

Ruiz-Verdú, A.; Tenjo, C.; Martín, A.; Falcão, A.; Jacinto, A.; Isola, C.; Moreno, J. FLEX-E, el simulador end-to-end de la misión FLuorescence EXplorer (FLEX)

FLEX-E, el simulador end-to-end de la misión FLuorescence EXplorer (FLEX)

Ruiz-Verdú, Antonio ¹ Tenjo, Carolina ¹ Martín, Ana Amelia ² Falcão, António ³
Jacinto, Adrián ¹ Isola, Claudia ⁴ Moreno, José ¹

¹ Universidad de Valencia, España

² GMV Aerospace and Defence S.A.U., España

³ INDRA - Deimos Engenharia, Portugal

⁴ European Space Agency (ESA)

ORCID: Ruiz-Verdú 0000-0001-6832-3496 Moreno 0000-0002-5283-3333

Correspondencia: antonio.ruiz@uv.es carolina.tenjo@uv.es anamartin@gmv.com ajfalcao@indracompany.com
adrian.jacinto@uv.es Claudia.Isola@esa.int jose.moreno@uv.es

RESUMEN

FLEX-E, el simulador extremo a extremo (end-to-end) de la misión tándem FLEX/S3 es una herramienta informática que simula el proceso completo de adquisición de escenas durante el desarrollo del sistema de observación (plataformas e instrumentos) y de los algoritmos de proceso. Con una arquitectura modular, incluye la simulación de la geometría de observación, un generador de escenas basado en modelos de transferencia radiativa, módulos de instrumento y algoritmos de proceso a nivel 1 (L1) y nivel 2 (L2). Durante las fases A/B (diseño preliminar) y C/D (cualificación y producción) FLEX-E ha permitido evaluar el cumplimiento de los requisitos de misión y la consolidación de los algoritmos de calibrado, corrección geométrica, co-registrado, corrección atmosférica y productos L2. Es también una herramienta clave en la fase actual, previa al lanzamiento del satélite (previsto para septiembre de 2026), en la que se prueban los procesadores operacionales, así como durante la fase de comisionado, en la que permitirá evaluar escenarios de ajuste de algoritmos L1 y L2.


Palabras clave: FLEX, simulador de misión, generador de escenas, fluorescencia, fotosíntesis

Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

FLEX-E, el simulador end-to-end de la misión FLuorescence EXplorer (FLEX)

Ruiz-Verdú, Antonio ⁽¹⁾, Tenjo, Carolina ⁽¹⁾, Martín, Ana Amelia ⁽²⁾, Falcão, António ⁽³⁾, Jacinto, Adrián ⁽¹⁾, Isola, Claudia ⁽⁴⁾, Moreno, José ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Valencia, España.

 0000-0001-6832-3496, antonio.ruiz@uv.es; carolina.tenjo@uv.es
adrian.jacinto@uv.es;  0000-0002-5283-3333, jose.moreno@uv.es

⁽²⁾ GMV Aerospace and Defence S.A.U., España
anamartin@gmv.com

⁽³⁾ INDRA - Deimos Engenharia, Portugal.
ajfalcao@indracompany.com

⁽⁴⁾ European Space Agency (ESA).
Claudia.Isola@esa.int

Resumen: FLEX-E, el simulador extremo a extremo (*end-to-end*) de la misión tándem FLEX/S3 es una herramienta informática que simula el proceso completo de adquisición de escenas durante el desarrollo del sistema de observación (plataformas e instrumentos) y de los algoritmos de proceso. Con una arquitectura modular, incluye la simulación de la geometría de observación, un generador de escenas basado en modelos de transferencia radiativa, módulos de instrumento y algoritmos de proceso a nivel 1 (L1) y nivel 2 (L2). Durante las fases A/B (diseño preliminar) y C/D (cualificación y producción) FLEX-E ha permitido evaluar el cumplimiento de los requisitos de misión y la consolidación de los algoritmos de calibrado, corrección geométrica, co-registrado, corrección atmosférica y productos L2. Es también una herramienta clave en la fase actual, previa al lanzamiento del satélite (previsto para septiembre de 2026), en la que se prueban los procesadores operacionales, así como durante la fase de comisionado, en la que permitirá evaluar escenarios de ajuste de algoritmos L1 y L2.

