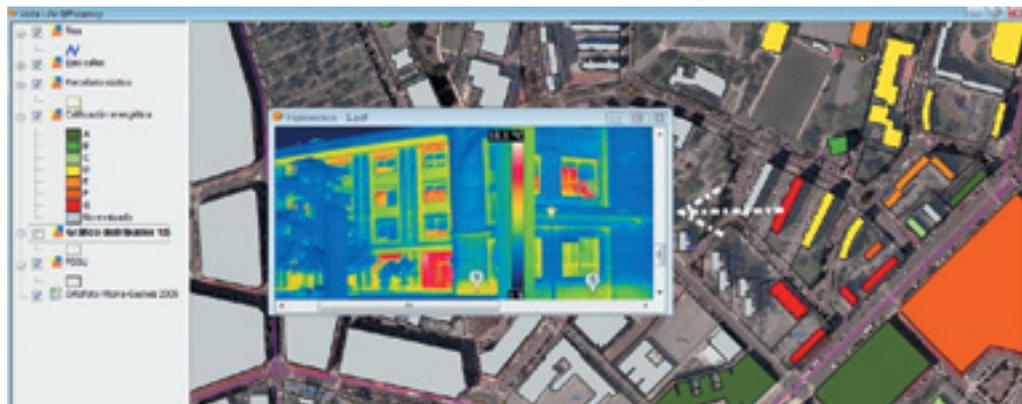


Figura 11.11. Software de Airestudio para análisis energético de viviendas a nivel de estado constructivo.

José Antonio DOMÍNGUEZ

ACRE SOLUCIONES TOPOGRÁFICAS

12.1. Documentar el patrimonio mediante drones

¿Por qué documentar el patrimonio?

Aunque en un principio la documentación de nuestra herencia cultural puede parecer una actividad poco productiva y/o lucrativa, es una responsabilidad de la sociedad conocer su legado patrimonial como seña de identidad y potenciar las acciones que favorezcan su restauración y conservación.

Dado el carácter único e irremplazable de la mayoría de elementos que componen nuestro patrimonio, cualquier pérdida puede resultar dramática.

Una correcta documentación del patrimonio podrá ser de gran utilidad para otras labores como estudios históricos o arqueológicos (Arqueología virtual). Su difusión a través de portales web, visitas virtuales, publicidad, etc., puede revertir económicamente en las zonas que se favorezcan de estas herramientas.

¿Por qué utilizar un dron?

Aunque se trata de sistemas que se están popularizando muchísimo en los últimos tiempos y su inclusión en cualquier proyecto técnico puede resultar muy atractivo, debe al menos cumplirse una de las siguientes premisas para que la utilización de estos sistemas sea lógica:

- Situar un sensor en un lugar inaccesible mediante otros métodos (pértigas, torres, andamios, etc.).
- Sustituir el riesgo que supondría realizar esa tarea por otros métodos más peligrosos.
- Ser más barato que otros métodos posibles, es decir, ha de ser económicamente viable para el proyecto en cuestión.

Parece lógico pensar en los UAV o drones como una herramienta útil y eficaz para obtener datos de las zonas inaccesibles de los bienes patrimoniales. Así pues, lo normal será limitarnos a utilizar estos aparatos para documentar cubiertas y torres en el exterior y bóvedas u oquedades en el interior, dejando la documentación de las fachadas y las

zonas más accesibles abiertas a la utilización de otras técnicas de medida más desarrolladas como puede ser la fotogrametría terrestre, el láser escáner o incluso la topografía clásica donde las precisiones alcanzables pueden ser más altas.

La combinación de metodologías suele dar buenos frutos si se aplican de manera adecuada y se tienen en consideración las precisiones alcanzables en cada caso.

Las misiones se podrán diseñar adaptándolas a diferentes propósitos en cada caso:

- Imágenes o videos de alta resolución para utilizarlos como documento visual en inventarios.
- Vuelos con diferentes sensores (visuales o térmicos) para localizar problemas o patologías.
- Vuelos fotogramétricos para obtener documentos métricos (medibles) en dos o tres dimensiones.



Figura 12.1. Imagen oblicua, modelo 3D y mapa topográfico superpuesto sobre ortofotografía de la Ermita de San Juan de Gaztelugatxe en Bermeo (Vizcaya).

Será este último tipo de trabajo el que desarrollaremos a continuación por necesitar una metodología específica.

12.2. Metodología para la reconstrucción geométrica de edificios patrimoniales a partir de fotografías

12.2.1. Captura de datos

La fotogrametría es la técnica cuyo fin es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto (Bonneval).

La ventaja de esta técnica es que nos permitirá obtener medidas tridimensionales a partir de imágenes bidimensionales. Escalando y apoyando topográficamente estos los trabajos fotogramétricos podremos pasar de coordenadas bidimensionales (*píxeles*) a coordenadas tridimensionales (arbitrarias o coordenadas terreno en un sistema de referencia determinado).

A la zona común entre dos fotografías la llamamos solape, y es aquí donde se producirá el modelo estereoscópico. Combinando diferentes modelos podremos obtener la reconstrucción del objeto, es decir, si diseñamos el plan de vuelo de manera que cada punto del objeto aparezca en dos o más imágenes consecutivas, podremos reconstruirlo tridimensionalmente.

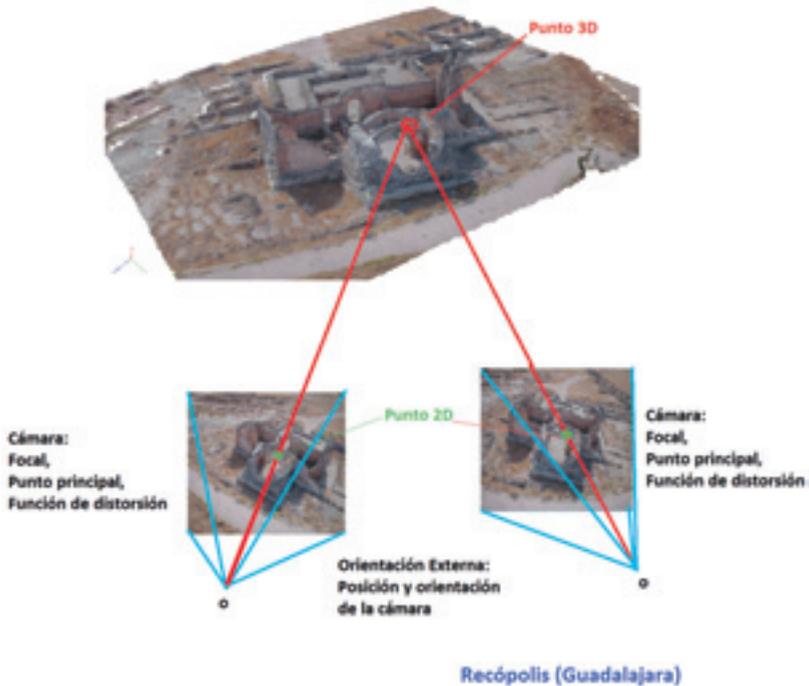


Figura 12.2. Modelo estereoscópico a partir de fotografías.

La planificación del vuelo dependerá de las exigencias del trabajo, la complejidad del objeto a documentar, las características del sistema aéreo no tripulado y de la cámara que utilizemos.

Para reconstruir con éxito un objeto 3D es crucial garantizar la superposición suficiente de imágenes a través del conjunto de datos de entrada. En el caso de la fotografía aérea cenital se suelen tomar como valores orientativos el 60% de recubrimiento transversal y 80% de recubrimiento longitudinal.

Para vuelos circulares se ha de tomar al menos una imagen cada 15°; por lo tanto, para cubrir un objeto sencillo habrá que tomar al menos 24 imágenes en un vuelo circular.

Para objetos más complejos habrá que estudiar detenidamente la configuración óptima del vuelo.



Figura 12.3. Toma fotográfica en fachadas.

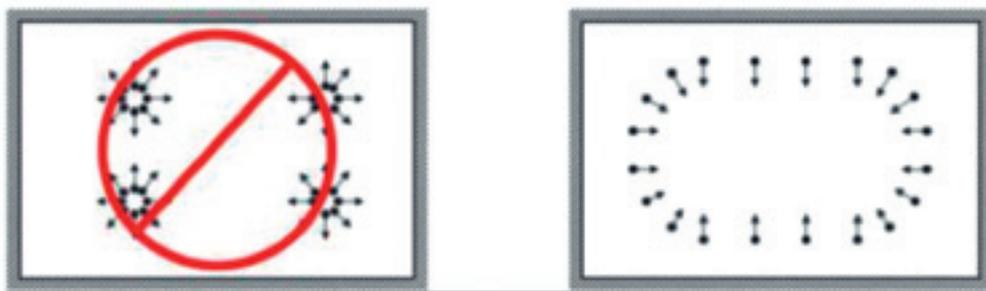


Figura 12.4. Toma fotográfica en espacios interiores.

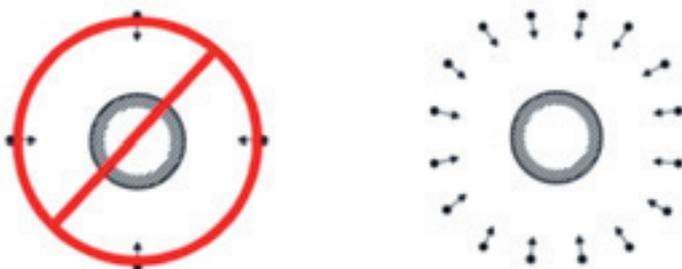


Figura 12.5. Toma fotográfica en fachadas.

Visto esto, deducimos que la mejor plataforma para acometer este tipo de trabajos será un multirrotor, que nos dará flexibilidad en la toma fotográfica y nos permitirá captar imágenes a diferentes alturas y con diferentes ángulos, no solo en el exterior del edificio sino también en el interior para lugares inaccesibles mediante otras técnicas.



Figura 12.6. Aibot X6 documentando La Puerta de Bisagra (Toledo).



Figura 12.7. Ejemplo de planificación del vuelo para el modelado de La Puerta de Bisagra (Toledo).

12.2.2. Cámara, altura de vuelo y GSD

La selección de la cámara es otro aspecto fundamental para lograr el éxito en nuestro trabajo. En los últimos años, se ha experimentado una gran evolución en las capacidades de estos dispositivos al mismo tiempo que una reducción considerable de sus costes. Existe una gama muy amplia, desde cámaras deportivas con un tamaño muy reducido y unas prestaciones ópticas muy aceptables hasta complejas y sofisticadas cámaras réflex. Sin duda hay que elegir una buena cámara, con altas resoluciones y velocidades de disparo, pero habrá que tener en cuenta también la plataforma en la que irá aerotransportada. Tendremos que tener en consideración la carga de pago máxima, la autonomía y el sistema de estabilización de cámara. Habrá pues, que buscar una situación de compromiso entre características de la cámara y su tamaño, peso y precio. Las cámaras compactas suelen ser una buena solución para este tipo de trabajos.

La altura de vuelo (o distancia de la cámara al objeto) estará condicionado por el nivel de detalle que queramos captar, y este a su vez por la resolución del sensor y la focal del objetivo. Aquí solemos hablar del GSD (*ground sample distance*) que es la huella o el tamaño del pixel proyectado sobre el terreno. También se suele dar como la distancia entre los centros de dos píxeles vecinos en una imagen aérea medidos en planta.

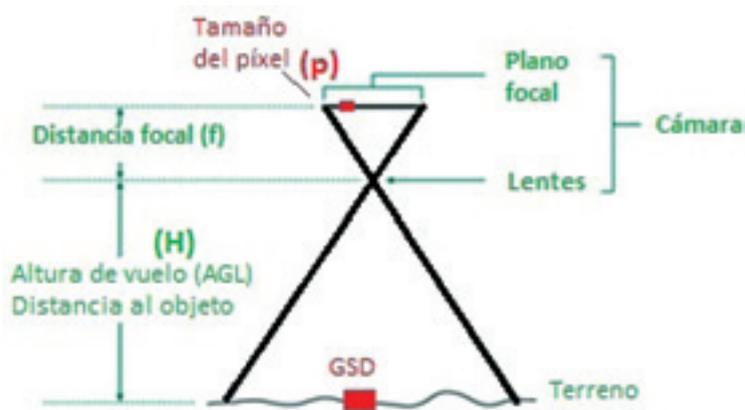


Figura 12.8. Relación entre GSD y altura de vuelo.

12.2.3. Precisiones, apoyo topográfico y georeferenciación

La precisión alcanzable en este tipo de trabajos rondará el valor del GSD para la planimetría y aproximadamente el doble de este valor para la altimetría. Se trata de valores estandarizados, la precisión real alcanzable dependerá de muchos factores, como el método de validación utilizado, la luz en el momento de la toma, etc.

Sabiendo esto, habrá que diseñar el vuelo atendiendo a nuestras necesidades en cuanto a la precisión, pero también habrá que dotar al trabajo de puntos de control que nos permitan escalar, orientar y colocar nuestro modelo en un sistema de referencia.

Con dos puntos de coordenadas conocidas en el objeto podremos calcular la distancia entre ellos y utilizarla para escalar el modelo. Esta es la acción más simple que podremos llevar a cabo. Lo ideal será dotar al trabajo de varios puntos que engloben el objeto y

medirlos con instrumentos topográficos de precisión acorde a nuestras necesidades. Es interesante medir puntos de sobra, que no se vayan a utilizar en el procesado fotogramétrico para así tener un conjunto de datos para la verificación de las precisiones obtenidas.

12.2.4. Equipamiento topográfico

12.2.3.1. Receptor GNSS

Será útil para la medición de puntos de control o targets en el suelo. Estos puntos de control pueden ser elementos naturales fácilmente reconocibles o preseñalizados mediante dianas de puntería o señales.

Además esta tecnología nos puede servir para establecer una red topográfica inicial y enlazar con el sistema geodésico de referencia, si es que la zona donde vamos a trabajar carece de ello.

12.2.3.2. Estación total

Normalmente, en este tipo de trabajos nos encontraremos elementos elevados como torres o tejados en los que no podremos medir puntos utilizando el GPS. Mediremos así puntos de control en pequeñas dianas de puntería que podamos colocar o si no es posible en clavos, tornillos o detalles de la mampostería. Es importante hacer croquis de estos puntos para no cometer errores en el procesamiento.

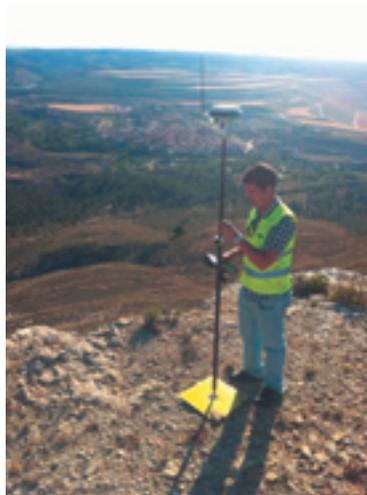


Figura 12.9. Imagen apoyo topográfico.

12.2.5. Procesado

Con los datos recopilados (imágenes, log de vuelo si está disponible y coordenadas de los puntos de control) podemos empezar el procesamiento de los datos.

Existen numerosas suites de procesamiento en el mercado, pero al menos nos debe permitir realizar las siguientes tareas:

- Reconstrucción de la toma: Orientación interna, orientación relativa, orientación externa.
- Reconstrucción de la geometría del objeto: Densificación de nubes de puntos, creación de mallas o superficies poliédricas, o modelos tridimensionales.
- Creación de la textura fotográfica del modelo utilizando las propias imágenes.

Extracción de productos derivados: ortoimágenes de plantas o alzados, nubes de puntos, modelos tridimensionales o incluso impresionantes videos a través de los modelos.

Normalmente será proyectos de gran envergadura, y el procesado se verá condicionado por la capacidad de ordenador utilizado para ello. En este caso habrá que fragmentar el proyecto en diferentes sub-proyectos que luego se puedan unir una vez finalizado.

12.2.6. Fusión de resultados con otras fuentes de información

Como se ha comentado anteriormente la utilizaremos el dron para obtener información de zonas inaccesibles y en ocasiones, puede resultar útil combinar los resultados obtenidos con otros obtenidos mediante otros métodos como puede ser el láser escáner o fotogrametría terrestre.

Para que esta combinación sea posible, deberemos utilizar el mismo sistema de referencia en ambos conjuntos de datos y los puntos de control y las técnicas de medida de estos deberán ser los adecuados para no cometer errores groseros en la alineación de los modelos.



Figura 12.10. Fusión de datos láser escáner (intensidad) y nube de puntos UAV (RGB) con un error menor a 2 cm en la alineación.

12.2.7. Entregables

Una vez concluido el procesamiento del proyecto con todos los aspectos mencionados anteriormente, estamos en posesión de unos modelos tridimensionales muy completos, unas nubes de puntos muy densas y unas texturas fotográficas altamente realistas. ¿Y ahora, qué hacemos con todo esto?, ¿Necesitará nuestro cliente tanta información?.

La experiencia nos dice que cada cliente tiene sus necesidades particulares, y que normalmente no van a estar preparados para asimilar tanta cantidad de información que seremos capaces de exportar tras nuestro trabajo.

En arquitectura aún no se tiene mucha costumbre de trabajar con superficies poliédricas, aunque parezca paradójico todavía no se utilizan mucho las superficies en 3D sino con los planos convencionales en soporte papel. Además en ocasiones se necesitan los despieces de cantería dibujados. Así pues, habrá que exportar los modelos y ortofotos a sistemas CAD y dibujar los planos, extraer medidas, proyectar actuaciones. Nos podremos valer de programas de renderizado y retoque fotográfico para mejorar los resultados. Para todo esto emplearemos mucho más tiempo que el que se ha empleado en el vuelo y procesamiento, con el consiguiente incremento del precio.

Estas superficies poliédricas si tendrían utilidad para restauradores y conservadores, pero estos tendrán problemas al trabajar con los formatos de las mallas.

El resultado ideal debiera ser combinación entre el modelo 3D y planos ortogonales en sistema diédrico, con las dificultades que esto conllevaría, sobre los que se plasmen las diferentes patologías que se observan al inspeccionar la nube de puntos. Esto es una solución muy difícil de conseguir, ha de realizarlo especializada en cantería, humedades, etc. y los costes serán muy elevados.

Al final, como siempre, todo depende del presupuesto disponible, que en general en restauración será siempre muy limitado y se dedicará casi todo a lo imprescindible y urgente (limpieza general de fachadas y tapado de grietas y poco mas).

Para lograr que este tipo de trabajos sea atractivo y sobre todo viable económicamente hablando, el producto ideal es la nube de puntos o el modelo 3D y formar al cliente en su uso y manejo para que él sea capaz de extraer los resultados que el necesita y con los que está acostumbrado a trabajar.

