

Muñoz, F.; Gutiérrez de la Cámara, Ó.; de Miguel, E.; Jiménez, M.; Carretero, L.; Peón, J.; Muela, J.; Cendrero-Mateo, M.; Moreno, J.; Moncholí-Estornell, A.; Gómez-Giráldez, P.; Cobos, J.; Díaz, R.; Aragonés, D.; Montoro, A.; Belmar, F.; Horsman, D.; Godoy, D.; Tapia, F. Sistema aeroportado CFL + CASI y campaña de adquisición de datos de fluorescencia en el proyecto SpaFLEX

# Sistema aeroportado CFL + CASI y campaña de adquisición de datos de fluorescencia en el proyecto SpaFLEX

Muñoz, Félix<sup>1</sup> Gutiérrez de la Cámara, Óscar<sup>1</sup> de Miguel, Eduardo<sup>1</sup> Jiménez, Marcos<sup>1</sup> Carretero, Laura<sup>1</sup> Peón, Juanjo<sup>1</sup> Muela, Jimmy A.<sup>1</sup> Cendrero-Mateo, M<sup>a</sup> Pilar<sup>2</sup> Moreno, José<sup>2</sup> Moncholí-Estornell, Adrián<sup>2</sup> Gómez-Giráldez, Pedro J.<sup>3</sup> Cobos, Joaquín<sup>3</sup> Díaz, Ricardo<sup>3</sup> Aragonés, David<sup>3</sup> Montoro, Amelia<sup>4</sup> Belmar, Francisco<sup>5</sup> Horsman, David<sup>5</sup> Godoy, Diego<sup>5</sup> Tapia, Felipe<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Madrid

<sup>2</sup> Universidad de Valencia (UV)

<sup>3</sup> Estación Biológica de Doñana (EBD)

<sup>4</sup> Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE)

<sup>5</sup> Heligrafics

**ORCID:** Muñoz 0000-0002-6421-8725 Gutiérrez de la Cámara 0000-0003-2555-9292 de Miguel 0000-0001-5284-5388 Jiménez 0000-0002-6852-2732 Carretero 0000-0001-5587-4707 Peón 0000-0001-7551-2236 Muela 0009-0002-9524-5483 Cendrero-Mateo 0000-0001-5887-7890 Moreno 0000-0002-5283-3333 Moncholí-Estornell 0000-0002-8832-2594 Gómez-Giráldez 0000-0002-1247-7557 Cobos 0000-0003-0285-7617 Díaz 0000-0002-0460-4616 Aragonés 0000-0003-4989-9005 Montoro 0000-0002-3491-6821

**Correspondencia:** [munozs@inta.es](mailto:munozs@inta.es) [gutierrezcao@inta.es](mailto:gutierrezcao@inta.es) [demiguel@inta.es](mailto:demiguel@inta.es) [jimenezmm@inta.es](mailto:jimenezmm@inta.es) [carreteroml@inta.es](mailto:carreteroml@inta.es) [jpegar@inta.es](mailto:jpegar@inta.es) [jmuepil@inta.es](mailto:jmuepil@inta.es) [m.pilar.cendrero@uv.es](mailto:m.pilar.cendrero@uv.es) [jose.moreno@uv.es](mailto:jose.moreno@uv.es) [adrian.moncholi@uv.es](mailto:adrian.moncholi@uv.es) [pedro.gomez@ebd.csic.es](mailto:pedro.gomez@ebd.csic.es) [joaquin.cobos@ebd.csic.es](mailto:joaquin.cobos@ebd.csic.es) [ricardo.diaz@aee.gob.es](mailto:ricardo.diaz@aee.gob.es) [daragones@ebd.csic.es](mailto:daragones@ebd.csic.es) [amelia.montoro@csic.es](mailto:amelia.montoro@csic.es) [fbelmar@heligrafics.net](mailto:fbelmar@heligrafics.net) [dhorsman@heligrafics.net](mailto:dhorsman@heligrafics.net) [dgodoy@heligrafics.net](mailto:dgodoy@heligrafics.net) [ftapia@heligrafics.net](mailto:ftapia@heligrafics.net)