Palabras clave: FLEX, simulador de misión, generador de escenas, fluorescencia, fotosíntesis.

FLEX-E, the end-to-end simulator of the FLuorescence Explorer (FLEX) mission

Abstract: *FLEX-E, the end-to-end simulator for the FLEX/S3 tandem mission, is a software tool that simulates the complete scene acquisition process during the development of the observation system (platforms and instruments) and the processing algorithms. With a modular architecture, it includes simulation of the observation geometry, a scene generator based on radiative transfer models, instrument modules, and processing algorithms at Level 1 (L1) and Level 2 (L2). During phases A/B (preliminary design) and C/D (qualification and production), FLEX-E has enabled the evaluation of mission requirements' compliance, as well as the consolidation of calibration, geometric correction, co-registration, atmospheric correction, and L2 algorithms. It is also a key tool in the current phase, prior to the satellite launch (scheduled for September 2026), in which the operational processors are tested, as well as during the commissioning phase, where it will allow for the evaluation of L1 and L2 algorithm tuning scenarios.*

Keywords: *FLEX, mission simulator, scene generation, fluorescence, photosynthesis.*

1. INTRODUCCIÓN

La misión espacial FLEX (FLuorescence Explorer) es la octava misión científica del programa Earth Explorer de la Agencia Espacial Europea (ESA). Seleccionada en 2015 tras una fase A/B competitiva (ESA, 2015), es la primera misión específicamente diseñada para la cuantificación de la actividad fotosintética de los

ecosistemas terrestres, mediante la estimación de la fracción de energía solar absorbida por la vegetación y sus vías de disipación (fotoprotección, disipación térmica y emisión de fluorescencia).

El principal desafío de FLEX es la obtención de la emisión de fluorescencia de la clorofila-a inducida por el sol (*Sun Induced chlorophyll Fluorescence*, SIF), que es una

señal muy baja para cuya medida es necesaria una elevada sensibilidad y resolución ultraspectral en las bandas de absorción del oxígeno atmosférico (Drusch *et al.* 2017). Para cuantificar la disipación no fotoquímica (NPQ) se requiere información hiperespectral en la región 500-780 nm (Van Wittenberghe *et al.*, 2024) y medidas en el infrarrojo térmico, mientras que la estimación de la radiación solar fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (APAR) requiere todo el intervalo de 400 a 700 nm (Verrelst *et al.*, 2015).

FLEX consta de una plataforma con el instrumento FLORIS (FLuORescence Imaging Spectrometer), consistente en dos espectrómetros de barrido, que cubren, respectivamente, el rango espectral 500-780 nm con 0,6 nm de muestreo espectral (FLORIS-LR) y las regiones de absorción del oxígeno atmosférico en el rojo (O2B) e infrarrojo (O2A) con tan solo 0,093 nm de muestreo espectral (FLORIS HR). El satélite y el instrumento están en la última fase de cualificación y el lanzamiento está previsto en septiembre de 2026.

FLEX orbitará en tándem con Sentinel 3 (S3B), con un ancho de imagen de 150 km (coincidente con la cámara 4 de OLCI) y una resolución espacial de 300 m. La adquisición cuasi sincrónica con S3 permitirá utilizar la información de OLCI y SLSTR, complementaria con FLORIS, para la obtención de los productos L2 y L3 de FLEX (Figura 1).