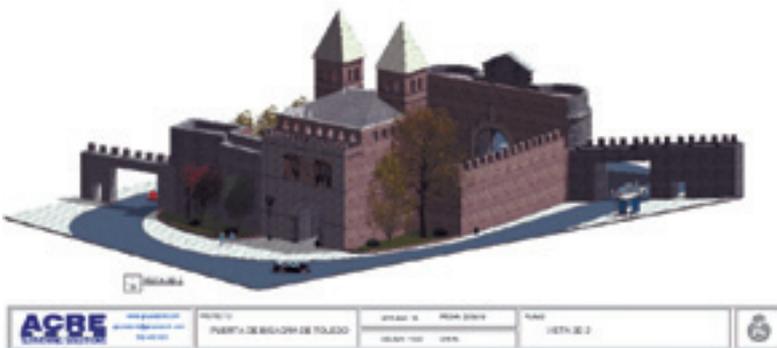


Figura 12.11. Modelo Revit de La Puerta de Bisagra (Toledo) elaborado a partir de nube de puntos obtenida mediante UAV.

12.3. Conclusiones

- Los UAV / UAS / SARP, constituyen una herramienta viable, y la fotogrametría de objeto cercano una técnica adecuada para el levantamiento y reconstrucción geométrica de edificios. Su precisión y eficiencia están contrastadas.
- No se trata de sustituir técnicas, ni de minimizar costes equipos u operarios, sino de conocer la tecnología disponible, utilizarla en los casos que la necesitemos, combinar con otros métodos implantados y conseguir un resultado completo, preciso y económicamente viable.
- Las aplicaciones pueden ser múltiples y los resultados extremadamente completos y complejos, en ocasiones, se genera gran volumen de datos difícil de manejar. Es por tanto necesario unos profundos conocimientos en planificación y ejecución de vuelos, procesamiento de datos e interpretación de resultados, así como conocer las necesidades particulares de cada trabajo.

12.4. Agradecimientos

Todas las imágenes mostradas son parte de trabajos realizados por Acre Soluciones Topográficas S.L.

Sirva el presente capítulo como agradecimiento a la organización y al equipo humano que lo compone por sus esfuerzos y ayuda en el desarrollo de nuevas ideas, técnicas de medida y desarrollos tecnológicos.

Jesús BORJAS ASTORGA y Jorge LÓPEZ RAMOS,

*Dirección General de la Guardia Civil
Ministerio del Interior*

13.1. Introducción

España ha soportado y soporta una gran presión en sus fronteras debido al fenómeno de la inmigración irregular que alcanzó su mayor pico en el año 2006 especialmente focalizado en el archipiélago canario.

Esta problemática se unió a todo lo que suponen las actividades de las bandas organizadas, especialmente las dedicadas al tráfico de drogas en la zona sur de la península.

Para hacer frente a esta situación se han llevado a cabo varias acciones entre las que destacan la creación del Centro Regional de Coordinación de Canarias¹, la dotación a la Guardia Civil de dos aviones de patrulla marítima y de tres buques oceánicos.

No obstante, una de las más exitosas iniciativas para abordar esta problemática fue el Sistema Integrado de Vigilancia Exterior (SIVE) que llevaba unos años funcionando y cuya ampliación y fortalecimiento hace que hoy en día, a través de un sistema formado por radares, cámaras y una red de comunicaciones, se tenga monitorizado todo lo que pasa en las aguas territoriales españolas desde la provincia de Tarragona hasta la provincia de Huelva, incluyendo las Islas Baleares, Islas Canarias y la provincia de Pontevedra.

No obstante, desde la Guardia Civil se continúa con el planteamiento de nuevas iniciativas para complementar los medios de vigilancia de los que se dispone. Se han buscado y estudiado diferentes tecnologías y una de las que ha cobrado mayor protagonismo es la utilización de sistemas remotamente pilotados (RPA en inglés²).

13.2. Necesidades

Varios son los condicionantes que hay que tener en cuenta en el uso de esos sistemas pero por el que se debería empezar es por las características de los objetivos que se quiere detectar.

¹ Creado por Orden PRE/3108/2003, de 10 de octubre (BOE núm. 243 de 11 de octubre de 2006).

² *Remotely Piloted Aircraft*.

En el campo de la vigilancia de las fronteras se busca embarcaciones de pequeño tamaño, de entre 5 y 15 metros de eslora, entre 2 y 5 metros de manga, entre 0.5 y 1 metro de obra muerta y a una velocidad de entre 10 y 60 nudos.

A esto también se unen objetivos aéreos como pueden ser avionetas o helicópteros volando a velocidades de hasta 150 nudos a altitudes por debajo de los 1.000 pies.

Asimismo y, teniendo en cuenta los medios con los que ya cuenta Guardia Civil, tres son las formas de operación que se consideran más convenientes:

1. *Sistemas operados desde un punto próximo a la costa*, cubriendo zonas relativamente pequeñas para complementar la labor ya realizada por los sistemas de vigilancia costeros y por las patrulleras de tamaño pequeño y medio.
2. *Sistemas operados desde la costa o a distancia de la misma*, cubriendo extensas áreas para llegar más allá de los sistemas costeros incrementando así nuestras capacidades de detección e identificación. Esto exigiría sistemas con alta autonomía.
3. *Sistemas operados desde una embarcación para complementar la detección de dicha embarcación*. Este caso está especialmente pensado para complementar las capacidades de los buques oceánicos con la limitación de que el sistema tendría que despegar y aterrizar en el buque.

Lo anterior inferiría que en los casos 1 y 3 el sistema tendría que estar dotado de cámaras en los espectros visuales e infrarrojos pero para el caso 3 sería necesario contar, además, con un sistema radar para las labores de detección e identificación.

En el punto dos se incluirían aquellos RPA de largo alcance los cuales podrían ser operados desde la costa o incluso desde una unidad central y los mismos deberían estar equipados con radar de búsqueda, AIS, video *streaming*, EO/IR, etc.

En todos los casos, tendría que dotarse al sistema de la capacidad de transmisión, en tiempo real, de la información captada a la estación de mando en tierra.

Y todo lo anterior debería estar unido a la posibilidad de programar parámetros de vuelo (rutas, altura, velocidad) para la vigilancia, tomar el control de forma manual en cualquier momento, seguimiento automático de un objetivo marcado, sistemas de seguridad para casos de pérdida de señal con la estación base, etc.

13.3. Pruebas realizadas

Para esa definición de capacidades y la búsqueda de las mejores soluciones, se han probado diferentes sistemas con diferentes características, tanto de ala fija como de ala rotatoria, destacando el Heron de la empresa IAI, el Camcopter de la empresa Schiebel GmbH, el Scan Eagle de la empresa Boeing o el Fulmar de la empresa THALES.

Con carácter general, con esas pruebas se han buscado los siguientes objetivos:

- Probar las capacidades de esos sistemas para llevar a cabo labores de vigilancia marítima en un escenario real con la necesidad de detectar, identificar y seguir embarcaciones de pequeño tamaño.

- Posibilidad de integración de los RPA,s en los sistemas de vigilancia de Guardia Civil para ampliar nuestras capacidades más allá del mar territorial.
- Evaluar los requerimientos técnicos y económicos para el despliegue, mantenimiento y operación.
- Comprobar la posibilidad de uso, especialmente en lo que se refiere a los requerimientos legales.

13.4. Proyecto PERSEUS – Sistema ATLANTE

Se considera la conveniencia de dedicar un apartado al último test de envergadura realizado por la Guardia Civil.

Guardia Civil forma parte como socio de un proyecto denominado PERSEUS incardinado dentro del 7º Programa Marco financiado por la Comisión Europea hasta un total de 27 millones de euros.

Los objetivos de este proyecto es comprobar la posibilidad y beneficios de compartir información entre agencias implicadas en la vigilancia de fronteras así como buscar el más efectivo uso de plataformas y sensores.

El sistema ATLANTE, de la empresa *Airbus Group*, es una de esas plataformas cuya integración en la red de información se contempló en el marco del proyecto.

Este es un sistema pilotado remotamente de los denominados tácticos con las siguientes características:

- Carga de pago: 60 – 100 kg.
- Longitud: 5.5 m.
- Envergadura: 8 m.
- MTOW: 520 kg.
- Alcance: 400 km.
- Autonomía: 14 horas.

Hasta ese momento la mayoría de las pruebas realizadas con esta clase de sistema se habían circunscrito a instalaciones militares en espacio aéreo segregado.

En esta ocasión se tomó la decisión de ir un paso más allá y, en esta ocasión se dejó en segundo plano cuestiones relativas a la carga de pago o al propio avión y todo se centro en los requisitos operativos, logísticos y legales necesarios para el uso de un RPA.

Se tomó la decisión de realizar la operación desde un aeropuerto civil y, dado que el área de operaciones era la zona del Mar de Alborán se eligió el Aeropuerto de Almería.

Para posibilitar la actividad se realizaron numerosas gestiones con AESA, AENA y el Ejército del Aire sin el soporte de los cuales hubiera sido imposible la realización del vuelo.

De todas formas, a pesar de conseguir la autorización de la operación muchos fueron los condicionantes y restricciones que se marcaron relativas a duración de los vuelos, espacio aéreo completamente segregado y cierre del aeropuerto para cualquier otro uso durante la realización del test.

13.5. Conclusiones

Teniendo en cuenta el conocimiento de Guardia Civil en el uso de los aviones pilotados de forma remota se puede afirmar lo recogido en los siguientes puntos:

1. Estos sistemas pueden ser utilizados para diferentes actividades relacionadas con la seguridad y más concretamente para la vigilancia de fronteras.
2. Serán más útiles en cuanto integren o contemplen cargas de pago que se adapten a las necesidades de las instituciones con competencias en la vigilancia de las fronteras.
3. Guardia Civil considera esta utilidad y por eso está involucrada en diferentes proyectos relacionados con el uso de RPA para que el desarrollo técnico y operativo de estos sistemas se adapte a las necesidades reales en la vigilancia de fronteras.
4. No existe un único RPA que cubra en su totalidad la variedad de servicios relacionados con la vigilancia de fronteras.

No obstante, existen dos limitaciones importantes:

1. Los elevados costes de adquisición y mantenimiento así como los demás requerimientos logísticos.
2. El marco legal para su uso no está aún claro. Recientemente se ha aprobado el RD 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia. No obstante son muchas las incógnitas que rodean el uso de estos sistemas y muchas más las limitaciones, especialmente de sistemas de más de 25 kg de peso que son los indicados para las labores de vigilancia de fronteras.
3. La Guardia Civil se enfrenta diariamente a la labor de vigilar eficazmente las fronteras españolas que son, asimismo, fronteras exteriores de la Unión Europea. Buscando nuevos y más eficientes sistemas se ha contemplado el uso de sistemas aéreos pilotados de forma remota. No obstante existe una limitación legal para el uso de estos sistemas en espacio aéreo no segregado.

La necesidad de vigilancia se produce hoy y sin una adecuada legislación para el uso de RPA se está en la necesidad de buscar otras alternativas legalmente viables y, de hecho, ya se están buscando.

Ricardo REINOSO DELGADO*Red Eléctrica de España*

14.1. Introducción

En los últimos tiempos se ha desarrollado enormemente la tecnología de los Sistemas Aéreos Remotamente Tripulados (SARP) en el campo de las aplicaciones civiles. Este desarrollo será mayor en el futuro, amparado en una legislación estable y en los resultados de los primeros usos industriales.

Red Eléctrica de España (REE), transportista y operadora del sistema eléctrico español, considera que el uso de los SARP puede convertirse en una herramienta muy interesante para la gestión de sus instalaciones. REE gestiona en la actualidad más de 41.200 km de líneas de alta tensión y más de 5.000 posiciones en subestaciones eléctricas, lo que implica una considerable tarea de mantenimiento de instalaciones. La búsqueda de la integración de los SARP en los procesos de mantenimiento se enmarca en REE dentro de la política empresarial de mejora continua de los procesos.

Las líneas y subestaciones eléctricas tienen, en general, elementos que se ubican en altura, alejados por seguridad del alcance de las personas. Las líneas eléctricas, además, son infraestructuras lineales que pueden discurrir por entornos de difícil acceso. En este escenario, es muy útil disponer de vehículos aéreos que permitan un acceso directo y cercano a los elementos de las instalaciones.

14.2. Mantenimiento de líneas con vehículos aéreos

Para REE (y, en general, para el resto de compañías del sector eléctrico) el uso de vehículos aéreos dentro del mantenimiento de líneas eléctricas de alta tensión no es algo nuevo. Parece lógico que los vehículos aéreos tripulados remotamente vayan a utilizarse para aplicaciones similares a aquellas en las que se usan vehículos tripulados, por lo que tiene interés conocer cuáles son.

Los helicópteros tripulados se han venido utilizando, sobre todo, para las siguientes tareas:

1. Inspecciones aéreas intensivas (imagen visual y termografía).
2. Apoyo en actuaciones de emergencia.
3. Topografía (mediante sistema LIDAR).

4. Transporte de cargas en lugares de difícil acceso.
5. Cambio de elementos con la línea en tensión.
6. Limpieza de aisladores.

14.2.1. Inspecciones aéreas intensivas (imagen visual y termografía)

Actualmente, las empresas realizan operaciones rutinarias de inspección en las líneas eléctricas, siendo esta una labor muy útil de mantenimiento preventivo.

El propio Reglamento de Líneas establece una periodicidad mínima para hacer la revisión de las instalaciones.

Las inspecciones de las líneas eléctricas se realizan de diferentes maneras, una de ellas mediante el uso de helicópteros tripulados que recorren las líneas y van grabando imágenes visuales y termográficas de las mismas.

Las imágenes visuales sirven para detectar defectos o anomalías en los elementos de las líneas (apoyos, aisladores, conductores, herrajes, balizas, etc.). Por otro lado, las imágenes termográficas se utilizan para buscar puntos denominados «calientes», aquellos puntos de un elemento cuya temperatura es mayor y, por tanto, destacan en la imagen térmica o termograma. Es normal que el paso de la intensidad eléctrica aumente la temperatura de los elementos por los que circula, pero un «punto caliente» puede estar asociado a un contacto inadecuado o a otro tipo de defecto que conviene analizar y que no es perceptible en la imagen del espectro visible.

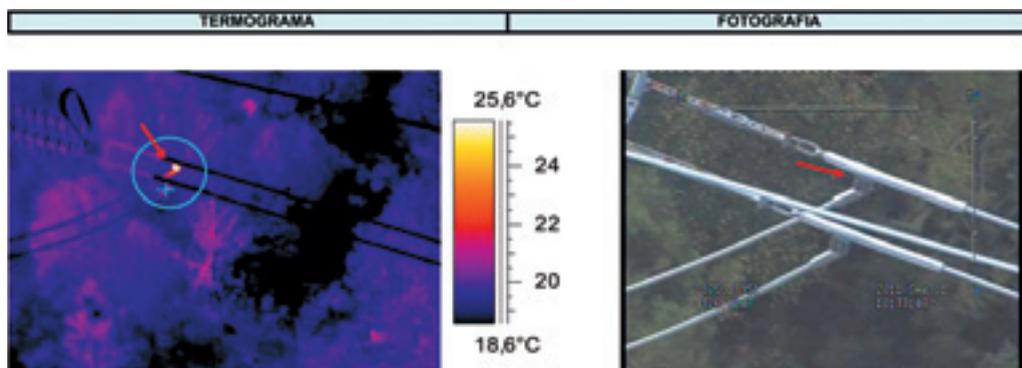


Figura 14.1. Imagen termográfica y visual de un punto caliente en una grapa de amarre.

El uso del helicóptero tripulado permite tomar las imágenes desde un punto de vista diferente al del terreno y normalmente más cercano al elemento, así como desplazarse de manera rápida y continua a lo largo de la línea con una autonomía razonable.

14.2.2. Apoyo en actuaciones de emergencia

Se considera actuación de emergencia en una línea eléctrica el conjunto de acciones destinadas a devolver el sistema eléctrico a una situación normal de suministro ante una indisponibilidad no programada de la instalación. En estos casos, hay que tratar de devolver las instalaciones a su condición adecuada en el periodo de tiempo más breve posible.

Habitualmente, las grandes averías en las líneas eléctricas aéreas están provocadas por fenómenos meteorológicos extraordinarios (tormentas con fuertes vientos, bajas temperaturas, etc.), que provocan la rotura de los conductores o la caída de las torres que los sustentan.

Los helicópteros se usan a veces en estas situaciones de emergencia porque permiten obtener una visión panorámica rápida de la avería, de forma que se puedan organizar lo antes posible los medios para minimizar el impacto de la misma en el sistema eléctrico. En las zonas afectadas por averías es frecuente que las carreteras y los caminos de acceso estén cortados y no sea fácil acceder a las líneas eléctricas. En estas circunstancias, el helicóptero puede ser la forma más rápida de llegar a ellas.



Figura 14.2. Vista desde un helicóptero de un apoyo caído en el suelo.

14.2.3. Topografía (mediante sistema LIDAR)

La topografía de las líneas eléctricas y del terreno circundante es un instrumento habitual para el conocimiento preciso y la gestión de las instalaciones, que conviene realizar periódicamente para disponer de información actualizada. Tradicionalmente, la toma de datos topográficos se ha realizado desde la superficie del terreno, con teodolitos o estaciones totales. Sin embargo, desde hace unos años ha surgido la tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), que permite una toma de datos topográficos desde un medio aéreo.

La topografía que se precisa para las líneas eléctricas requiere normalmente el uso de helicóptero, debido a que éste puede volar con menor altitud y velocidad que un avión y, por tanto, se puede obtener una mayor densidad de puntos.

Para ello se acopla la cámara LIDAR en el exterior de la aeronave.



Figura 14.3. Cámara para topografía mediante LIDAR.

14.2.4. Transporte de cargas en lugares de difícil acceso

En ocasiones, los apoyos de las líneas eléctricas están ubicados en lugares de difícil acceso terrestre (zonas de montaña, apoyos rodeados de agua, etc.). En estos casos, puede resultar económico utilizar helicópteros para el transporte de materiales, ya sea durante la fase de construcción de la línea o para determinadas labores de mantenimiento. Dependiendo del tipo de helicóptero y de su carga de pago, se podrán trasladar desde pequeños volúmenes de hormigón hasta apoyos completos.



Figura 14.4. Izado de un apoyo por partes utilizando un helicóptero.

14.2.5. Cambio de elementos con la línea en tensión

Una de las operaciones del mantenimiento de líneas eléctricas son los trabajos en tensión, que son aquellos en los que el operario trabaja, con seguridad, en contacto con los conductores u otros elementos en tensión eléctrica.

Este tipo de trabajos tienen la ventaja de que no necesitan la interrupción del servicio eléctrico (el descargo de la línea) y requieren a su vez de unos requisitos de seguridad específicos.