## RESUMEN

El uso de sistemas aeroportados capaces de proporcionar estimaciones del observable SIF (Solar Induced Chlorophyll Fluorescence) es una herramienta de gran versatilidad para la calibración y validación de FLEX (FLuorescence Explorer). El INTA ha implementado el sensor de fluorescencia Headwall Chlorophyll-Fluorescence Imager (CFL) en un sistema de teledetección diseñado para plataformas aéreas tripuladas, junto con un sensor VNIR (visible e infrarrojo cercano) CASI 1500i y sus sistemas auxiliares INS/GPS (Inercial y GPS). Dentro del proyecto SpaFLEX se establecieron tres zonas en diversos ecosistemas ibéricos: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete) y Sarrión (Teruel), aportando variabilidad en la cobertura vegetal y las condiciones ambientales. La adquisición de datos se realizó en coordinación con sensores en tierra (FLOX, Piccolo, ASD) y vehículos aéreos no tripulados, lo que permitió mediciones sincronizadas y coherencia multiplataforma entre las observaciones aerotransportadas e in situ. La campaña generó con éxito un conjunto de datos único, multiescala y multiplataforma, adecuado para un análisis integrado. Estos datos proporcionan una base clave para la validación de los algoritmos FLEX y la mejora de la calidad de los productos de Nivel 2.

**Palabras clave:** Fluorescencia, CFL, aeroportado, FLEX, CASI

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 marzo 2026




# Sistema aeroportado CFL + CASI y campaña de adquisición de datos de fluorescencia en el proyecto SpaFLEX

Muñoz, Félix <sup>(1)</sup>, Gutiérrez de la Cámara, Óscar <sup>(1)</sup>, de Miguel, Eduardo <sup>(1)</sup>, Jiménez, Marcos <sup>(4)</sup>, Carretero, Laura <sup>(1)</sup>, Peón, Juanjo <sup>(1)</sup>, Muela, Jimmy A. <sup>(1)</sup>, Cendrero-Mateo, M<sup>a</sup> Pilar <sup>(8)</sup>, Moreno, José <sup>(2)</sup>, Moncholí-Estornell, Adrián <sup>(2)</sup>, Gómez-Giráldez, Pedro J. <sup>(3)</sup>, Cobos, Joaquín <sup>(3)</sup>, Díaz, Ricardo <sup>(3)</sup>, Aragonés, David <sup>(3)</sup>, Montoro, Amelia <sup>(4)</sup>, Belmar, Francisco <sup>(5)</sup>, Horsman, David <sup>(5)</sup>, Godoy, Diego <sup>(5)</sup>, Tapia, Felipe <sup>(5)</sup>


<sup>(1)</sup> Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

 0000-0002-6421-8725, munozsf@inta.es ;  0000-0003-2555-9292, gutierrezcao@inta.es  
 0000-0001-5284-5388, demiguel@inta.es ;  0000-0002-6852-2732, jimenezmm@inta.es  
 0000-0001-5587-4707, carreteroml@inta.es ;  0000-0001-7551-2236, jpeogar@inta.es  
 0009-0002-9524-5483, jmuepil@inta.es


<sup>(2)</sup> Universidad de Valencia (UV).

 0000-0001-5887-7890, m.pilar.cendrero@uv.es ;  0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es  
 0000-0002-8832-2594, adrian.moncholi@uv.es

<sup>(3)</sup> Estación Biológica de Doñana (EBD).

 0000-0002-1247-7557, pedro.gomez@ebd.csic.es ;  0000-0003-0285-7617, joaquin.cobos@ebd.csic.es  
 0000-0002-0460-4616, ricardo.diaz@ae.gob.es ;  0000-0003-4989-9005, daragones@ebd.csic.es

<sup>(4)</sup> Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE).

 0000-0002-3491-6821, amelia.montoro@csic.es

<sup>(5)</sup> Heligrafics.

fbelmar@heligrafics.net ; dhorsman@heligrafics.net ; dgodoy@heligrafics.net ; ftapia@heligrafics.net