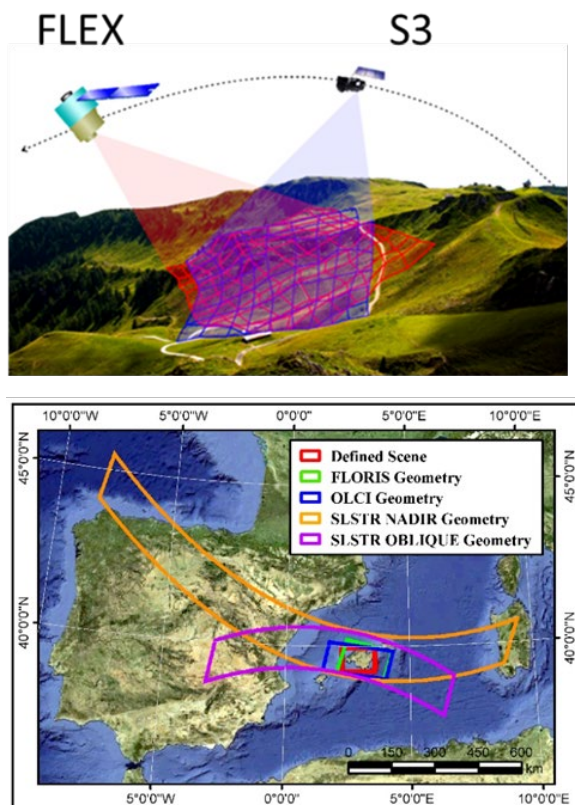


Figura 1. Adquisición en tándem de FLEX y S3 y superposición de las imágenes obtenidas.

Un simulador de misión extremo a extremo (*end-to-end simulator* o E2ES) es una herramienta informática que permite la evaluación de los requisitos de misión, la

consolidación del sistema y los requisitos técnicos, durante sus diferentes fases de desarrollo. En una misión científica como FLEX, en la que se pretende poner a prueba un concepto novedoso en Observación de la Tierra, el E2ES, denominado FLEX-E es especialmente necesario y requiere un mayor nivel de complejidad que los simuladores diseñados para misiones operacionales,

El proyecto FLEX-E comenzó en 2017, tras la selección de FLEX como Earth-Explorer 8, partiendo de un prototipo de E2ES (Vicent *et al.*, 2016) diseñado durante las fases A/B (estudio de viabilidad y diseño preliminar). Y ha evolucionado durante la fase C/D (diseño detallado, calificación y producción) para convertirse en una herramienta de apoyo en el desarrollo y validación de los algoritmos de proceso. Es una herramienta flexible que puede generar muy diversos conjuntos de datos de entrada (escenas de radiancia en el techo de la atmósfera para diferentes tipos de superficie, atmósfera y geometrías de observación) sobre las que probar los prototipos de procesador L1 y L2 y, finalmente, los procesadores operacionales, antes del lanzamiento del satélite.

2. DISEÑO Y ARQUITECTURA DE FLEX-E

Cada uno de los módulos de FLEX-E ha sido desarrollado independientemente por socios industriales y científicos y se ha integrado en un entorno de simulación genérico basado en OpenSF, en el que se configuran y ejecutan las simulaciones extremo a extremo. Para facilitar la operatividad de FLEX-E, cada módulo se ejecuta secuencialmente, como se muestra en la Figura 2.

Los Módulos de Geometría (GM para FLORIS y S3G para Sentinel-3) se ejecutan primero, proporcionando la geometría de observación de cada sensor en cada punto de la órbita, partiendo de coordenadas o tiempos orbitales definidos por el usuario. Posteriormente, el Módulo Generador de Escenas (SGM) utiliza la geometría de observación, junto con los parámetros de configuración, para generar escenas de alta resolución espacial y espectral, para cada sensor de la misión tándem FLEX/S3 (FLORIS-HR, FLORIS-LR, OLCI y SLSTR).

El SGM, desarrollado en la Universidad de Valencia (Tenjo *et al.*, 2017), permite simular escenas sintéticas, con patrones geométricos simples o con texturas realistas, en las que el usuario define las propiedades biofísicas de la vegetación (como concentración de clorofila o índice de área foliar, entre otras) y el tipo de suelo, así como la composición de la atmósfera (perfiles de vapor de agua, aerosoles, temperatura, nubosidad). Para las condiciones de iluminación de la escena, el SGM propaga la radiación solar incidente mediante el código de transferencia radiativa MODTRAN y simula la interacción de esa radiación con el modelo SCOPE (Yang *et al.*, 2021), teniendo en cuenta los efectos de la altitud y el relieve mediante modelos digitales de elevaciones. La radiación reflejada y emitida es finalmente propagada desde la superficie (*Top-Of-Canopy*, TOC) hasta el techo de la atmósfera (*Top-Of-Atmosphere*, TOA), tal y como se resume en la Figura 3,