Los operarios que trabajan en tensión no deben estar en contacto con los apoyos ni con el terreno, mientras están cerca de los conductores. Por este motivo, se puede utilizar un helicóptero para acercar al trabajador a los conductores, de manera que este pueda realizar montajes o desmontajes de elementos en los cables (el helicóptero está suspendido en el aire, que es un buen aislante eléctrico, sin contacto eléctrico con el terreno).

La persona se sitúa con en la parte exterior del helicóptero en una plataforma especial.



Figura 14.5. Trabajos en tensión desde helicóptero.

14.2.6. Limpieza de aisladores

Los platos que conforman las cadenas de aisladores pueden cubrirse con el tiempo de polvo, suciedad y contaminantes que disminuyen las propiedades eléctricas de las cadenas aislantes. Por este motivo, en las zonas afectadas por esta situación se limpia periódicamente con agua a presión la superficie de estos platos.

Puesto que los aisladores están colocados a una altura considerable del terreno y cercanos a los conductores, una práctica habitual es realizar esta limpieza lanzando chorros de agua desde un helicóptero.



Figura 14.6. Limpieza de aisladores desde helicóptero.

El helicóptero lleva acoplada una lanza de limpieza y un depósito de agua destilada diseñados especialmente para este uso.

14.3. Los sarp como herramienta de mantenimiento de líneas

El uso de vehículos aéreos tripulados remotamente como alternativa al helicóptero se ha planteado en numerosas ocasiones por parte de las empresas eléctricas.

En concreto, en REE se han desarrollado diferentes proyectos de investigación que han buscado integrar vehículos radiocontrolados en las tareas de mantenimiento de líneas. Inicialmente, se desarrolló un modelo de helicóptero con motor de combustión (proyecto PELÍCANO) y, posteriormente, con un proyecto de inspección de líneas eléctricas con SARP eléctricos multirrotores y otro sobre el uso de SARP para cartografía de líneas y subestaciones.



Figura 14.7. Helicóptero desarrollado dentro del Proyecto de I+D+i PELÍCANO de Red Eléctrica de España.

El desarrollo reciente de los SARP, proveniente en sus inicios de las aplicaciones militares, la reducción de peso y tamaño de los sensores y los componentes electrónicos, unidos a la aparición de un marco legal favorable, van a posibilitar, previsiblemente, el uso cotidiano de estos aparatos en el mantenimiento de líneas eléctricas. Para que este uso cotidiano se convierta en realidad, habrá que valorar los aspectos ventajosos y las incertidumbres de esta tecnología.

14.3.1. Ventajas e Incertidumbres de los SARP

En el lado de las ventajas, destacan las siguientes:

- **Reducción de costes:** Parece intuitivo que el uso de aparatos más pequeños, ligeros y baratos que los helicópteros tripulados debería dar como consecuencia una reducción de costes en los procesos en los que se integren. Sin embargo, esta previsible reducción solo se podrá contrastar cuando se trabaje de manera habitual con SARP, haciendo una comparación entre los diferentes procesos. Esto no será siempre inmediato, ya que las características de los trabajos realizados por aparatos diferentes son también distintas. Por ejemplo, habría que valorar la autonomía de los sistemas o los problemas de usar una tecnología novedosa.
- **Reducción de riesgos en los trabajos:** Igualmente intuitivo resulta que los riesgos para los trabajadores se reduzcan porque nadie esté presente físicamente en la aeronave. Ante una posible avería del dispositivo, el riesgo se reduce a que haya personas o bienes en el lugar de la caída (un riesgo que también existe en el caso de avería de vehículos tripulados). En todo caso, el dispositivo radiocontrolado es más pequeño y ligero, por lo que el daño sería menor. Por este motivo, los SARP están pensados para ser utilizados en trabajos con características desagradables para las personas, lo que se conoce como trabajos 3D: *Dull, Dirty or Dangerous* (aburrido, sucio o peligroso).
- **Versatilidad:** Como suele suceder cuando aparece una herramienta nueva, inicialmente es utilizada para sustituir o servir de alternativa a otra existente en los procesos de trabajo. Con el tiempo se descubren nuevas aplicaciones o se adaptan las formas de trabajo para aprovechar las características de esta nueva tecnología. Los SARP van a permitir realizar trabajos desde un punto de vista nuevo para el hombre, que no está acostumbrado a volar, y es de prever que irán surgiendo múltiples usos.

Por otra parte, lo novedoso de la tecnología también conlleva que existan incertidumbres, entre las que figuran las siguientes:

- **Fiabilidad:** Está por demostrar que los sistemas sean robustos y fiables. Deberán permitir vuelos estables, sin pérdidas de comunicación con el piloto.
- **Capacidad:** La autonomía de los aparatos tendrá que ser adecuada a los procesos de trabajo. Además, las cargas de pago deberán adaptarse a los SARP para permitir tareas de distinto tipo con calidad suficiente.
- **Normativa:** El marco regulatorio habrá de ser estable y suficientemente flexible para posibilitar el uso de los SARP en aplicaciones civiles e industriales, promoviendo el uso ordenado y organizado de los mismos en condiciones de seguridad, sin que ello suponga tener que hacer frente a trámites burocráticos largos y costosos. En Espa-

ña, se ha dado un paso importante en este sentido tras la aprobación en julio de 2014 del Real Decreto-ley 8/2014, aunque se trate de una normativa transitoria. Para las empresas del sector eléctrico sería deseable que se definiera una servidumbre de aeronavegabilidad asociada a las líneas eléctricas, con el fin de simplificar los procedimientos de autorización de trabajos con SARP en el entorno de las mismas. Las compañías aseguradoras desempeñan también un papel importante en la parte normativa, y adaptarán sus productos en función de la fiabilidad y el uso de los SARP.

- **Renovación tecnológica:** Como todos los dispositivos con componentes electrónicos, se espera que los SARP tengan un continuo desarrollo. Las empresas involucradas deberán estar atentas a los avances tecnológicos y sus impactos en los procesos de trabajo. La expansión de la tecnología deberá ir asociada a un manejo sencillo e intuitivo y un coste de mantenimiento razonable de los sistemas. La continua actualización supondrá un esfuerzo, no solo económico, del que se esperan obtener mejoras como, por ejemplo, la mayor automatización de los trabajos.

14.3.2. Usos potenciales de los SARP en el mantenimiento de líneas eléctricas

Una vez evaluados los aspectos anteriores, los SARP parecen adecuados para determinadas tareas dentro del mantenimiento de líneas eléctricas:

- **Inspección intensiva de líneas:** Es una tarea que se realiza a pie, en la que se inspeccionan visualmente todos los elementos de las líneas. Requiere que el personal se suba a los apoyos. Aunque esta operación se realice en condiciones de seguridad, el uso de los SARP impide el riesgo de caída asociado a los trabajos en altura, y reduce el tiempo de inspección. Además, va a hacer posible la obtención de imágenes desde puntos de vista diferentes. En este caso, la autonomía actual de los dispositivos permite la inspección de uno o dos apoyos, sin cambiar las baterías eléctricas, con pequeños SARP de alas rotativas (multirrotores).



Figura 14.8. Trabajador subido a un apoyo.

- **Inspección aérea de líneas:** Para este trabajo se utiliza un helicóptero tripulado, que recorre la línea inspeccionando los elementos. La sustitución del helicóptero por un SARP para este proceso será viable si se cumplen una serie de condiciones: autonomía suficiente y posibilidad de vuelo fuera de la línea de vista del piloto.
- **Topografía:** La topografía que hoy en día se hace tomando datos desde un helicóptero es susceptible de cambio. Esos datos podrían tomarse desde un SARP si la autonomía y el tramo de línea a topografiar son compatibles. En este caso, es posible que las aeronaves de ala fija muy ligeras den mejores rendimientos, sobre todo para los tramos de línea más largos que requieran vuelo fuera de la línea de vista del piloto. Los sensores LIDAR deberán adaptarse para este nuevo soporte. La topografía tradicional a pie también deberá aprovechar las ventajas de estos aparatos, quizá cambiando la estación base por una estación de control terrestre del SARP.
- **Apoyo en caso de emergencia:** Se usan helicópteros tripulados en el caso de grandes averías para obtener una visión general de los daños en entornos de difícil acceso. Los SARP son una alternativa interesante para esta tarea, siempre que el dispositivo soporte condiciones climatológicas adversas. La obtención de una autorización de vuelo ágil, quizá a través de las autoridades locales que coordinen las actuaciones relacionadas con la emergencia, será clave para ganar tiempo a la hora de reponer el servicio eléctrico lo antes posible.
- **Transporte de cargas:** Los SARP actuales pueden servir para el transporte de elementos ligeros a puntos situados en altura. Quizá puedan utilizarse para manipular objetos que estén en lugares de difícil acceso, ya sea un SARP aislado o agrupados en un enjambre colaborativo. Es posible también que, en el futuro, aparezcan aeronaves especialmente diseñadas para transporte de carga pilotadas remotamente ya que, en teoría, no existen impedimentos tecnológicos para ello.



Figura 14.9. Demostración de trabajo colaborativo de varios SARP.

- **Tendido de cables:** El tendido de los cables de una línea eléctrica se ejecuta habitualmente llevando sobre el terreno un cable piloto desde un apoyo hasta el siguiente. El cable piloto es más ligero que el conductor final y lo bastante resistente como para tirar de él durante el tendido final. Para recorrer esta distancia, que se llama vano, en ocasiones hay que superar obstáculos como, por ejemplo, un barranco profundo, una autopista transitada o un río de gran anchura. Se podrían usar SARP para cruzar estos obstáculos llevando al otro extremo del vano un ligero hilo de nylon, que sirva como cable pre-piloto: se usaría este cable de nylon para tender después el cable piloto.

14.4. Conclusiones

Los Sistemas Aéreos Remotamente Tripulados (SARP) son una herramienta muy interesante para el desarrollo de determinadas tareas propias del mantenimiento de líneas eléctricas. Sin pretender hacer un análisis exhaustivo ni pormenorizado de las mismas, se han descrito los procesos de trabajo que tradicionalmente se han ejecutado en este sector con la ayuda de vehículos aéreos, así como los usos potenciales que parecen más inmediatos para los SARP.

Los SARP podrán ser una buena alternativa en estos procesos si demuestran una serie de características, sobre todo de fiabilidad y rendimiento. Si, además, el entorno normativo resulta favorable, el futuro inmediato del mantenimiento de líneas eléctricas pasará probablemente por esta nueva tecnología.

Sergio MELGOSA REVILLAS*eBuilding*

15.1. Antecedentes

La termografía infrarroja es fundamental para un buen análisis del estado de la envolvente de los edificios para localizar posibles puentes térmicos, defectos de aislamientos, humedades y muchas otras patologías de los edificios.

También en el sector industrial, donde siempre o casi siempre, el calor es una de las variables que deben estar controladas en los procesos de fabricación de componentes. Y, por supuesto, en las propias instalaciones eléctricas de las industrias y de cualquier otro sector.

La termografía infrarroja permite localizar puntos calientes y anticipar fallos del componente y la consiguiente parada de la producción o avería, o en el peor de los casos, el inicio de un incendio. Muchas compañías aseguradoras exigen la realización de inspecciones termográficas a sus clientes.

En el sector de las energías renovables también se trabaja mucho con termografía infrarroja, por ejemplo en la inspección de células solares fotovoltaicas y sus instalaciones.

En definitiva, las inspecciones termográficas son cada vez más demandadas por todo tipo de clientes, convencidos de su importancia y la gran cantidad de información que aporta. Así, cada vez los fabricantes venden más cámaras, sacan al mercado nuevos modelos (en toda la gama de precios imaginable), la **formación** (algo fundamental para el manejo de estos equipos y la correcta interpretación de las imágenes) comienza a ser más demandada por ingenieros, arquitectos, instaladores y mantenedores y muchos otros profesionales.

Sin embargo, cuando una persona adquiere experiencia en las inspecciones a pie, que son las inspecciones que generalmente se hacen (90% podríamos decir), con cámaras portátiles de peso entre los 700 g a los 2.000 g, acaba descubriendo sus limitaciones y con cierta frustración termina su trabajo dejando sin inspeccionar algunas zonas del edificio o industria, bien por la altura de éste, por su extensión o por otras causas que limitan el alcance de la inspección.

Es en estas situaciones en las que el uso de los drones puede ayudar a continuar con la inspección, incluso dando información adicional muy útil, la que proporciona la altura

y el ángulo con el que se va a tomar las imágenes de cubiertas, instalaciones, grupos de edificios, etc.

El poder colocar la cámara termográfica, perpendicular al objeto y sobre éste, permitirá obtener una imagen que hasta ahora no han podido tener los que se dedican a las inspecciones termográficas.

15.1.1. La posición frente al objeto

Como se ve en la Fig. 15.1, desde el dron se ha tomado una imagen amplia de la cubierta, para tener una idea global del trazado de las redes de tuberías y conductos, los equipos de climatización, refrigeración y otros elementos.

Esta imagen puede ser relevante o simplemente ser una más del informe de inspección, pero está claro que sin el dron, no se podría tener y decidir si es significativa o no, si se detecta algún defecto o todo está en orden.

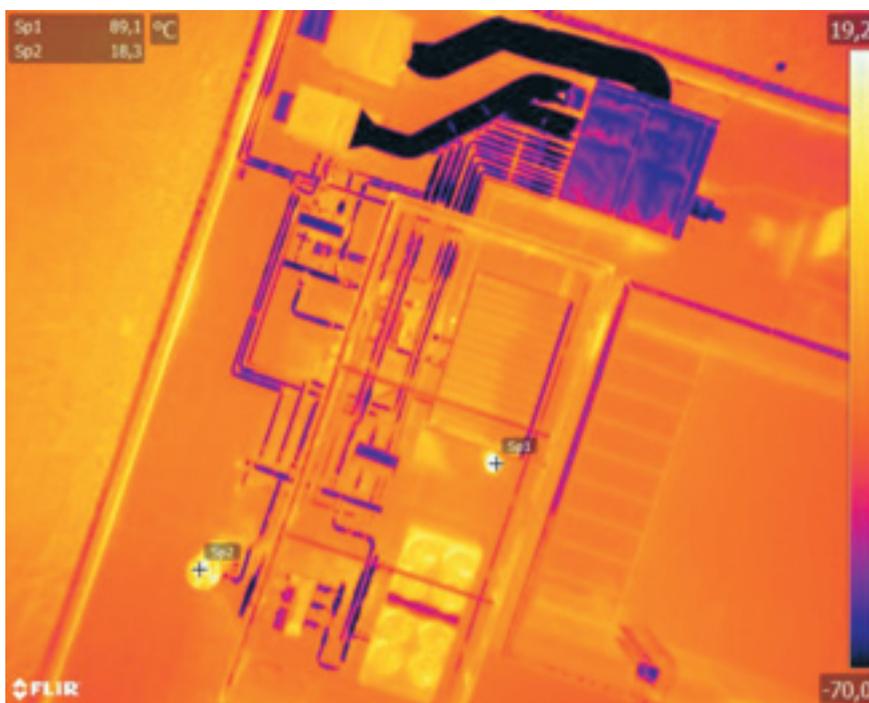


Figura 15.1. Imagen térmica de la cubierta de un edificios con las instalaciones de producción de frío y calor sobre esta.

La posición del observador, y de la cámara, frente al objeto que se analiza es muchas veces fundamental para poder realizar un correcto diagnóstico. Cuando se trabaja con termografía infrarroja básicamente lo que se hace es captar la intensidad de radiación que emiten los objetos, y ésta puede venir en forma de radiación emitida por ellos mismos o reflejada por ellos, por tener cerca otras fuentes de radiación.

El termógrafo experimentado sabe reconocer estas fuentes de reflexión que pueden hacer incurrir en un error de diagnóstico, al marcar un punto caliente o frío, donde realmente no hay nada.

De nuevo se hace referencia a la Fig. 1, donde llama especialmente la atención la baja temperatura de los conductos del climatizador de la parte de arriba de la imagen. ¿Por qué «aparentemente» están tan fríos?

La Fig. 15.2 que se muestra a continuación puede ayudar a comprender esto.

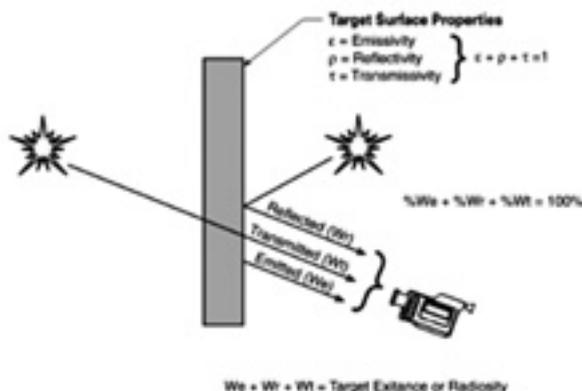


Figura 15.2. Emisión, reflexión y transmisión de radiación infrarroja del objeto.

Como se ve en la figura, desde el objeto llegan a nuestra cámara 3 tipos de radiación, la emitida por el objeto (su temperatura), la reflejada y la transmitida. Ésta última se anula al trabajar con cuerpos opacos al infrarrojo.

Por tanto, se capta radiación emitida y reflejada, y en el caso de la imagen de la Fig. 15.2, ¿de dónde viene la radiación reflejada? Viene del cielo, que está a muy baja temperatura. Esa radiación llega a un objeto altamente reflexivo como es el conducto de chapa de acero galvanizado, que lo refleja a la cámara. No así el climatizador, que es menos reflexivo.

Se ha puesto un ejemplo de un reflejo que puede confundir cuando se hace la inspección termográfica aérea, pero cuando se va a pie, generalmente se encuentran muchos reflejos que no se pueden evitar. Por ejemplo, cuando se inspeccionan edificios de más de 6 plantas, a partir ya de ésta (dependiendo también del material de la fachada) se va a captar bastante radiación procedente del cielo, simplemente por el ángulo con el que se toma la imagen. Es en este caso cuando el dron puede ayudar a hacer la inspección de las plantas superiores, sobre todo si se trata de un edificio de gran altura.

Cuando se hacen termografías cualitativas no nos preocupa tanto la temperatura de los objetos si no el global de la imagen, no así cuando se hacen termografías cuantitativas en la que se deben corregir los parámetros de la emisividad y temperatura aparente reflejada para tomar datos reales de temperatura superficial.

Sin embargo, incluso trabajando con objetos de alta emisividad en los que teóricamente se puede confiar en el valor de temperatura medido, es posible incurrir en errores simplemente por el ángulo con el que se toma la imagen.

Todo lo anterior se puede resumir en la Tabla 1.

Tabla 15.1. Precisión de la medida de temperatura en función de nuestra posición.