**Resumen:** El uso de sistemas aeroportados capaces de proporcionar estimaciones del observable SIF (*Solar Induced Chlorophyll Fluorescence*) es una herramienta de gran versatilidad para la calibración y validación de FLEX (*FLuorescence Explorer*). El INTA ha implementado el sensor de fluorescencia Headwall *Chlorophyll-Fluorescence Imager* (CFL) en un sistema de teledetección diseñado para plataformas aéreas tripuladas, junto con un sensor VNIR (visible e infrarrojo cercano) CASI 1500i y sus sistemas auxiliares INS/GPS (Inercial y GPS). Dentro del proyecto SpaFLEX se establecieron tres zonas en diversos ecosistemas ibéricos: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete) y Sarrión (Teruel), aportando variabilidad en la cobertura vegetal y las condiciones ambientales. La adquisición de datos se realizó en coordinación con sensores en tierra (FLOX, Piccolo, ASD) y vehículos aéreos no tripulados, lo que permitió mediciones sincronizadas y coherencia multiplataforma entre las observaciones aerotransportadas e in situ. La campaña generó con éxito un conjunto de datos único, multiescala y multiplataforma, adecuado para un análisis integrado. Estos datos proporcionan una base clave para la validación de los algoritmos FLEX y la mejora de la calidad de los productos de Nivel 2.

**Palabras clave:** Fluorescencia, CFL, aeroportado. FLEX, CASI.

## ***Airborne CFL + CASI System and Fluorescence Data Acquisition Campaign within SpaFLEX Project***

**Abstract:** *The use of airborne systems capable of providing estimates of the Solar-Induced Fluorescence (SIF) observable constitutes a highly versatile tool for the calibration and validation of FLEX (FLuorescence Explorer). INTA has implemented the Headwall Chlorophyll Fluorescence Imager (CFL) sensor within a remote sensing system specifically designed for manned airborne platforms, in conjunction with a VNIR (Visible and Near-Infrared) CASI 1500i sensor and its associated INS/GPS auxiliary systems. Within SpaFLEX Project, three study sites were established across diverse Iberian ecosystems: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete), and Sarrión (Teruel), thereby encompassing variability in vegetation cover and environmental conditions. Data collection was conducted in coordination with ground-based sensors (FLOX, Piccolo, ASD) and*

*unmanned aerial vehicles, enabling synchronized measurements and ensuring multi-platform consistency among airborne, and in situ observations. The campaign successfully generated a unique, multi-scale, multi-platform dataset suitable for integrated analysis. These data provide a fundamental basis for the validation of FLEX algorithms and for improving the quality of Level 2 products.*

**Keywords:** Fluorescence, CFL, airborne, FLEX, CASI.

## 1. INTRODUCCIÓN

La misión FLEX de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyo lanzamiento está previsto para 2026, tiene como objetivo medir la fluorescencia inducida por el Sol (SIF) en la vegetación, un indicador robusto de la actividad fotosintética y del estrés vegetal. FLEX operará en tándem con Sentinel-3, proporcionando productos con una resolución espacial de 300 m. La calibración y validación de FLEX requieren el uso de sistemas aerotransportados capaces de proporcionar estimaciones del observable SIF. Uno de ellos es el sensor de fluorescencia Headwall *Chlorophyll-Fluorescence Imager* (CFL) del INTA, diseñado para plataformas aéreas tripuladas.

El objetivo general del proyecto SpaFLEX es desarrollar un plan español de Cal/Val para los productos FLEX. Este plan incluye la selección de sitios de ensayo representativos, protocolos de medida y cálculos de incertidumbre para los productos de Nivel 2 (reflectancia y fluorescencia). La estrategia se basa principalmente en dos pilares clave: un énfasis reforzado en las prácticas metrológicas para garantizar la trazabilidad a lo largo de toda la cadena de procesamiento, y la provisión de la incertidumbre de medida para cada mensurando, idealmente a nivel de píxel (Cendrero-Mateo M.P. *et al.*, 2025). Las campañas aeroportadas proporcionan datos esenciales a escala media sobre grandes áreas con alta eficiencia, lo que permite mejorar los algoritmos y modelos que estiman la propagación de la fluorescencia y la reflectancia.

## 2. MATERIALES

### 2.1. Chlorophyll-Fluorescence Imager (CFL)

El CFL es un sensor hiperespectral que puede registrar hasta 2160 bandas espectrales en el rango 670-780 nm. El sistema electrónico de lectura y control permite la configuración de *binning* espectral y espacial en valores de 1, 2 y 4, y el uso de tiempos de integración variables, típicamente entre 10 y 100 ms (de Miguel *et al.* 2022). Las especificaciones del CFL se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas CFL

Rango espectral (nm)	670-780
Píxeles espectrales	2160
Píxeles espaciales	1600
Muestreo espectral (nm/píxel)	0,051
FWHM (nm)	0,2
FOV (Field Of View) (°)	23,5
iFOV (°)	0,015
Número f	f/2,5
Distancia focal lente (mm)	25
SNR	120:1

### 2.2. Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI 1500i)

El CASI (Tabla 2) es un espectrómetro de tecnología *pushbroom*, diseñado para aplicaciones de teledetección de alta resolución espectral y espacial. El sensor dispone de una matriz de hasta 1500 píxeles por línea, con una resolución radiométrica de 14 bits. El sistema integra una Unidad de Medida Inercial (IMU) acoplada al módulo detector, que proporciona parámetros precisos de posición y actitud de la plataforma durante la adquisición.