PROPIEDAD DEL CUERPO	POSICIÓN FRENTE AL OBJETO	MEDIDA DE TEMPERATURA
Altamente emisivo	Perpendicular	Muy Precisa
Altamente reflexivo	Perpendicular	Muy imprecisa
Altamente emisivo	Oblicuo	Algo Precisa
Altamente reflexivo	Oblicuo	Muy imprecisa

15.1.2. La cámara térmica

Es importante que la cámara termográfica que se seleccione para las aplicaciones aéreas pueda satisfacer los requisitos de esa inspección.

A grandes rasgos debe reunir las siguientes características:

- *Ligereza:* por supuesto cuanto más ligera mejor. No es necesario montar las cámaras portátiles de uso habitual, pues son pesadas y costosas y se acoplan mal al bastidor
- *Robustez:* para soportar sin problemas los aterrizajes y despegues
- *Lentes intercambiables:* debe posibilitar cambiar de lente en función de la distancia a la que se va a operar y otras variables. Una única lente limitará el tipo de imagen que se obtenga.
- *Detector totalmente radiométrico:* esto permitirá medir temperaturas en toda la imagen y no ceñirse a la paleta de colores o a uno o dos puntos centrales.
- *Imagen y video:* debe permitir poder tomar imagen y video
- *Software de análisis:* para analizar radiométricamente el trabajo realizado.



Figura 15.3. Cámara termográfica TAU2 de Flir, con sistema ThermalCapture acoplado (45 g de peso total).

En la imagen superior se ve un modelo de cámara ideal para acoplar al dron, por su ligereza y pequeño tamaño y sus prestaciones.

Una vez encendida la cámara, ya se podrá estar tomando imágenes o videos de los objetos que interesen, desde la posición en la que se tenga el dron.

15.2. Aplicaciones

Cuando se plantea realizar una auditoría energética, en función del alcance de ésta y del edificio o industria que se vaya a analizar, se podrá ver si es necesario realizar un vuelo con un dron con cámara termográfica o no.

¿Qué puede ser de interés termografiar desde el aire?:

- *Cubiertas*: uno de los puntos débiles de todo edificio, desde el punto de vista energético, es su cubierta. Tanto si se trata de una cubierta plana como a dos aguas o de otro tipo, la inspección desde el aire permitirá captar la máxima intensidad de radiación y eliminar todas las fuentes de reflexión posibles (excepto la del cielo, nublado o despejado), además de permitir disponer de una imagen global de la misma y no de únicamente partes de ella.
- *Envolvente*: en el caso de edificios de gran altura, puede ser interesante realizar un vuelo para poder inspeccionar las partes altas del edificio, zonas inaccesibles como terrazas o encuentros de fachadas, especialmente si el edificio tiene una geometría compleja.
- *Escala de barrio*: cuando se realizan inspecciones de edificios, siempre es interesante hacer alguna comparación con otros edificios del entorno. Desde el aire esto será mucho más efectivo y puede que una única imagen baste para que se pueda determinar la eficiencia energética de un barrio entero.
- *Efecto isla de calor*: es posible estudiar este fenómeno con el uso de la termografía aérea, pues como en el punto anterior, la imagen global de un barrio o zona más extensa del territorio puede poner de manifiesto el efecto isla de calor de determinados núcleos urbanos.
- *District heating*: las redes de distribución de frío y calor son grandes conducciones que de no estar correctamente aisladas pueden suponer importantes pérdidas energéticas.
- *Otras aplicaciones* pueden ser las relacionadas con las fugas de agua, contaminación ambiental, inspección aérea de huertos solares

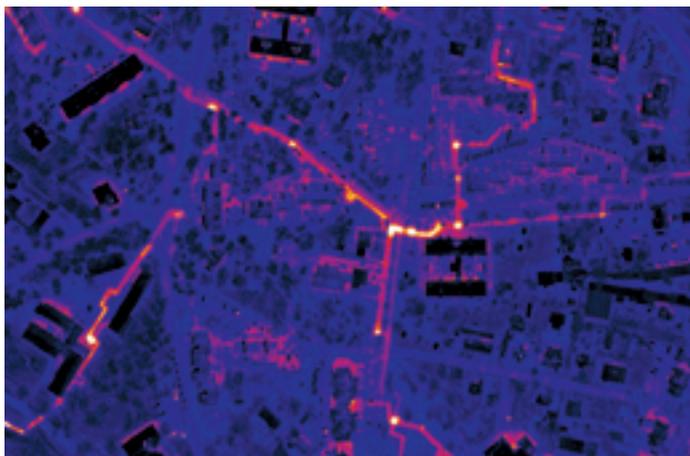


Figura 15.4. Imagen aérea de las redes de calefacción tipo District Heating de la ciudad de Ogre (República de Letonia), (Horus Laboratory).

15.3. Conclusiones

Las aplicaciones de la termografía infrarroja son casi infinitas, pues todos los cuerpos emiten calor. La inspección termográfica aérea no es más que una ayuda para los técnicos, que permitirá obtener un punto de vista nuevo y muy relevante por el ángulo y la distancia a la que son tomados.

También se puede ganar en velocidad de inspección cuando se trata de grandes superficies para inspeccionar. La ayuda del dron puede suponer un importante ahorro de costes de horas de trabajo y la garantía de no dejar ninguna zona sin revisar.



Figura 15.5. Imagen aérea de las envolventes de varios edificios del entorno de Madrid Río.

CAPÍTULO 16

APLICACIONES AL PERIODISMO

Roberto SAURA SÁNCHEZ y Antonio GONZÁLEZ CARRIL

Profesionales del Periodismo

16.1. Introducción

La función del periodista es trasladar los hechos, con las circunstancias que los rodean, desde el lugar en que se producen hasta los destinatarios elegidos en cada caso. Para ello se vale, desde los comienzos, de una serie de herramientas de trabajo. Y hoy día, una de las que más aplicaciones ofrece es el vehículo aéreo no tripulado —más exactamente, tripulado a distancia— que en todo caso será, queda dicho, una herramienta más, no el núcleo de la profesión.

En el principio, era sólo texto. El periodista tomaba notas y declaraciones, redactaba la noticia y la hacía llegar a la redacción y/o talleres, bien fuera personalmente o mediante el correo, el teléfono o el telégrafo, que eran las opciones disponibles.

Más tarde apareció la posibilidad de enriquecer la información con imágenes. La tecnología permitió la reproducción de fotografías en las publicaciones, y ello supuso un gran avance en la labor de transmitir los hechos a los destinatarios. Sin embargo, el proceso no se benefició de ello, pues era preciso, además de lo anterior, introducir dos nuevos elementos: por un lado, la utilización de cámaras, iluminación forzada y placas o película; por otro, el revelado.

Un nuevo paso adelante se produjo con la aparición de las cámaras cinematográficas. Tenían, en sus albores, el problema del tamaño, tanto del aparato en sí como de las bobinas necesarias para las filmaciones. Pero, a cambio, permitían captar imágenes en movimiento y, sobre todo y muy importante, sonido directo. Este aspecto no influyó apenas en la prensa escrita, pero pronto encontró aplicación en documentales o noticiarios cinematográficos, cuya proyección en locales de acceso público permitió un notable avance en la labor de hacer llegar la actualidad a la población en general.

Y esto, por sus pasos inexorables, devino en la televisión. La situación entonces dio un giro llamativamente significativo. A la disponibilidad para hacer llegar imágenes y sonido al espectador se unen los progresos técnicos, con cámaras y películas más pequeñas, baratas y manejables, y la fundamental circunstancia de que los emisores ya están en el punto de destino de la información, es decir, en el domicilio del consumidor. Y la verdadera importancia de esta situación operativa constituye uno de los mayores hitos de la profesión periodística: se podía informar en directo.

Esta es la situación que se ha vivido hasta nuestros días, con el nada despreciable añadido de que en la actualidad también ha desaparecido prácticamente el soporte físico de las imágenes. Ya no son necesarias películas, cintas, emulsiones fotográficas ni magnéticas, con sus servidumbres de manipulación, transporte, almacenaje, degradación, etc.. Ahora se dispone de tratamiento digital de la imagen.

La irrupción de los drones en el periodismo amplía, mejora y agiliza el desarrollo presente y futuro de la profesión. Se dispone de todo lo anteriormente conseguido en cuanto a inmediatez, fidelidad y operatividad, pero con una nueva circunstancia crucial dentro de la labor general del oficio: la seguridad. Porque con un aparato tripulado a distancia, *ya no es necesaria la presencia física del periodista* en el lugar de los hechos. Puede asistir a los mismos con la misma o mayor cercanía que hasta el momento, pero sin arriesgar su integridad ni la del equipo humano que le rodea.



Figura 16.1. Erupción del volcán islandés Bardarbunga en septiembre de 2014, obtenida a través de un dron.

16.2. Presente

Cuando los primeros automóviles comenzaron a circular por los caminos —por supuesto, no existían las carreteras— la normativa establecía que no podrían hacerlo a velocidad superior a la de un ser humano medio. Y que, además, deberían ser anteceditos por una persona que, agitando una bandera, advirtiese a los caminantes de la proximidad del vehículo, para que tomasen las precauciones que estimaran oportunas. Visto hoy día, parece cosa de ficción, pero es que cualquier innovación de la que no existen antecedentes provoca una reacción fuertemente defensiva en la sociedad, dado que nadie está en disposición de evaluar fiablemente las consecuencias de su aplicación. Por lo tanto, los mecanismos reguladores tienden siempre, en sus orígenes y por principio, a ser enormemente restrictivos.

Es lo que ocurre con la situación actual de la legislación¹ sobre utilización de drones, tanto en su vertiente de seguridad (minimización de las consecuencias de posibles accidentes) como de protección de la privacidad e intimidad de los ciudadanos.

De ahí la prohibición de utilizar este tipo de aparatos en zonas muy pobladas (núcleos urbanos) o en la proximidad de grandes concentraciones de personas (playas, estadios, manifestaciones, conciertos).

Así las cosas, y a la espera de la ineludible actualización y flexibilización de las diferentes normativas, la aplicación actual de los drones al periodismo tiene campo en las disciplinas del reportaje y del documental, y en otra muy importante: la obtención de imágenes de catástrofes, naturales o intencionadas.

Ello es así porque este medio permite recibir información desde varias perspectivas —sin olvidar que no hay por qué utilizar un solo aparato— tanto de ángulo como de altura; además, puede transmitir desde lugares o zonas de difícil o peligroso acceso; y sin dejar atrás la posibilidad de colaboraciones interdisciplinarias con el resto de actores en la situación: equipos de rescate, bomberos, policía, sanidad, etc.

En este sentido, y partiendo de un enfoque periodístico, ya están en marcha acciones coordinadas entre los diferentes puntos de vista de cada sector social para mejorar los resultados de las diversas fuentes, así como para la interconexión y la fluidez entre las mismas².

Y, por otro camino, la utilización de esta nueva herramienta está comenzando a exigir una capacitación y un conocimiento de sus posibilidades a los más altos niveles académicos³.

Selvas, desiertos, océanos, ríos, grutas, ruinas, bosques, cultivos, redes de comunicación (carreteras, vías férreas) son por un lado objeto de utilización de los drones en el periodismo de hoy. Pero también terremotos, incendios forestales, ríos desbordados, tsunamis, etc. Y, por supuesto, oleoductos, tendidos eléctricos, gasoductos, canales, plataformas petrolíferas, minas a cielo abierto, etc.

Desde luego, la legislación vigente sobre la utilización de drones está en pañales, como la propia disciplina operativa; pero como vemos, deja abierto un amplio abanico de posibilidades profesionales para comenzar ya el aprovechamiento de sus innegables ventajas y posibilidades.

¹ Real Decreto-Ley 8/2014, de 4 de julio de 2014. (B.O.E. sábado, 5 de julio de 2014).

² Dickens Olewe está gestionando desde Kenia el proyecto African Sky Cam, cuyo objetivo es la recopilación y centralización de imágenes captadas mediante drones por todo el continente africano, de tal modo que las diferentes instancias interesadas en las mismas puedan compartir sus contenidos.

³ Algunas universidades de EE.UU., como Phoenix, Kansas, Missouri, Dakota del Norte o Nebraska, ya tienen seminarios y hasta asignaturas dirigidas a la utilización y conocimiento del manejo de los drones; y en el caso de las tres últimas, incluidas específicamente en los programas de sus facultades de periodismo.

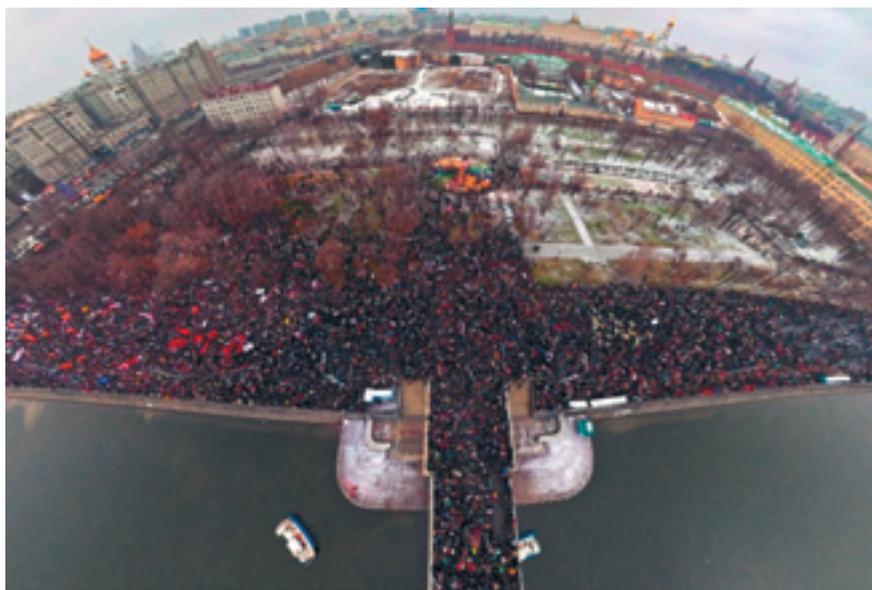


Figura 16.2. Un dron equipado con objetivo gran angular (ojo de pez) tomó esta panorámica de una concentración en Moscú.

16.3. Futuro

Como decía Mika Waltari, por boca de su personaje *Sinuhé*, el egipcio, del mañana nadie está seguro. Pero esta afirmación, innegablemente veraz, tiene dos vertientes. La una, inclina a la mesura, y a no levantar los pies del suelo en base a futuribles no contrastables; pero la otra, anima a dejar volar las ideas, a abrir la mente a un futuro tan amplio, nuevo y enriquecedor como las aportaciones de los más inverosímiles sueños.

De este modo, se puede esperar que las regulaciones legales pertinentes para el uso de los drones vayan evolucionando a favor de una mayor amplitud de aplicaciones y flexibilidad de utilización, dado que lo lógico es que tanto los aparatos en sí como los instrumentos que transporten sean cada vez más ligeros, más fiables y más pequeños, sin perder por ello operatividad. Esto, evidentemente, redundará en una mayor seguridad de uso, porque no es lo mismo perder el control de un dron de veinte kilos de peso y rotores de gran diámetro y revoluciones, que uno de quinientos gramos y hélices protegidas. Esta es una primera aproximación, puesto que la teoría ya alcanza a aparatos minúsculos, tanto que existe en la actualidad un proyecto para polinización con drones del tamaño de insectos, por ejemplo. No olvidemos tampoco que, como ocurre siempre en el mercado, las facilidades que se vayan produciendo en la comercialización y manejo de los drones redundará en una mayor abundancia de oferta de los mismos, lo que conllevará necesariamente a una reducción significativa de su precio. Todo ello, por descontado, con imágenes de la mayor definición⁴ y hasta formato 3D.

⁴ En Japón existen organismos y corporaciones que están trabajando en la obtención de imágenes con definición de 6K y superiores.

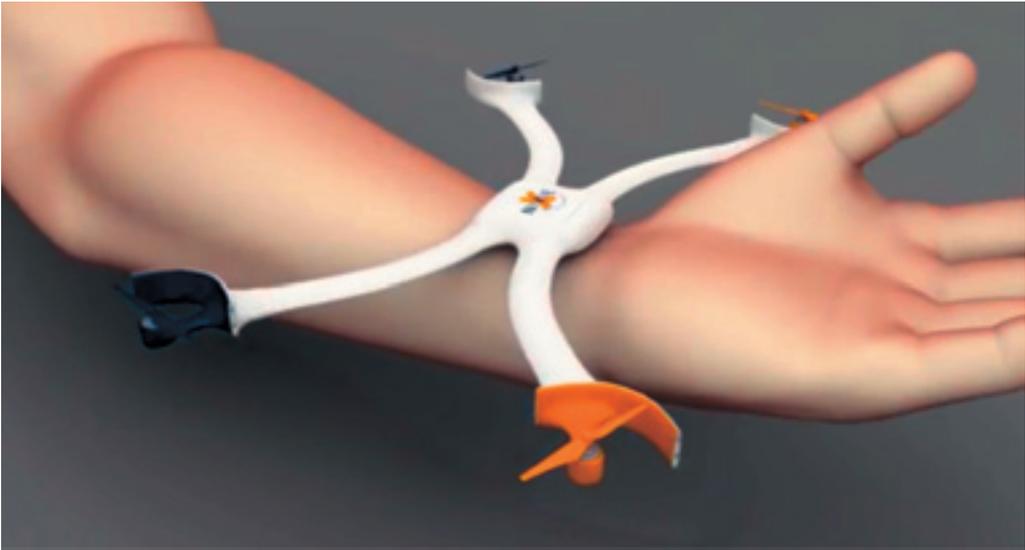


Figura 16.3. Prototipo de dron de gran ligereza y manejabilidad. Sus brazos, muy flexibles, pueden ajustarse a la muñeca como un brazalete.

Por tanto, y en base a las previsiones de manejabilidad, autonomía, seguridad y precisión que cabe esperar en el inmediato futuro de los drones, unidas a las de perfeccionamiento, fiabilidad y operatividad que sin duda se producirán en los medios incorporados al aparato en sí (cámaras, micrófonos, sensores), el abanico de posibilidades que se abre es prácticamente ilimitado. Por citar sólo algunos, se podrían utilizar los drones para cubrir eventos periodísticos como:

- Manifestaciones, tanto en el cálculo fidedigno del número de participantes como en el seguimiento de la evolución de las mismas, y de las actuaciones de los manifestantes y elementos periféricos (policía, vecinos, posible vandalismo, etc.).
- Eventos deportivos, no sólo en recintos y estadios sino, sobre todo, pruebas ciclistas, maratones, rallies, regatas, etc.
- Zonas conflictivas y/o peligrosas: guerras, minas a cielo abierto, cavernas, selvas, vertederos, cultivos ilegales y/o abusivos, etc.. No hay que olvidar que un aparato no tripulado puede tener acceso, sin riesgo para nadie, a territorios o actividades a los que en la actualidad está vedado el paso a los periodistas, pero no por la ley, sino precisamente por todo lo contrario: señores de la guerra, explotación ilegal de mano de obra, abuso de poder del contratista, trabajo infantil, condiciones de salubridad inadmisibles, deforestación incontrolada, etc.
- Catástrofes naturales, como erupciones volcánicas, terremotos, tsunamis, tornados, desbordamiento de ríos, etc.. Y no tan naturales, del tipo de incendios, forestales o no, sobreexplotación maderera o pesquera, diques o presas fracturados, vertidos tóxicos, etc.
- Atentados terroristas.
- Culturales y científicos: Machu Pichu, Birmania, Himalaya, Atapuerca, Arte Rupestre en cuevas de difícil acceso para un ser humano, etc.

- Deporte Extremo: escalada, esquí fuera de límites, espeleología, parapente, vela en mar abierto, etc.
- Accidentes de gran magnitud y comprometido acceso: colisiones en cadena, descarrilamientos, buques a la deriva, etc.



Figura 16.4. La utilización de drones permitió lograr esta imagen del comienzo de los trabajos de reflotación del crucero «Costa Concordia».

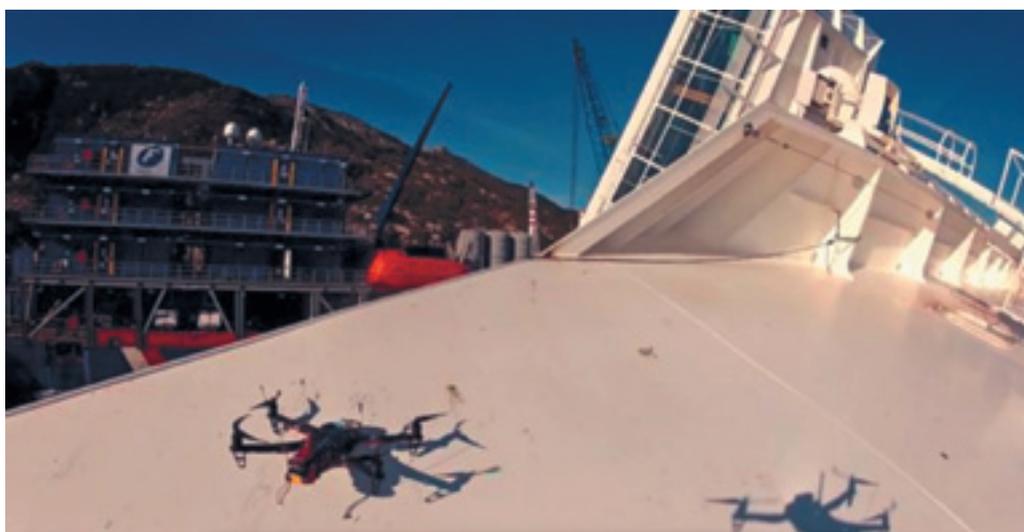


Figura 16.5. Ejemplo de la utilización de más de un dron para conseguir diferentes perspectivas.

En definitiva, y por no ampliar excesivamente la enumeración de posibilidades, se debe concluir que la aportación de los drones al periodismo es, a partir de hoy, tan amplia como se pueda imaginar; y dada la velocidad que los avances tecnológicos de todas las disciplinas registran en los últimos años, no sorprendería que, en un futuro más próxi-

mo que lejano, incluso la imaginación se quedase muy por detrás de los logros reales que se alcancen.

16.4. Bibliografía

BARRERA, C. (Coordinador) (2004): «Historia del Periodismo Universal». Ariel. Barcelona.

DÍAZ ARIAS, R. (2006): «Periodismo en Televisión. Entre el espectáculo y el testimonio de la realidad». Bosch. Madrid.

JORDÁN, J. y BAQUÉS, J. (2014): «Guerra de drones. Política, tecnología y cambio social en los nuevos conflictos». Biblioteca Nueva. Madrid.

PANTOJA CHÁVEZ, A. (2007): «Prensa y Fotografía. Historia del Fotoperiodismo en España». Universidad de Extremadura.

CAPÍTULO 17

APLICACIONES DE RESCATE

Juan José DÍAZ MARCOS

Drones Rescue Spain (DRS)

17.1. Introducción

Cada vez son más frecuentes los cataclismos atmosféricos que pueden ocasionar la pérdida de vidas, desbordamientos, fuegos, tsunamis, terremotos, inundaciones, etc..

Si a estos fenómenos se añaden los factores de riesgo ocasionados por los propios humanos en el desarrollo de actividades industriales, como fugas de radioactividad, incendios, vertidos contaminantes, o simples prácticas deportivas, bien sean acuáticas, de montaña, esquí, etc., se tiene el escenario perfecto para trabajar con drones.

Un grupo multidisciplinar de voluntariado con equipos de altísima tecnología puede ayudar a conservar la vida de una persona o a realizar un análisis más rápido en situaciones de emergencia, en las cuales pueden correr peligro, no ya una, sino cientos de vidas.

Una visión global aérea de un cataclismo puede brindar la posibilidad de tomar decisiones correctas.

Todas estas actuaciones de rescate pueden depender de la rapidísima actuación de los drones, que son capaces de maniobrar y operar en los lugares más inhóspitos, despegando desde tierra, mar —una nave, una barca, una roca—, o aire, es decir, ser lanzados por su propio piloto.

Pueden llevar a cabo desde la localización de una persona desorientada (mayor, enferma, medicada, con capacidad reducida, etc.) en un bosque, un maizal..., hasta la de un cuerpo inconsciente en una costa.

En ese último caso, con un dron se le podría intentar «despertar» y portaría medicamentos y un salvavidas de emergencia.



Figura 17.1. Mapa de España en el que se aprecia el voluntariado de rescate con drones y logo de Drones Rescue Spain (DRS).



Figura 17.2. «Premio Colaboración DRS Exhibición de Drones Ala 12 Base Aérea de Torrejón de Ardoz. Madrid». De izquierda a derecha: Raúl Ferreiro (colaboración en marketing y desarrollo), Julia Rivera (colaboración en comunicación), el subteniente José Pradas Murcia y Juan José Díaz (fundador y director de Drones Rescue Spain).

17.2. Los inicios

El origen de Drones Rescue Spain se encuentra en el radiocontrol. En agosto de 2014 se puso en marcha una página de Facebook (<https://es-es.facebook.com/DronesRescueSpain>) que nació con la intención de llevar a cabo de rescates y ayuda humanitaria en desastres naturales. A las 24 horas se presentó el primer voluntario con dos equipos disponibles, y en pocas semanas se alcanzó una docena de pilotos inscritos repartidos por toda España. La web se acaba de posicionar en la Red: www.dronesrescuespain.es



Figura 17.3. DRS: una comunidad de voluntarios que aporta equipos y tecnología dron para emergencias y rescate.



a)



b)

Figura 17.4. Códigos QR de Drones Rescue Spain: a) DRS en Facebook. b) www.dronesrescuespain.es

17.3. Los medios

Los drones, por lo general, presentan una capacidad de respuesta en tiempo record, y cada vez aportan nuevas posibilidades para el apoyo que con otros medios sería inviable o muy poco eficiente.

Sin embargo tienen la gran limitación de su limitada permanencia en vuelo. Además, las herramientas, dispositivos, o elementos de auxilio que porten en vuelo incrementan el consumo de batería de forma muy acusada.

Hoy en día circulan por Internet videos de prototipos de drones capaces de transportar aros salvavidas desde la costa o la playa hasta varios kilómetros mar adentro, y que demuestran una asistencia más rápida que una moto de agua.

En cuanto a las cámaras, pueden trabajar con termografía, visión nocturna, multiespectrales, réflex (Canon Eos 5D), pudiendo llegar a cámaras en tres dimensiones.



Figura 17.5. Diseño de coche helicóptero.

Fuente: <http://www.tecnoneo.com/2013/12/helivehicle-diseno-de-coche-helicoptero.html>.

Los drones son capaces de acudir a un punto fijado por GPS, con un desfibrilador, y facilitar la asistencia técnica y médica desde la propia cámara del dron.

La clave está en la idoneidad y competencia que tenga un dron de portar objetos, sistemas o medios.

Por tanto, los drones georreferencian y pueden inspeccionar y gestionar situaciones de peligro.

Se pueden pilotar en condiciones difíciles, vuelan alto y vuelan muy bajo, despegan y aterrizan en espacios «imposibles» y los pilotos de DRS pueden reparar *in situ* sus drones.



Figura 17.6. Modelo de dron TBS: equipo de alta velocidad que permite un vuelo superior a los 100 kms /h. Algunos pilotos de Drones Rescue Spain son capaces de pilotar este modelo entre olivares en visión FPV (*First Person View*, visión desde la cabina).

Estos dispositivos se pueden «posar» en un tejado, los hay minúsculos (del tamaño de una mariposa), y son altamente versátiles. Vuelan solos o en grupo, y llegan a los lugares más peligrosos y de mayor dificultad de acceso. Están superando en muchas de sus habilidades a sus primos-hermanos, los robots terrestres, entrando en lugares que a ellos les resultan inaccesibles.



Figura 17.7. Modelo de ala fija.

Los drones suponen una valiosa ayuda para los cuerpos de seguridad del Estado, los ciudadanos, y en definitiva están suponiendo un gran avance para todo el planeta, algo que queda demostrado pues ya hoy en día evitan muchas pérdidas humanas.



Figura 17.8. Modelos retráctiles.



Figura 17.9. Modelo *Inspire 1*, última creación del mayor vendedor del mundo de los drones, Dji.

17.4. Usos de los drones

Si algo ha cambiado rápido en estos últimos tiempos es la visión popular a cerca de los drones. Apenas hace unos meses, volar un dron suponía escuchar agradables comentarios y opiniones de asombro sobre el diseño o las capacidades del «juguete». Hoy es muy habitual que quien observa el vuelo de un dron se pregunte si está prohibido hacerlo. Y es que parece ser que se está estigmatizando esta herramienta cuyas capacidades son tan beneficiosas que deberían despejar las dudas sobre la legalidad de su manejo.

El despliegue de esta tecnología supone un cambio radical en labores de ayuda y rescate de vidas humanas, desde el posicionamiento óptimo, la logística y aporte de medios, hasta el rescate de vidas en sí mismo.

No es posible saber si en su día, los primeros fabricantes de coches llegaron a imaginar que su invento se utilizaría para el transporte urgente y el salvamento de vidas, lo que hoy en día son las ambulancias. Por el momento, los drones, a diferencia que una UVI móvil, no pueden atender al paciente en movimiento durante su traslado con la participación de varios doctores. Pero sí que es posible ya el transporte urgente en un dron de una pastilla potabilizadora o antitérmica, el antídoto para un veneno, o una jeringuilla para la insulina, algo que pueden marcar la diferencia entre la vida y la muerte.

Con equipos de media y gran capacidad, los drones podrán trasladar heridos de forma autónoma, mientras son atendidos a distancia por el personal médico gracias a una visión en directo y a más de veinticinco kilómetros. Todo ello pensando en dar servicio de urgencia tanto en ciudades como en redes rurales. Actualmente, ya existen proyectos para el envío urgente de un dron que pueda portar un desfibrilador.

Los drones de rescate han entrado en acción en zonas de contaminación, tras un accidente nuclear, en terremotos, inundaciones, etc.. Son pequeños y pueden buscar personas y objetos en grandes áreas, incluso de noche. Consiguen imágenes accediendo a edificios a punto de caer, buscando supervivientes y obteniendo datos e información vital. Son capaces de realizar vuelos entre el humo de los incendios e identifican térmicamente siluetas de personas para saber dónde están atrapados o si se han desmayado y están inconscientes. En atmósferas explosivas y tras accidentes por explosión de gas, inspeccionan y toman muestras del aire, pasan entre los escombros localizando a las personas, se mueven rápido y pueden recoger muestras de agua contaminada o sustancias químicas tras acceder a sitios inverosímiles.



Figura 17.10. Unidad móvil que colabora con *Drones Rescue Spain* durante trabajos y vuelos nocturnos con drones.

Los siguientes retos ya están en marcha con el desarrollo de novedosos sistemas de energía, de baterías, y aplicaciones smart, lo que conducirá a un abanico de posibilidades de ayuda mucho más amplio. Así, *Drones Rescue Spain* cuenta en la actualidad con drones que tienen capacidad para transmitir a cualquier centro de mando e, incluso, a cualquier plataforma de televisión o empresa audiovisual para que estas puedan emitir en directo.



Figura 17.11. a) Helicóptero sniper de fabricación española. b) Dron TALI H500.

Los drones son una rápida fuente de información para los servicios médicos, llegan antes que una ambulancia en los accidentes de tráfico, transportan objetos tan vitales como un teléfono móvil, agua, una cuerda, kits de supervivencia, medicamentos y hasta desfibriladores. O lanzan un salvavidas allá donde la bravura del mar en unión con las rocas no permite acercarse a nadie.

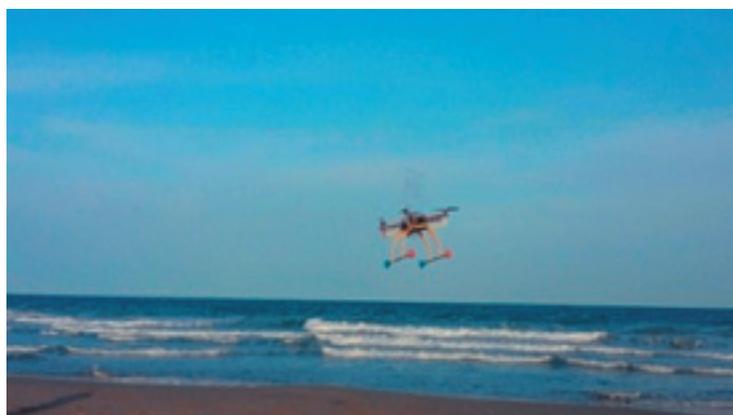


Figura 17.12. Entrenamiento de los pilotos de Drones Rescue Spain en condiciones de viento fuerte, incluso sin sistemas de ayuda GPS o modo ATIL.

¿Por qué suspender la búsqueda de un montañero desde un helicóptero cuando hay niebla o se hace de noche? Porque no hay drones, este era hasta ahora el único motivo. No es necesario poner en peligro la integridad de un piloto puesto que un dron puede sustituir a un helicóptero sin que se arriesguen más vidas humanas.

Los drones pueden ser miles de ojos buscando supervivientes, ya que emitiendo en directo y por Internet las imágenes de grandes áreas de peligro, los propios internautas pueden ayudar en las localizaciones. ¿Por qué no enviar muchos drones a una zona incomunicada y que entre todos generen una red wifi que permita enviar señales entre personas y comunicarse con centros de rescate? Y todo ello en apenas unos minutos, visualmente, y en tiempo real, enviándolo al instante a los centros de control, mejorando así los resultados y disminuyendo los costes.

En resumen, es posible concebir un futuro muy próximo con aplicaciones para smart phones en las que los ciudadanos tengan la seguridad de poder solicitar y contar con un dron ante cualquier situación de necesidad, urgencia y de peligro.

17.5. Un plan en drones rescue spain para 2014-2019

En *Drones Rescue Spain* se ha pensado a cinco años vista: reforzar el desarrollo de tecnología propia, primando la excelencia multidisciplinar, la innovación y liderazgo, y garantizando la seguridad de los equipos.

Además, gestionar el crecimiento para obtener el retorno de lo invertido y así dar viabilidad de continuidad. Incrementar la eficiencia de operaciones, tanto de mantenimiento de equipos como de actuaciones conjuntas, ejecutando simulaciones y prácticas. Optimizar la cadena de suministro, reduciendo el coste de compra a través de patrocinadores y partners.

Más puntos a contemplar son: reposicionar nuevos pilotos, aumentando la capacidad de soporte en servicio mediante acciones publicitarias y acuerdos con entidades y marcas. Gestionar activamente al personal colaborador enfocado a la generación y retención del talento, así como la mejora en la gestión que permita y asegure la consecución de los objetivos estratégicos.

Este tipo de dispositivos, los drones, utilizados en paralelo a la intervención humana, pueden resultar herramientas vitales a la hora de detectar, localizar y rescatar a víctimas de catástrofes naturales como los terremotos o incidentes como el hundimiento de minas o los accidentes de transporte o industriales. El rescate de personas en este tipo de condiciones puede resultar peligroso para los miembros del servicio de respuesta rápida ante emergencias. Sin embargo, los dispositivos no tripulados pueden evitar mayores males y colaborar de manera eficaz con los humanos en condiciones complicadas

17.6. El proyecto icarus

El Icarus se ensayó en Marche-en-Famenne (Bélgica), durante septiembre de 2014, con una serie de sensores y vehículos aéreos y terrestres. El proyecto llevó a cabo pruebas de campo con dispositivos capaces de servirse de tecnologías de reconstrucción tridimensional para localizar víctimas, como el *Skybotix Hexacopter*, diseñado para buscar en interiores, y el *Multicopter*, capaz de operar en exteriores. El control de los vehículos, ensayado también en el seno del proyecto, se logró mediante una plataforma de mando, control e inteligencia y un sistema de comunicaciones que sirvió de conexión entre los distintos componentes del sistema.

Desde el consorcio se informa que los ensayos mostraron el correcto funcionamiento de los componentes del sistema y su fiabilidad sobre el terreno, pero sin duda aún queda mucho camino por recorrer.

Los dispositivos de Icarus ya se han empleado tras una de las catástrofes naturales más graves que ha sufrido Bosnia-Herzegovina en el último siglo. Un vehículo aéreo no tripulado, el cuadricóptero Microdrone MD4-1000, se utilizó para evaluar los daños provocados por las inundaciones de 2014 y detectar la ubicación probable de minas anti persona desplazadas a causa de los corrimientos de tierras. Para garantizar que se ajustan a las necesidades de los servicios de emergencia y las de otros usuarios, Icarus ha puesto en marcha un programa para usuarios pioneros.

El proyecto ha sacado a la venta, por 3.900 euros, el sensor Visual Inercial, para su empleo en vehículos no tripulados y plataformas robóticas. El precio está rebajado con el propósito de animar a equipos de investigadores de todo el mundo a que lo utilicen y remitan sus opiniones al proyecto, y así lograr que un producto ya listo para el mercado se convierta también en uno fácil de usar.

El proyecto Icarus, coordinado desde Bélgica, cuenta con veinticuatro socios pertenecientes a los ámbitos de la investigación, la empresa y las organizaciones sin ánimo de lucro.

Se mantendrá activo hasta finales de enero de 2016, habiendo comenzado en febrero de 2012, y cuenta con un presupuesto total de algo más de 17 M€, 12 de los cuales proceden de la Unión Europea.