**Tabla 2.** Especificaciones técnicas CASI 1500

Rango espectral (nm)	380-1050
Píxeles espectrales	Hasta 288
Píxeles espaciales	1440
Anchura de Muestreo (nm)	2,4
FOV (Field Of View) (°)	40
iFOV	0.49mrad

### 2.3. Plataforma Partenavia P68

La aeronave Partenavia P68 *Observer* (Fig. 1), empleada habitualmente en operaciones aerofotográficas proporciona una plataforma aérea adecuada para misiones de adquisición hiperespectral gracias a su configuración de ala alta, un campo de visión nadir sin obstrucciones y una arquitectura de cabina adaptable.

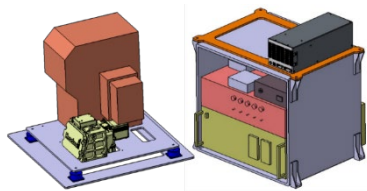


**Figura 1.** P68 Observer, en el aeródromo de Requena.

## 3. MÉTODOS

### 3.1. Integración de sistema aeroportado

El sistema de adquisición hiperespectral diseñado para SpaFLEX fue especificado por el Área de Sistemas de Teledetección del INTA e integrado en la plataforma aérea por la empresa Heligrafics. Este sistema se basa en la implementación de los sensores CFL y CASI1500i del INTA, junto con sus sistemas de posicionamiento Applanix GPS+INS asociados. Se diseñaron y calcularon las interfaces mecánicas adecuadas para la nueva aeronave (Fig. 2), teniendo en cuenta que no existiese apantallamiento de la señal ni interferencias físicas con el fuselaje u otros elementos de la aeronave.



**Figura 2.** Disposición sensores y módulos de control.

La aeronave cuenta con un sistema de alimentación para instrumentación a 28 VDC (voltios en corriente continua). Se adaptó una unidad distribuidora de potencia, junto con un pequeño convertidor adicional, para extraer los voltajes apropiados destinados a cada una de las unidades de los sistemas y se instaló en el rack de 19'.

El módulo de control del CFL cumple con la norma RTCA DO-160 (Condiciones ambientales y procedimientos de prueba para equipos aeroportados). Se adaptó el sensor CFL, inicialmente concebido para la adquisición mediante operador, a un régimen de funcionamiento en autónomo mediante el desarrollo de herramientas creadas ad hoc. Gracias al sistema INS/GNSS, embebido en el propio sensor y al software Hyperspec® III, la adquisición de datos tiene la posibilidad de activarse cuando la plataforma entra en un polígono predefinido durante el diseño de la campaña. La corrección geométrica de los datos, así como su georreferenciación hace imprescindible contar con un sistema INS/GNSS. En el caso del CFL se cuenta con el Applanix APX-15. La aeronave cuenta con una trampilla estándar de 63 x 46 cm en la parte inferior del fuselaje, diseñada para la instalación de equipos de observación terrestre (Fig. 3). La escotilla está situada en el centro derecha y se acciona con una manivela manual durante el vuelo.



**Figura 3.** Montaje sistema (izq.) y trampilla (dcha.).

### 3.2. Campaña adquisición de datos

Se establecieron tres sitios de Cal/Val en diversos ecosistemas ibéricos: Doñana (Huelva), La Roda (Albacete) y Sarrión (Teruel), aportando variabilidad en la cobertura vegetal, la geometría y las condiciones ambientales. La planificación reservó dos semanas para la realización de la campaña aeroportada SpaFLEX 2025. La primera semana se dedicó a la instalación de los sistemas en la plataforma aérea, la verificación de su funcionamiento en tierra, la realización del vuelo de prueba y a la evaluación final necesaria de los datos para declarar el sistema como apto para la adquisición.