17.7. Algunos enlaces de interés

	Combo serpiente-robot y cuadricóptero para acceder a cualquier lugar: http://www.youtube.com/watch?v=Dhg1pXMz1ZM&feature=youtu.be
	Acuacóptero con estabilizador Gimbal: http://www.youtube.com/watch?v=IlgMJ9JCl88&feature=youtu.be
	Nitrofirex - UAV para la extinción de incendios: http://www.youtube.com/watch?v=1dlByazuO6Y

	<p>Drones HP Matter para labores humanitarias: http://www.youtube.com/watch?v=vTRoDvk8dOE&feature=share</p>
	<p>Nano Drones: http://www.youtube.com/watch?v=cjYznlafNzY</p>
	<p>Grandes Drones. Los Top 10 del mundo: http://www.youtube.com/watch?v=bzxkPyof2H0</p>
	<p>Sincronización y precision: http://www.youtube.com/watch?v=3zE6BaFDkP4</p>
	<p>El robot libélula: http://www.youtube.com/watch?v=TDuvBurbjVU</p>
	<p>Avispón Black Hornet - PD-100 PRS http://www.youtube.com/watch?v=4o7mRg74qcY</p>
	<p>Proyecto Icarus de la UE http://cordis.europa.eu/news/rcn/121874_es.html</p>

Francisco Javier MESAS CARRASCOSA y Alfonso GARCÍA-FERRER PORRAS

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes
Universidad de Córdoba*

18.1. Introducción

Las plataformas aéreas no tripuladas, en adelante UAV, han emergido con gran fuerza en los últimos años. Numerosas son las aplicaciones desde el punto de vista civil donde su uso está originando la aparición de nuevas líneas de negocio. Aplicaciones en agricultura, emergencias, ingeniería civil, patrimonio o energía están centrando en buena medida su uso. Ante esta situación se hace necesario el establecimiento de un marco regulatorio en su uso. En el caso de España éste queda definido con carácter temporal por el Real Decreto-ley 8/2014 de 4 de Julio. Actualmente, y hasta que no esté aprobada la reglamentación definitiva, las operaciones que se pueden realizar se limitan a zonas no pobladas y al espacio aéreo no controlado. El objetivo del presente capítulo pretende poner de manifiesto la contribución de este tipo de aeronaves en la gestión y diseño de una ciudad, abarcando desde la producción de cartografía en su enfoque más tradicional hasta el apoyo en el desarrollo de un urbanismo sostenible.

El auge en el uso de UAV se debe en gran medida a dos factores claves: demanda de información geográfica y miniaturización de sensores. En primer lugar nos encontramos en un escenario donde el uso de la cartografía se ha democratizado. El perfil de usuarios que maneja y demanda información geográfica es amplio. Esta cartografía ha de ser actual y rápida, demandándose al mismo tiempo una información exacta. Esta exactitud debe ser entendida en todas sus componentes: posicional, temática, compleción, lógica y/o temporal. El usuario actual no solo demanda un producto que esté bien georreferenciado, además quiere que éste sea actual. Si bien el espacio geográfico es dinámico, este dinamismo se acentúa en espacios urbanos. Las metodologías y plataformas convencionales de producir información geográfica hacen que en ocasiones, bien en términos técnicos o económicos, resulte inviable tener actualizada la base de datos cartográfica. Es en este punto donde los UAV ocupan su posición dentro del proceso de producción cartográfica, siendo posible generar productos cartográficos actualizados de pequeñas áreas. Además, debido al avance tecnológico en el diseño de sensores, estos han reducido sus dimensiones y peso. Esto permite emplear sensores RGB, multispectrales, hiperespectrales, térmicos, etc. Por tanto, casi todos los productos cartográficos que podamos generar desde una plataforma tripulada es posible abordarlos con plataformas no tripuladas. La gran diferencia estriba en el tamaño de la superficie abarcada.

A lo largo del capítulo se presentan distintas acciones e iniciativas donde los UAVs son empleados con éxito en el desarrollo de tareas relacionadas con el diseño y gestión de una ciudad.

18.2. Aplicaciones

El trabajo y uso de sistemas UAV, en la mayoría de los casos, es de máximo interés si cumple alguna de las tipologías de misión calificadas como «D»: *Dull, Dirty o Dangerous* (Braybrook, 2004). En este apartado se presentan un conjunto de utilidades donde una plataforma UAV puede resultar una herramienta eficaz en la gestión de un entorno urbano, estando primada la resolución temporal de la información, desarrollando trabajos que cumplan alguna de las tipologías citadas anteriormente. En ocasiones, algunos de los usos de un sistema UAV resultan similares a los ya realizados con plataformas tripuladas; a tal efecto estos sistemas ofrecen una nueva alternativa de abordar un proyecto. Dada la relativa facilidad en la adquisición de información frente a otros sistemas es posible pensar en nuevas aplicaciones además de las clásicas de producción cartográfica, primando la máxima actualidad en la información.

El esquema conceptual a la hora de trabajar con sistemas UAV, Fig. 18.1, supone en primer lugar definir de forma clara cada uno de los objetivos que se pretenden alcanzar en la aplicación a desarrollar. A partir de este punto es necesario seleccionar la arquitectura de plataforma de vuelo más adecuada así como los sensores a emplear. Con respecto a la arquitectura de la plataforma, las mas empleadas son las de tipo multi-rotor, ala fija y helicóptero. Algunos de los factores a considerar en su elección son el área a cubrir, el modo de captura de la información o la capacidad de carga de pago. Con respecto a los sensores empleados para recoger información del territorio van desde cámaras RGB de uso común a sensores multispectrales o hiperspectrales. Estos tienen como objeto formar imágenes trabajando en diferentes rangos del espectro electromagnético, permitiendo desarrollar aplicaciones de producción de cartográfica clásica hasta la aplicación de técnicas de teledetección. Además es posible emplear otros tipos de sensores para el control de contaminación, recolectores de datos procedentes de otros sensores, etc.



Figura 18.1. Esquema conceptual proyecto UAV: Definición de la aplicación, selección de la plataforma de vuelo y elección d sensores. (Fuente: Elaboración propia).

Una de las aplicaciones más directas y populares en el uso de plataformas no tripuladas es la generación de productos cartográficos. Mediante el empleo de sensores RGB de uso común es posible asistir tanto en el desarrollo de una planificación urbanística en su fase de diagnóstico como de ejecución. Los productos cartográficos que pueden producirse son los mismos que se pueden obtener a través del uso de una plataforma de vuelo tripulado: modelos digitales de superficies (MDS) y elevaciones (MDE), ortofotografías y/o cartografía vectorial. En función del tipo de actuación a desarrollar se hace necesario definir el tipo de plataforma de vuelo más adecuada. Las plataformas de vuelo de tipo ala fija permiten abarcar más territorio debido a que presentan, por lo general, una autonomía de vuelo superior a una hora, pudiendo alcanzar hasta tres horas en algunas ocasiones. Igualmente, plataformas de vuelo de tipo multi-rotor pueden ser empleadas para trabajos de carácter local, donde es necesario tener información de una zona acotada donde se esté desarrollando o se haya desarrollado una determinada actuación, con nulos requerimientos de despegue y aterrizaje.

Para que el producto elaborado tenga la categoría de «cartográfico» es necesario seguir un flujo de trabajo idéntico al empleado en un proceso fotogramétrico clásico. Es necesario calibrar el sensor empleado, realizar un apoyo topográfico y calcular una aerotriangulación. A partir de esta última fase es posible generar un MDE y/o un MDS así como ortofotografías y restituciones. Los niveles de exactitud posicional alcanzados permiten que estos productos puedan ser empleados en trabajos de ingeniería y/o arquitectura (Mesas-Carrascosa, *et al.*, 2014a; Mesas-Carrascosa, *et al.*, 2014b). El producto conseguido es una herramienta perfectamente válida tanto en las fases de diagnóstico y elaboración de planes urbanísticos como en las tareas de seguimiento y ejecución de dichos planes. Es posible generar cartografía antes y después de una determinada actuación, la cual puede pasar a un repositorio de datos donde un servicio técnico tendrá una cartografía del territorio actual donde apoyarse para abordar proyectos o asistir a la toma de decisiones. Probablemente, desde este punto de vista las plataformas UAV pueden operar de forma alternativa a los vuelos fotogramétricos tradicionales. En este sentido, esto no quiere decir que una plataforma sustituya a la otra sino que son complementarias. Cada actuación o proyecto implica una fase previa donde analizar qué sensores, necesidades, urgencia en la adquisición de información y superficie es necesario cubrir.

La urgencia en la toma de información en ocasiones es un factor clave a la hora de la elección entre una plataforma tripulada o no tripulada, no siendo posible en ocasiones el poder volar con las primeras. Otro aspecto a considerar es la superficie a cubrir, una gran superficie como la abarcada por un término municipal no es posible cubrirla con un vuelo de una plataforma UAV debido a la autonomía pero sí es factible cubrir pequeñas áreas donde el territorio por su dinamismo haya sufrido o vaya a sufrir cambios. En la Fig. 18.2 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos a partir de un vuelo UAV con un sensor RGB. La Fig. 18.2.a se corresponde con una ortofotografía que informa sobre el resultado final de una acción urbanística. La Fig. 18.2.b es la imagen más actual de la misma zona obtenida mediante plataformas convencionales. Resulta fácil advertir como no se tiene información de la zona de ampliación tras la finalización de la ejecución, contando con una información desactualizada.

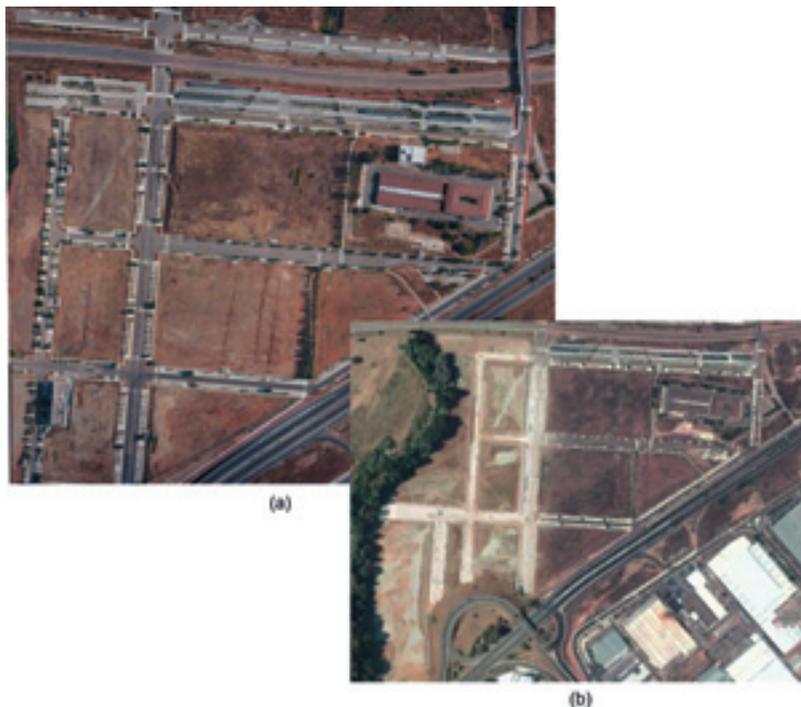


Figura 18.2. Comparativa temporal productos cartográficos: (a) mediante el empleo de plataformas UAV y (b) plataformas convencionales (Ortofografía UAV producida por Aerometric Lab, Universidad de Córdoba).

Además de poder generar un repositorio de ortofotografías y/o cartografía vectorial donde se muestre la dinámica de un territorio, los productos obtenidos constituyen una excelente base cartográfica donde poder fotointerpretar, identificar y localizar elementos de interés en la gestión urbanística de una ciudad. Es posible digitalizar aquellos fenómenos de interés mediante herramientas SIG y/o CAD. En función de la arquitectura del sistema empleado por la administración local toda esta información puede incorporarse a bases de datos geoespaciales.

Uno de los usos es la asistencia y apoyo a la Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales (EIEL). Dicho proyecto tiene por objeto conocer con carácter periódico la situación y el nivel de dotación de las infraestructuras y equipamientos locales, permitiendo poder evaluar posibles necesidades, mejorando las inversiones y la planificación. La cadencia en la actualización de la información es anual. Si bien hoy día la información no es obtenida mediante el uso de UAV, el mantenimiento de la información geográfica de estas bases de datos puede ser desarrollada de forma continua mediante su uso. La monotonía en la ejecución de los trabajos cumple con una de las dimensiones donde el uso de UAV muestra su máximo interés, permitiendo agilizar los trabajos de captura e inspección bajo ciertas condiciones. A partir de una ortofotografía georreferenciada es posible extraer las coordenadas de los distintos elementos y asociarles una serie de atributos que los caractericen, conformando una base de datos geográfica con el inventario de equipamientos presentes en un área geográfica. En la Fig. 18.3 se pueden

identificar elementos relacionados con luminarias, registros de agua, etc., los cuales pueden ser registrados y formar parte de un inventario.



Figura 18.3. Detalle de ortofotografía producida mediante plataforma UAV donde se identifican equipamientos urbanos (Ortofotografía UAV producida por Aerometric Lab, Universidad de Córdoba).

El control y vigilancia del espacio urbano desde distintos puntos de vista, como puede ser todo lo que afecta al uso y explotación del mismo, vertidos y materiales tóxicos o sencillamente seguridad, son otros aspectos de especial interés.

Las plataformas UAV puede ser empleadas como policías urbanísticos a partir de las cuales poder detectar cambios en el territorio tales como presencia de nuevas edificaciones. Estas tareas pueden ser abordadas desde dos espacios distintos aunque complementarios: los espacios bidimensional y tridimensional. En el espacio bidimensional, trabajando con ortofotografías es posible detectar la ausencia o presencia de nuevas edificaciones aplicando técnicas de detección de cambios aplicadas a imágenes. Por el contrario, en el espacio tridimensional es posible detectar cambios estructurales tales como la construcción de una nueva planta en una edificación. Para ello mediante procesos de correlación de imágenes (Fig. 18.4) es posible obtener modelos digitales de superficie (MDS). Mediante la comparación de MDS de distintas fechas es posible detectar y localizar cambios y modificaciones derivados de un cambio en altura.

Dada la relativa facilidad en realizar vuelos no tripulados de forma sistemática es posible planear vuelos con cierta periodicidad sobre un espacio geográfico registrando información que posteriormente es contrastada con las bases de datos geoespaciales existentes de una administración local. De esta forma es posible detectar cualquier cambio en la propiedad tanto horizontal como vertical. Una vez más, este tipo de vuelos pueden ser realizados de forma mecánica. El control urbanístico requiere de vuelos periódicos con un intervalo de tiempo relativamente corto, es decir, estamos de nuevo ante un trabajo monótono y rutinario abordable con estas plataformas.

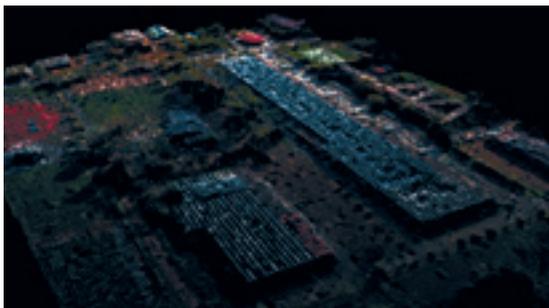


Figura 18.4. Escenario urbano representado por nube de puntos obtenidos por correlación de imágenes (Producida por Aerometric Lab, Universidad de Córdoba).

Igualmente interesante resulta la parametrización de la calidad del aire o el agua, aspectos a tener en cuenta para garantizar el confort de los ciudadanos. En ocasiones los trabajos de campo en estas acciones resultan costosos y abarcan un periodo de tiempo demasiado prolongado. Mediante plataformas espaciales o aéreas tripuladas es posible abarcar grandes áreas geográficas, pero en ocasiones éstas no ofrecen la resolución espacial necesaria o no son viables en términos económicos y/o temporales.

Hoy día ya existen aplicaciones y proyectos para monitorizar la calidad del aire y el agua usando UAV. Mediante el empleo de una cámara Canon 50D y Tetracam ADC a bordo de un UAV de ala fija, Zang et al. (2012) detectan manchas de aceite sobre el río Yangzi que atraviesa la ciudad Chongqing (China). Para ello aplican técnicas de fotogrametría para la obtención de ortofotografías a partir de las imágenes captadas por los dos sensores. Posteriormente mediante técnicas de teledetección generan mapas temáticos relativos a la calidad del agua, Fig. 18.5.

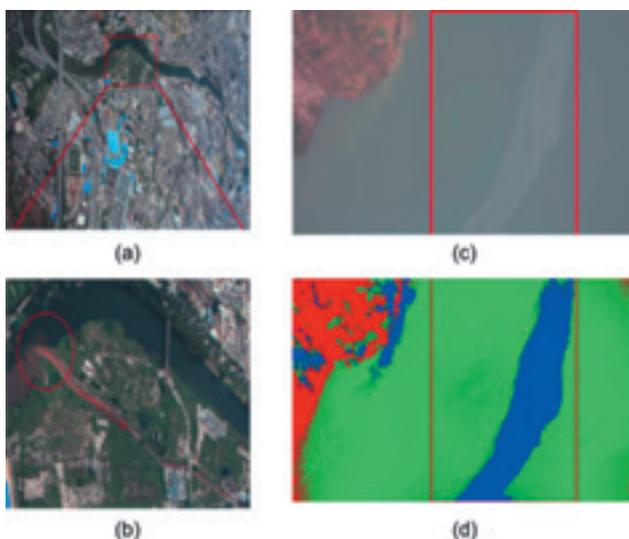


Figura 18.5. Ejemplo de uso en control de calidad de aguas. (a) y (b) Delimitación área de estudio, (c) muestra de ortofotografía obtenida con sensor RGB, (d) resultado clasificación de imágenes mostrando la mancha del vertido (Fuente Zang, et al., 2012).

De forma similar, mediante sensores medidores de concentración de monóxido de carbono, ozono u otras partículas se está ya analizando el estado de la atmosfera sobre entornos urbanos. Países como Inglaterra o Dinamarca están empleando UAV para la identificación de fuentes y agentes alérgenos. Bajo esta línea de trabajo, los UAV no solo se están empleando como instrumentos que albergan sensores medidores de alguna variable de interés. Hoy día están surgiendo iniciativas donde estas plataformas están siendo empleadas como agentes activos contra la contaminación. Países como China, donde la contaminación atmosférica alcanza niveles perjudiciales para la salud están probando UAV para pulverizar agentes químicos que frenen y hagan caer los elementos contaminantes. Esta alternativa hoy día ya está presentando mejores resultados que sistemas tradicionales como el uso de autómatas en tierra.

Relacionado con el confort en la ciudad otras de las aplicaciones interesantes son las desarrolladas para medir el índice de contaminación lumínica, elaborando mapas y productos cartográficos a partir de la explotación de imágenes nocturnas. Su uso asiste en la puesta en marcha y desarrollo de planes y medidas de ahorro energético y de sostenibilidad. De la información generada es posible derivar cambios en el diseño de las luminarias del entorno urbano reduciendo y/o minimizando la iluminación innecesaria emitida hacia la atmosfera y limitando los niveles lumínicos. De este modo, y de forma simultánea, la habitabilidad de los individuos de la ciudad, seres humanos y animales, se ve mejorada, evitando o reduciendo casos de disfunción circadiana o cronodisrupción.

La gestión y mantenimiento de zonas verdes y parques de las ciudades es otro tema de interés abordable mediante el uso de UAV. La explotación de la información recogida por sensores térmicos, multiespectrales o hiperespectrales permiten la aplicación de técnicas de teledetección que asisten en estas tareas, permitiendo conocer afecciones de forma temprana cuando aún no son apreciables en el espectro visible por los operarios que las controlan y los tratamientos son mas eficaces, o por ejemplo necesidades de agua en zonas verdes. En zonas donde aparezcan con relativa frecuencia periodos de escasez de agua, todo lo que implique un uso eficiente de los recursos revierte en la calidad de los ciudadanos.

El análisis de la eficiencia energética en edificios es otro tema de interés en el uso de los UAV, las inspecciones de fachadas de edificios es hoy día una realidad (Fox et al., 2014). Además de los estudios locales, las posibles concentraciones o bolsas de calor o frio dan lugar a microclimas urbanos. Éstos juegan un papel importante tanto en el consumo energético como en las sensaciones de confort en los espacios exteriores. Siendo posible realizar inspecciones localizadas en el tiempo y/o en el espacio empleando sensores abordo de plataformas no tripuladas, resulta más interesante poder aplicar estos estudios a todo el entorno urbano.

En el primer escenario de trabajo es posible realizar por ejemplo una termografía de una fachada de un edificio o de un casco urbano en un instante de tiempo determinado. Si bien esta información es interesante, mucho más resulta el poder conocer la evolución de la temperatura a lo largo de un cierto periodo de tiempo, lo que implica realizar tantos vuelos como periodicidad se desee en la información. Bajo estas condiciones quizás resulte más interesante emplear los sistemas UAV trabajando de manera integrada con otros sistemas implantados en el entorno urbano como pueden ser redes inalámbricas (Martinez-de Dios, et al., 2013). En este sentido los sensores no forman

parte del «payload» del sistema de vuelo sino que están instalados sobre el terreno. Cada uno de ellos constituye un nodo de la red que estará recogiendo información como temperatura, humedad, decibelios, etc. Esta información ha de ser subida a un servidor permitiendo la generación de mapas temáticos de temperaturas, humedad, ruido, etc. En un caso ideal cada uno de los nodos que componen la red de sensores estarán conectados entre sí para que un nodo master sea el encargado de subir toda la información recogida por el resto. Para que exista una correcta comunicación entre nodos se hace necesario tener en cuenta la máxima distancia entre ellos, función de la tecnología empleada, y de la presencia de interferencias.

Debido a las características del entorno urbano resulta inviable en numerosas ocasiones configurar esta estructura de red. La alternativa pasa porque cada nodo de la red pueda subir la información al servidor empleando para ello un módulo de comunicación telefónica. Esta solución implica un sobrecosto por el propio módulo así como por la gestión de los usuarios de acceso a la red. Hoy día ya existen soluciones donde la plataforma UAV actúa como herramienta recolectora de información. En estos casos la plataforma UAV lleva alojado un módulo de comunicación inalámbrica de tipo Wifi, Bluetooth o Zigbee a partir del cual es posible recoger la información almacenada en cada nodo de la red al paso de la plataforma de vuelo por el área de influencia de éstos. Esta información posteriormente será analizada y procesada por herramientas apoyadas en sistemas de información geográfica, obteniendo productos derivados para cada intervalo de tiempo.

18.3. Conclusiones

El uso y aplicación de sistemas UAV en el sector civil es hoy día una realidad, siendo una herramienta de trabajo muy útil en aplicaciones de ingeniería y/o urbanismo entre otras. A partir de los sensores abordo de estas plataformas es posible adquirir información del territorio tanto en modo imagen, colector de partículas, medición de parámetros atmosféricos, etc. Teniendo en cuenta un escenario de trabajo urbano, las aplicaciones a desarrollar van desde la planificación a la gestión de estos espacios.

A partir de la información recogida es posible la asistencia de planes urbanísticos, control y vigilancia en materia de vertidos, gestión de zonas verdes y calidad ambiental y en definitiva del seguimiento de variables que aparecen íntimamente relacionadas con el confort de los ciudadanos. Los sensores a emplear cubren un amplio rango de posibilidades. La mejora técnica de sus prestaciones técnicas así como la miniaturización de los mismos ha dado lugar a que cualquier tipo de proyecto sea abordable usando estas plataformas.

Actualmente en España el uso de estas plataformas en espacios urbanos no está permitido por motivos de seguridad. Sin duda alguna hace falta un marco regulatorio para un buen uso de las mismas. El establecimiento de protocolos de actuación, tipología de plataformas y certificados pueden establecer un marco de trabajo donde poder emplear con garantías estos vehículos. Su aplicación originará sin duda alguna nuevas líneas de negocio y trabajo así como nuevas oportunidades de gestión de un entorno urbano. Nos gustaría terminar el presente capítulo haciendo nuestra una afirmación de Colomina, I. y Molina, P. (2014): *Let them fly and they will create a new market.*

18.4. Referencias

- BRAYBROOK, R. (2004): «Three "D" missions-dull, dirty and dangerous». *Armada International*, 28, 10-12.
- FOX, M.; COLEY, D.; GOODHEW, S. y de WILDE, P. (2014): «Thermography methodologies for detecting energy related building defects». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 296-310.
- MARTÍNEZ-DE DIOS, J. R.; LFERD, K.; de SAN BERNABÉ, A.; NÚÑEZ, G.; TORRES-GONZÁLEZ, A. y OLLERO, A. (2013): «Cooperation Between UAS and Wireless Sensor Networks for Efficient Data Collection in Large Environments». *J. Intell Robot Syst*, 70, 491-508.
- MESAS-CARRASCOSA, F.; RUMBAO, I.; BERROCAL, J. y GARCÍA-FERRER, A. (2014a): «Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms». *Sensors*, 14, 22394-22407.
- MESAS-CARRASCOSA, F. J.; NOTARIO-GARCÍA, M. D.; de LARRIVA, J. E. M.; de la ORDEN, M. S. y GARCÍA-FERRER, A. (2014b): «Validation of measurements of land plot area using UAV imagery». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 270-279.
- ZANG, W.; LIN, J.; WANG, Y. y TAO, H. (2012): «Investigating small-scale water pollution with UAV Remote Sensing Technology». *World Automation Congress (WAC)*, 2012, pp. 1-4.

Carlos BERNABÉU GONZÁLEZ

Arborea Intellbird

19.1. Introducción

Las palas de los aerogeneradores son estructuras compuestas y complejas de hasta 75 m de longitud. Están sometidas a erosiones por las partículas que arrastran las tormentas, torsiones y tensiones en ocasiones extremas. Los fenómenos de ciclo génesis explosivos, que parecen incrementarse progresivamente a la par que la atmósfera incrementa sus temperaturas medias en todo el globo, son una dura prueba para los laminados de composite. La aparición de grietas, rupturas, agujeros y despegados no son infrecuentes. Su reparación es tan costosa que una mala gestión puede echar por tierra la rentabilidad de todo un proyecto de parque eólico. El mantenimiento predictivo es esencial. Detectar los problemas en las fases iniciales y solventarlos a bajo coste sin desmontar las palas es el criterio más sensato, antes de tener que lamentar males mayores. En esta tarea, el empleo de una plataforma SARP especializada que combina *hardware* y *software* específicos es una valiosísima herramienta.

19.2. Turbulencias mediáticas

Las aeronaves remotamente pilotadas son actualmente un centro de interés de primer orden para el público en general. Llenan los medios de comunicación, que recogen con entusiasmo toda clase de iniciativas relacionadas con estas extrañas criaturas aparentemente extraídas de las películas y novelas de ciencia ficción de nuestra niñez. Estos sistemas son cada vez más habituales en nuestro espacio aéreo. Ese masivo interés por parte del público, junto a lo novedoso desde el punto de vista tecnológico de estos sistemas, hacen que muchas de las noticias que aparecen hoy como realidades fehacientes, sigan estando en la práctica, tras los escenarios, dentro del ámbito estricto de la ciencia ficción.

Actualmente el empleo de sistemas aéreos pilotados remotamente para inspección industrial tiene sentido cuando estos, al sustituir a personal humano suponen ventajas considerables: eficacia, incremento de seguridad y reducción de costes. Una máxima empleada habitualmente en este sector aeronáutico de nueva creación, circunscribe el uso práctico civil de estos sistemas a trabajos peligrosos, tediosos o muy complejos desde el punto de vista técnico. A nadie que trabaje en el sector eólico se le escapa que una revisión de palas bien hecha de forma exhaustiva y precisa es un guiso que puede contener los tres ingredientes.

En base a lo analizado, el empleo de estas aeronaves permite obtener unos resultados mucho más interesantes que los que ofrece un telescopio o incluso el descuelgue de personal en pala. La mayor proximidad a la superficie de esta, la colocación precisa de lentes luminosas, las cámaras de alta resolución y un número creciente de sensores adicionales muy específicos facilita la obtención de datos inigualables por ningún otro medio.

Existen algunos obstáculos no obstante para el empleo de la mayor parte de las aeronaves no tripuladas en este sector. Por un lado la necesidad de enfrentarse a vientos de cierta intensidad y mantener una posición en medio de estos; lo esencial de un pilotado sencillo y seguro incluso bajo turbulencias. Por otra parte las cuestiones vinculadas a la operación tales como seguridad tanto para las personas que manejan el sistema como para la propia integridad de los aerogeneradores, lo cual va muy unido al peso de las aeronaves y sus capacidades de maniobrabilidad y protección adicionales. Por último y quizás el aspecto más determinante sea el económico. La viabilidad del empleo de un sistema basado en aeronave no tripulada en inspección industrial, pasa porque éste sea rentable y competitivo en comparación con los sistemas tradicionales. Plantear la aplicación de aeronaves muy costosas con una logística compleja está absolutamente fuera del mercado.



Figura 19.1. Posicionamiento para analizar la situación de la punta de la pala.
Foto. Carlos Bernabéu/Arbórea Intellbird.

civil. El marco regulatorio es un factor esencial a la hora de diseñar operaciones con SARP en este ámbito. La operación con estos sistemas está regulado ya en buena parte de los países europeos. El objeto de estas normas no es otro que garantizar la seguridad de personas y bienes. Para ello, la regulación se apoya en tres parámetros fundamentales: certificación de los aeronaves, formación de los pilotos y regulación de las operaciones.

Las exigencias administrativas para operar este tipo de aeronaves se basan en diversos criterios y tienen un carácter progresivo y proporcional cuya complejidad en los requisitos se incrementa con el nivel de riesgo de la operación aérea. Para establecer estos baremos se cruzan diversos aspectos en lo que podríamos establecer como una matriz que contempla cuestiones tales como el peso de la aeronave, el procedimiento de pilotado y control, las características del área de operación o la altura de vuelo.

Las agencias europeas apuestan claramente por el deseable avance de las operaciones autorizadas en grados progresivos de complejidad y riesgo a lo largo de los próximos años.

Cuando se comenzó a diseñar la plataforma Aracnocóptero en 2008, se intuyó la evolución de una normativa que consideraba diversos aspectos como los mencionados e ideamos toda la estructura de operación encuadrable en base a esta lógica. El modelo EOL6 para inspección eólica trabaja dentro de los rangos de menor intensidad de riesgo de operación aérea, es decir reducido peso, vuelo en línea de vista, a baja altura y gran cantidad de medidas de seguridad programadas en su ADN electrónico. Adicionalmente opera en un entorno despoblado con unas grandes medidas de seguridad también como es un parque eólico. Esto permite el más laxo nivel de intensidad de operación aérea y por tanto el menos restrictivo.



Figura 19.2. La posibilidad de aproximarse a distancias muy cortas a la pala sin que los riesgos de colisión supongan un problema es un aspecto esencial de la inspección eólica.

Foto. Carlos Bernabéu/Árborea Intellbird.

19.3. Tecnología disruptiva

La presentación del sistema de inspección aérea de palas Aracnóptero EOL6 en la feria de Husum en 2012 supuso un hito en la introducción de esta tecnología española, puntera en este sector de innovación. A partir de ese momento otras compañías europeas comienzan aplicar multirrotores a este tipo de inspección de forma paulatina. La incorporación de Iberdrola y CDTI en junio de 2013 como socios del proyecto, acelera extraordinariamente el avance de Aracnóptero, desarrollado desde el conocimiento de las necesidades del sector eólico.

Actualmente Arbórea diseña y fabrica cada pieza de Aracnóptero en sus instalaciones del Parque Científico de la Universidad de Salamanca. Adicionalmente forma regularmente a operadores del sector eólico en cursos intensivos en los que participan y colaboran las principales industrias del sector. Arbórea y Aracnóptero participan en la formación certificada de pilotos de sistemas aéreos remotamente tripulados del Ejército Español.

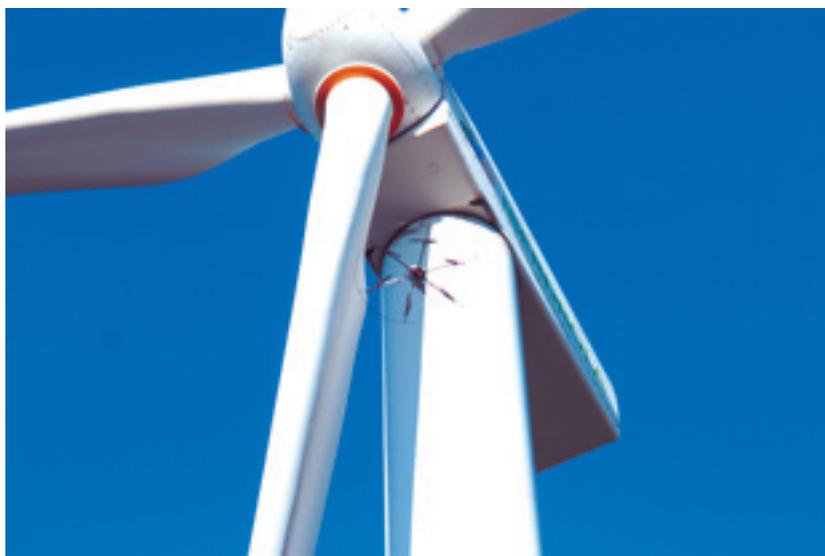


Figura 19.3. Iberdrola, socio de Arbórea Intellbird está realizando una fuerte apuesta por la tecnología Aracnóptero.
Foto. Carlos Bernabéu/Arbórea Intellbird.

Los gran cantidad de horas de vuelo acumulados por Aracnóptero en sector eólico, comienzan a mostrar ya en 2011 una dificultad asociada, inherente al empleo de estos avances de la industria aerospacial en inspección industrial: el tamaño y número de imágenes de alta resolución obtenidas en un proceso de inspección, implica un obstáculo a la hora de gestionar esta información. El mapeo completo de un aerogenerador puede aportar más de seis Gigabytes en bruto de material a procesar. Se trata de una ingente cantidad de píxeles cuyo análisis demanda una notable cantidad de tiempo. Esto permite un avance notable en la calidad de información y capacidad de estudio de los problemas pero a costa de incrementar seriamente el tiempo de ingeniería especializada asociado al análisis de estas imágenes.

La castigada situación del sector eólico, que ha de absorber los impactos generados por violentos virajes de timón en sus marcos regulatorios y ser rentable en un mercado de competencia energética, no permite mucho margen de inversión en operaciones de mantenimiento. Eficiencia y reducción de costes son los mandamientos del libro sagrado de este sector que pugna por demostrar la viabilidad de una energía limpia a costa de notables apuestas de inversión y riesgo.

En este esquema necesario de reducción de costes, el análisis ágil y eficiente de la información obtenida es uno de los aspectos prioritarios. Las primeras experiencias con el modelo EOL6.1 permitieron obtener imágenes extraordinarias en las que podíamos distinguir manchas de impactos de insectos de pequeñas erosiones en la superficie de la pala, inferiores a 2 mm, con total precisión. Sin embargo pronto comentó el problema que supone manejar tan ingentes cantidades de píxeles asociados a cada inspección.

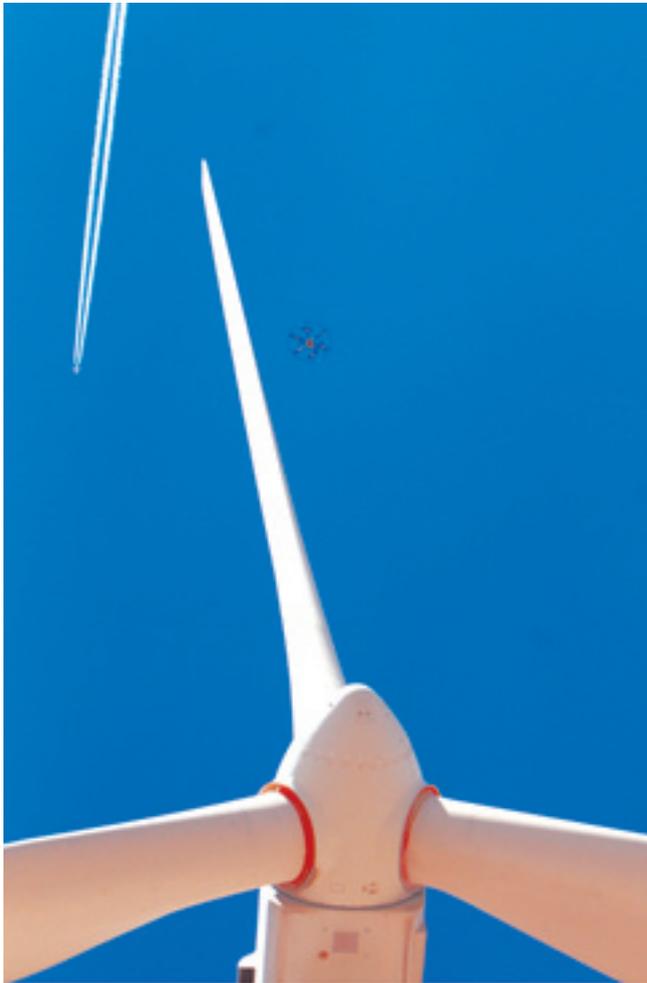


Figura 19.4. Los pequeños sistemas SARP para inspección eólica sitúan su operación en el más bajo nivel de riesgo aeronáutico.