Durante la segunda semana se coordinó la campaña entre todos los grupos participantes, lo que incluyó la organización detallada de las operaciones aéreas y su integración con las actividades de campo. Las operaciones de vuelo se llevaron a cabo durante dos días consecutivos, 7-8 de octubre de 2025, para garantizar la cobertura completa de las tres zonas de interés. Esta

planificación se seleccionó para maximizar la adquisición de datos bajo condiciones atmosféricas favorables. El área de estudio se subdividió en siete polígonos, delimitados en función de la distribución espacial de la instrumentación in situ, la cobertura vegetal y las torres *Eddy Covariance*, abarcando una superficie total de aproximadamente 700 hectáreas. La adquisición de datos se realizó de forma coordinada con sensores en tierra (FLOX, Piccolo, ASD) y vehículos aéreos no tripulados instrumentados, lo que permitió mediciones sincronizadas y coherencia multiplataforma entre las observaciones satelitales, aeroportadas e in situ. Las pasadas de adquisición se planificaron en configuración Norte-Sur y con una velocidad de 120 KTS (62 ms<sup>-1</sup>).

#### 3.2.1. Zonas Sarrión y La Roda: Vuelo 7 Oct

El 7 de octubre de 2025, la presencia de niebla densa retrasó el inicio de la adquisición en la primera zona de interés, Sarrión, hasta las 12:26 UTC. El registro de datos CASI falló inicialmente, pero durante el trayecto a La Roda pudieron realizarse acciones correctivas y el sistema volvió a operar de manera nominal. Durante la adquisición se desarrolló de manera simultánea una campaña de campo con la siguiente instrumentación: ASD, FLOX. Para maximizar la señal del CASI y basándonos en los datos del vuelo de prueba y de ensayos en tierra se ajustó la configuración espectral a una suma de 6 canales espectrales (*Row Sumation 6*), lo que da un ancho espectral de 14,4 nm. En la Tabla 3 se muestra el tamaño de pixel de los datos CASI teniendo en consideración que la altura de vuelo fue de 2160 m sobre el terreno. El mínimo tiempo de integración para esta configuración es de 32 ms.

**Tabla 3.** Tamaño de pixel CASI 1500

Tamaño del pixel en el nadir – GSD	
Across track	1.06m @ AGL 2164m Z01 Sarrión
	1.07m @ AGL 2184m Z02 Manzanera
Along track	1.98m @IT32ms y 62 ms <sup>-1</sup> (GS120KTS)

#### 3.2.2. Zona Doñana: Vuelo 8 Oct

El vuelo se diseñó con 9 pasadas de 2 kilómetros de longitud, repartidas en tres zonas: Monte Blanco, Sabinar y Monte Negro. Cada uno de estos polígonos se encuentra centrado en una torre *Eddy Covariance*. A las 10:55 UTC se alcanzó la zona de estudio (Fig. 4), comenzando por Monte Negro. La altura de vuelo fue de 1791 m sobre el terreno y el tamaño de pixel CFL en el nadir es de 1,82 m *across track* x 2,04 m *along track* (tiempo de integración de 33 ms). En la dimensión espacial se realizó un *binning* x4 lo que proporciona 320 pixel/línea. Al finalizar la adquisición, se registró un archivo *dark frames* con la trampilla del avión cerrada.

## 4. RESULTADOS

Las imágenes adquiridas en la campaña se han integrado en el sistema de proceso de datos hiperespectrales del INTA. Como resultado se han generado ya los productos L1b (radiancias calibradas) e

IGM (archivos de coordenadas cartográficas por píxel), así como parámetros de calidad de los datos. La Tabla 4 resume las escenas disponibles.

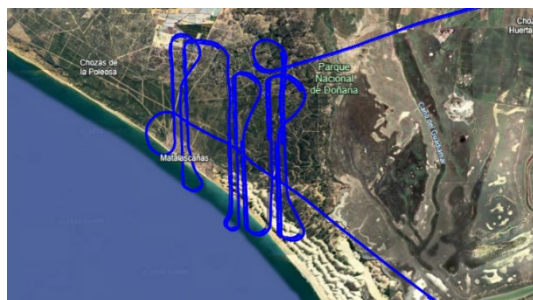


Figura 4. Trayectoria de vuelo sobre Doñana.