Foto. Carlos Bernabéu/Arbórea Intellbird

19.4. Solución creativa a un problema complejo

La solución a este dilema ha sido *aportada* y presentada recientemente en forma de un *software* específico de análisis llamado Web Blade. Este *software* de Arborea supone un nuevo hito en la inspección de palas con sistemas aéreos, ya que permite —asociado a los sensores de Aracnocóptero— mapear la superficie completa de las palas, identificar los defectos y sus grados y aportar de forma muy precisa y automática el tamaño y posición exacta de estos defectos. El resultado final es un informe automático. Todo esto ahorra muchas horas de análisis, efectuados por personal especializado que con esta herramienta en sus manos, únicamente debe centrarse en la supervisión de defectos y el análisis de los mismos. Adicionalmente el *software* permite la salida de datos en forma estadística adaptable a las características de cada una de las compañías tanto en sus criterios de procesado de defectos o grados como en sus tratamientos informáticos de estos datos. Las estadísticas así obtenidas permiten establecer patrones y sirven de guía para la proyección de operaciones de mantenimiento y análisis de la vida estimada operacional de un parque eólico.



Figura 19.5. Aracnocóptero una plataforma española que revoluciona la inspección de aerogeneradores.

Foto. Carlos Bernabéu/Arborea Intellbird.

Otro de los aspectos que encarece la operación de inspección aérea de palas es la logística asociada. Los nuevos sistemas EOL6.3, recientemente presentados por Iberdrola y Arborea en EWEA han reducido la necesidad a un solo operador para pilotar la nave en vez de los dos necesarios para operar modelos anteriores. La logística, clave para la reducción de costes, sigue en este caso siendo minimalista. El nuevo modelo plegable en el caso de trabajo *onshore* se sustituye por su versión desmontable ya plenamente preparada para operar *offshore*, cuya caja estanca cabe perfectamente en los tambuchos de las lanchas semirrígidas de mantenimiento de un parque marino. Esta ausencia de logística adicional permite emplear los vehículos habituales de una compañía de mantenimiento sin necesidad de personal adicional o infraestructura especial. Otra de las cuestiones clave para incrementar la eficiencia es la velocidad inspección. Los nuevos protocolos de trabajo y sensores permiten a Aracnóptero 6.3 realizar inspecciones sin rotar palas habiendo alcanzado en primavera de 2014 un nuevo hito en parques de Iberdrola, al realizar inspecciones completas de toda la superficie de un aerogenerador en menos de 18 minutos, sin rotar palas, lo que supone una notable diferencia procedimental con extraordinario ahorro, en relación con los sistemas más rápidos al uso.

Esta tecnología española que cuenta ya con el apoyo de grandes compañías internacionales del sector eólico, se está implantando con éxito y velocidad al presentar ventajas estratégicas en los tiempos de operación y ahorros de costes, a la vez que permite un procesamiento de información de un nivel superior informatizada y analizable con criterios avanzados, acordes con las necesidades de inversión en este sector en el que los desarrollos españoles han sido y son una referencia mundial.



Figura 19.6. La calidad de los datos obtenidos en inspección no es comparable a ningún otro sistema actual.

Foto. Carlos Bernabéu/Arborea Intellbird.

Juan Carlos CUESTA JARA y Diego RUIZ DEL BUSTO

*Oficina Técnica Red de Alta Tensión.
Unión Fenosa Distribución*

20.1. Antecedentes

Una de las principales misiones de una empresa de distribución eléctrica es mantener una fiabilidad alta en el suministro de energía. Para ello, las instalaciones eléctricas son sometidas a actuaciones recurrentes de mantenimiento preventivo y predictivo. Unas de estas principales actividades son las inspecciones periódicas de las instalaciones. Estas inspecciones no son únicamente visuales, es necesario utilizar equipos que permitan la captura de información en el espectro infrarrojo y ultravioleta. Además, se requiere la obtención de otros datos como referencias GPS o distancias entre elementos de las instalaciones y ajenos.

Para realizar las inspecciones se han desarrollado mejoras continuas en los equipos y técnicas utilizadas. Durante los últimos años, las inspecciones de las líneas eléctricas se realizan con un helicóptero para la captura de la información y con personal formado y capacitado para subir a los apoyos y detectar los defectos inaccesibles y complementar la información capturada por el helicóptero.

En los helicópteros típicamente se instalan los siguientes equipos:

- Sistemas de grabación de video.
- Plataforma dual giroestabilizada, con cámara infrarroja y de espectro visible.
- Sistema de captura de termogramas que permitirá la evaluación cuantitativa de los puntos calientes detectados.
- Receptor GPS.

En las subestaciones, por el contrario, los trabajos lo realizan únicamente personal capacitado para tales trabajos, no obteniéndose habitualmente información mediante vuelos.

Para realizar este trabajo en las instalaciones, son necesarias una serie de actuaciones que condicionan la forma de trabajar así como los riesgos asociados. Los trabajos en tensión requieren de personal formado, equipo necesario para realizar la actividad y protocolos de actuación que eviten posibles accidentes. Los trabajos sin tensión, reducen los riesgos de la actividad, pero resulta necesario trabajos adicionales como la operación de descargo de la instalación. Esta operación amplía los tiempos dedicados

a cada instalación, ya que es necesario realizar la petición de descargo al centro de control, seguir el protocolo para constatar que la instalación efectivamente no está en tensión y al terminar el trabajo, regularizar la explotación de la instalación. En muchas ocasiones, en las que los trabajos se van a extender en el tiempo más de una jornada de trabajo y la instalación es sensible para la fiabilidad del sistema, es necesario el descargo y reposición de la instalación cada día.



Figura 20.1. Helicóptero con el equipo de filmación montado.

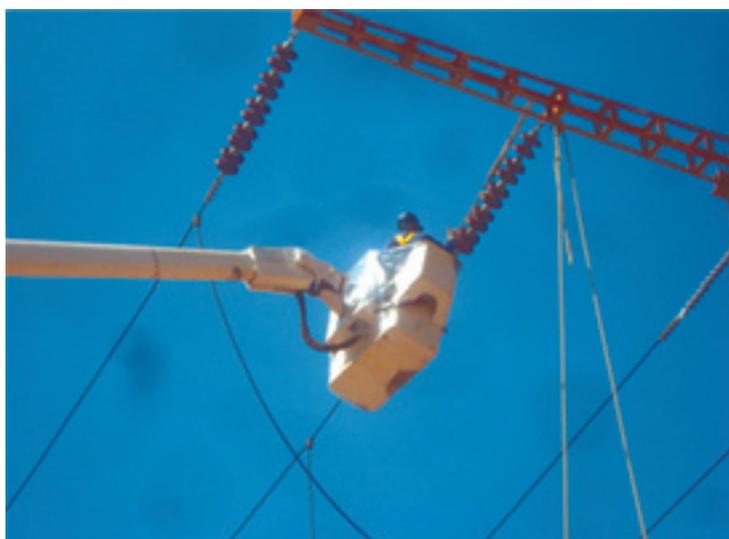


Figura 20.2. Inspección exhaustiva en una posición sin tensión.

20.2. Aplicaciones

El uso de los drones nos da la posibilidad de mejorar los métodos de trabajo actuales. La flexibilidad y rapidez de operación los hacen especialmente interesantes en el sector de la distribución eléctrica. Detectar fallos y defectos en las instalaciones en un tiempo muy breve o la posibilidad de combinar este tipo de trabajos con otros realizados de forma habitual como pueden ser las inspecciones visuales, nos permitirán obtener información de las características y estado de la instalación, coordenadas UTM o topografía del terreno.

A la vista de estas posibilidades, se convierte en una apuesta en innovación tecnológica este segmento, para lo cual se han promovido con empresas colaboradoras de vuelo de drones una serie de pilotajes en distintas instalaciones, implantando diferentes técnicas de trabajo para asegurar la calidad de la información obtenida y la seguridad de las personas, como distancias del aparato a la instalación, condiciones meteorológicas de operación o protocolos de actuación en caso de situaciones imprevistas que interfieran en el correcto funcionamiento del aparato.

Con la información obtenida de este tipo de trabajo se pretende obtener el mismo producto que se está obteniendo con las técnicas actuales.

- *Informe de defectos:* Este informe se centra en los puntos más importantes de cada instalación. En el caso de las líneas aéreas, por apoyo debe revisarse por cada fase:
 - Estado de grapas y del conductor a su salida.
 - Cadena de aisladores.
 - Herrajes de anclaje de la cadena al apoyo.
 - El cable de tierra del apoyo: estado de la grapa y la conexión al apoyo.

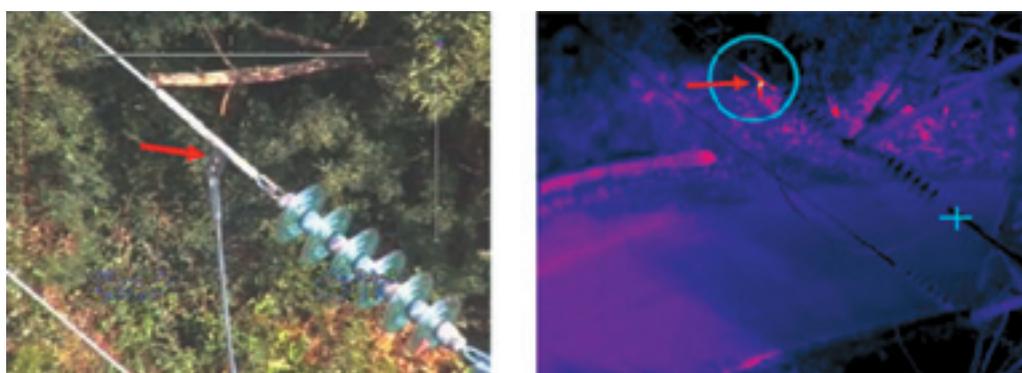


Figura 20.3. Defecto localizado en una línea mediante termografía.

En el caso de las subestaciones de intemperie:

- Cadenas de aisladores.
- Herrajes de anclaje de la cadena a estructura y conductor.

- En la puesta a tierra: estado de la grapa y la conexión a la estructura.
 - Transformadores: bornas, palas terminales, posibles fugas de dieléctrico.
 - Autoválvulas.
 - Transformadores de medida.
- *Informe de distancias*: Este informe georreferencia los elementos y realiza el cálculo de distancias entre las fases de una misma línea, entre el conductor y el suelo, edificios, arbolado lateral y arbolado bajo vano, cruzamientos y paralelismos.
 - *Videos de la filmación*: videos en el espectro visible en formato de alta calidad de forma continua durante toda la actividad.
 - *Termografía*: video en el espectro infrarrojo, que permite detectar los puntos calientes de la instalación.



Figura 20.4. Imagen termográfica tomada por un dron de la cadena de aisladores de un apoyo de suspensión.

- *Inspección ultravioleta*: videos en el espectro ultravioleta que permita detectar el efecto corona debido al deterioro del conductor, rotura en los separadores, suciedad o contaminación en los aisladores, degradación en aisladores de composite, anomalías en elementos (tornillería, grapas, descargadores, amortiguadores, preformados, separadores, etc.), venas rotas y objetos desconocidos.

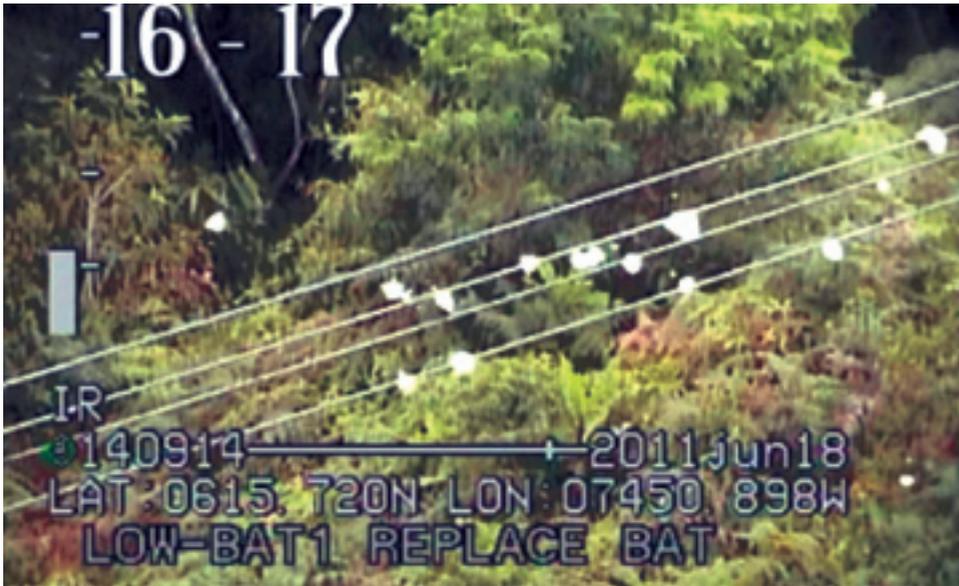


Figura 20.5. Imagen Ultravioleta de los conductores de una línea.

- *Imágenes:* se obtienen imágenes de las instalaciones desde distintos puntos en formato de alta definición.



Figura 20.6. Imagen tomada por un dron de las instalaciones de una subestación.

El uso de los drones no sólo nos permitirá obtener el mismo producto sino que, además permitirán ejecutar actividades hasta ahora imposibles de realizar, gracias a la flexibilidad y coste de los drones, lo que facilita su viabilidad para multitud de instalaciones.

Las actividades de inspección en las subestaciones estaban acotadas tradicionalmente a la revisión a pie in situ, no siendo posible obtener información aérea a menos que se realizara un descargo en la instalación y el personal formado y capacitado accediera a la misma. El registro de la información se realizaba en papel mediante fichas de campo. En los pilotajes realizados con drones, se ha obtenido imágenes y videos aéreos de las instalaciones en formatos de alta definición con posibilidad de realizar zoom. También se ha montado una cámara termográfica que ha permitido la captura de imágenes térmicas aéreas. Las cubiertas de los edificios son un elemento sensible para su inspección y se han podido inspeccionar de la misma forma que las demás instalaciones, cuando hasta ahora era necesario utilizar una barquilla o andamiajes para elevar a un trabajador.



Figura 20.7. Imagen termográfica aérea en una subestación.

En las actividades de inspección en líneas eléctricas, también existen trabajos en los que únicamente existiría la posibilidad de realizarlos si el personal es elevado a la altura correspondiente mediante técnicas convencionales.

En las inspecciones exhaustivas de los apoyos se requiere un mínimo de 3 personas, 2 para realizar el trabajo y un recurso preventivo. La actividad requiere ausencia de tensión y por ello es necesario solicitar un descargo, poner tierras al apoyo, subir al apoyo

para inspeccionar los elementos (ya que desde abajo sólo se tiene una visión parcial), y una vez terminado la inspección retirar las tierras y pedir la reposición de la línea. Con un dron, el trabajo se simplifica, requiriendo únicamente del piloto para realizar las grabaciones aéreas en el espectro visible e infrarrojo y el trabajo de análisis de la información en la oficina.



Figura 20.8. Inspección exhaustiva de un apoyo de 132 kV.

Otro tipo de actividad que se realiza actualmente son las inspecciones oculares. El personal recorre la línea, y analiza la línea visualmente desde pie de campo. Esto implica que todos aquellos defectos inaccesibles desde abajo es necesario esperar a las inspecciones exhaustivas en las que se sube el personal para poder detectarlo.

Es muy interesante las posibilidades que se abren en el uso de estos aparatos con la funcionalidad de establecer una ruta predeterminada mediante GPS que se pueda realizar de forma autónoma para realizar mediciones periódicas independientemente de la disponibilidad de trabajadores. A medida que esta tecnología se perfeccione para proporcionar mayor precisión ante los obstáculos podría suponer mayores eficiencias en esta actividad.

Especialmente interesante se convierte en las inspecciones de emergencia o tras efectos meteorológicos severos, en los que la rapidez de reacción se convierte en la componente más importante. La capacidad de estos aparatos de desplazarse en situaciones con el terreno desfavorable (terreno embarrado, carreteras cortadas, incendios, etc.) les hace perfectos para realizar tareas de inspección que permitan a los profesionales conocer el estado de las instalaciones de una forma rápida y rigurosa para la toma de decisiones. Esta información es clave para poder tomar decisiones correctas a la hora de asignar recursos para solucionar los fallos en la red en función de la criticidad de las averías.

Así mismo, es una opción interesante la filmación infrarroja y emisión del contenido en directo para poder utilizarlo en el campo de la seguridad. Esta posibilidad es compatible y complementaria a los métodos utilizados actualmente ya que aporta una visión aérea de una zona extensa que facilita la detección en un emplazamiento de posibles intrusos, pero sin sustituir al personal formado ni a los equipos de protección.

20.3. Conclusiones

El uso de drones para el sector de distribución de electricidad presenta oportunidades para realizar los trabajos con una mayor eficiencia y mejora en la seguridad de las personas. Esta mayor eficiencia se obtiene por la optimización y especialización de recursos y tiempos utilizados en las actividades así como en la captura de información asociada a las condiciones y estado de las instalaciones.

La introducción paulatina de los drones complementa a los medios utilizados actualmente. Aumenta la seguridad de las personas, ya que pueden llegar a sustituirse trabajos en los que existe riesgo eléctrico o posibles caídas en altura, por actividades por control remoto controladas desde la distancia.



Figura 20.9. Trabajos de inspección en apoyo de 132 kV.

La fiabilidad de las inspecciones es mayor, ya que se asegura obtener información de las instalaciones desde todos los puntos de vista y se incrementan detecciones de defectos que de otra manera serían imperceptibles.

La calidad de los datos obtenidos en las inspecciones aumenta, dado que quedan almacenados los registros de las instalaciones desde todos los puntos de vista, en video, con espectro visual e infrarrojo.

Es un sector en rápida evolución por el negocio que se presenta y las empresas están invirtiendo grandes cantidades en I+D, pero no es menos importante la mejora en los equipos que puedan portar los drones, reduciendo peso y aumentando la calidad de las cámaras y sensores.

El marco normativo actual no permite que las aeronaves puedan operar más allá del nivel visual del piloto cuando excedan 2 kg de peso, por lo que la posibilidad de inspeccionar líneas eléctricas de forma autónoma no es posible en la actualidad dado que los drones de menos de 2 kg tienen una autonomía muy baja.

A medida que vaya incrementándose el desarrollo de nuevas aplicaciones y la normativa avance en el ámbito regulatorio, las posibilidades de integración de estas nuevas tecnologías aumentarán en el negocio eléctrico de distribución.



Fundación de la Energía de
la Comunidad de Madrid



www.fenercom.com