Tabla 4. Escenas datos CASI y CFL disponibles

Zona test	CASI 1500i	CFL
I Sarrión	0	3
II Manzanera	0	3
III La Roda	6 (12) *	6
IV Doñana (MN)	3	3
V Doñana (SB)	3	3
VI Doñana (MB)	3	3

\*Nota: una de las escenas se adquirió 2 veces y otra 6

En el caso de La Roda, el solape entre escenas es muy alto, lo que posibilita analizar la dependencia temporal de las variables en estudio. En las imágenes CASI se dispone además de repeticiones adicionales de algunas pasadas, que permitirán un análisis particularmente detallado de este aspecto. La simultaneidad en la adquisición de ambos sensores también permite comparar los resultados entre ellos.

La Tabla 5 muestra el valor de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) estimado para diferentes bandas de cada sensor en la zona de La Roda. En el CASI, el SNR se obtiene analizando los datos obtenidos al observar la superficie a través de un filtro difusor (al inicio y final de cada imagen), es decir para una señal equivalente a la media del terreno. En el CFL no existe un dispositivo equivalente, y el SNR se aproxima considerando como señal la radiancia media de la escena y como ruido la desviación típica mínima de todos los subconjuntos posibles de 32 píxeles dentro de una misma columna imagen. El menor valor del CFL es esperable dada su muy alta resolución espectral.

Tabla 5. SNR para diferentes longitudes de onda, estimado a partir de los datos obtenidos en La Roda

Longitud de onda ( $\lambda$ )	CASI 1500i	CFL
545	310	-
675	239	49
688	229	47
730	225	63
760	192	28
775	225	59
903	89	-

La Figura 5 muestra la radiancia espectral registrada por el CFL sobre un cultivo en regadío en la zona test de La Roda, mostrando el patrón de absorción típico en la

región O2-A, que permite la detección de la fluorescencia de la vegetación.

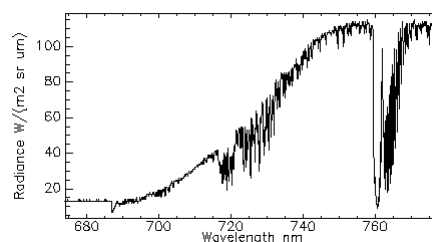


Figura 5. Radiancia espectral registrada por el CFL

La Figura 6 muestra ejemplos de las escenas adquiridas en la Roda y Doñana; la imagen CFL se ha superpuesto a la imagen CASI, de mayor cobertura lateral.

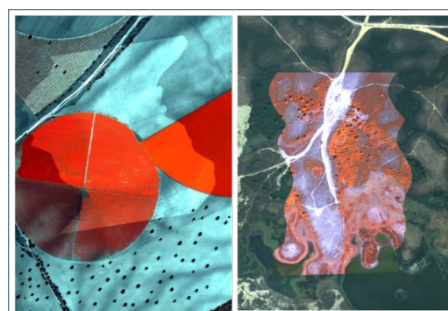


Figura 6. Imagen RGB a partir de datos CFL sobre las zonas test de La Roda (izquierda) y Doñana - Monte Negro (derecha), superpuesta a una imagen CASI (respectivamente infrarrojo color y color natural).

## 5. CONCLUSIONES Y FUTURO

La campaña generó con éxito un conjunto de datos único, multiescala y multiplataforma, adecuado para un análisis integrado. Estos datos proporcionan una base fundamental para la validación de los algoritmos FLEX y la mejora de la calidad de los productos de Nivel 2.

El desarrollo del sistema operacional e integrado de teledetección aeroportada implementado en esta campaña es exportable a diversas plataformas debido a su versatilidad, autonomía de operación y capacidades. La instalación en pods subalares o aeronaves no tripuladas tipo MALE (*Medium Altitude Long Endurance*) es posible realizando los ajustes necesarios.

## 6. REFERENCIAS

- De Miguel, E., Carretero, L., Gutiérrez-de la Cámara, O., Jiménez, M., Muñoz-Sánchez, *et al.* 2022. Caracterización del sensor aeroportado CFL del INTA. Actas del XIX Congreso de la Asociación Española de Teledetección, pp. 429-432. 2022, Pamplona.
- Cendrero-Mateo M.P., Jiménez M., Díaz-Delgado R., Peón J., *et al.* SpaFLEX: A Comprehensive Approach to Calibrating and Validating FLEX Level-2 Products. European Space Agency Living Planet Symposium. DOI: 10.13140/RG.2.2.33764.23684. 23-27 June 2025, Vienna, Austria.