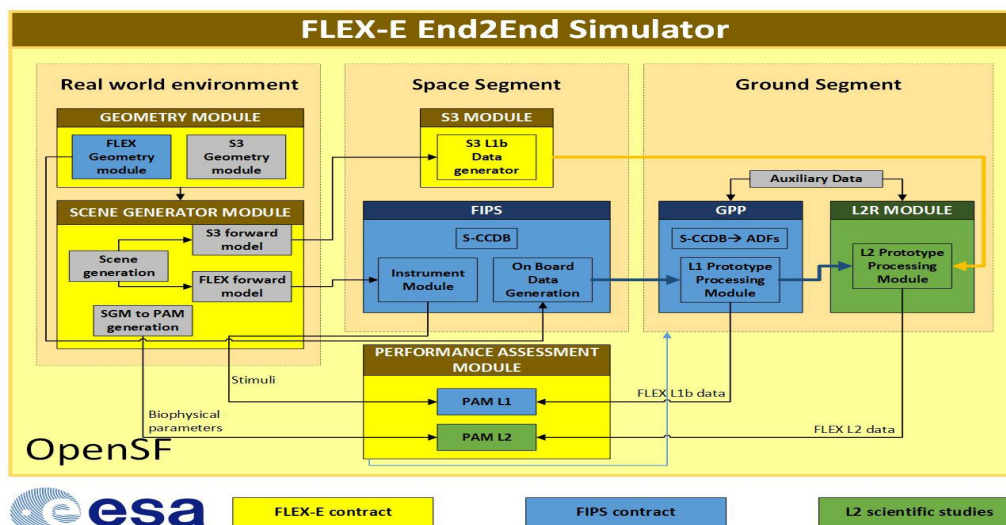


Figura 2. Arquitectura de FLEX-E.

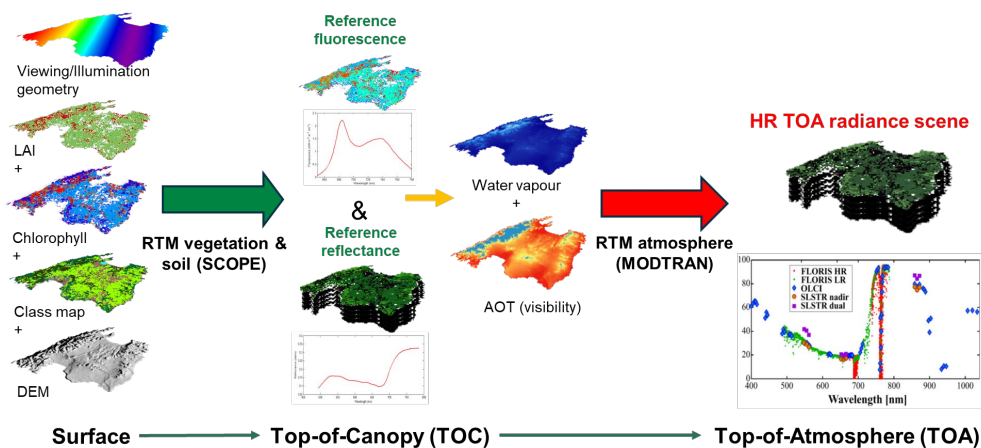


Figura 3. Ejemplo de generación de escenas TOA por el Módulo generador de Escenas (SGM).

Estas escenas TOA se proporcionan posteriormente a los módulos de Instrumento: *FLEX Instrument Performance Simulator* (FIPS) y *Sentinel-3 Instrument Module* (S3M). FIPS, proporcionado por la industria, simula la creación de los datos brutos a bordo (L0) partiendo de las especificaciones de los espectrómetros de FLORIS, con sus diferentes fuentes de ruido radiométrico y espectral, que se pueden seleccionar independientemente, para evaluar su impacto en los productos L1 y L2. A su vez los datos L0 se proporcionan al Ground Processor Prototype (GPP) que es el prototipo del procesador operacional de Nivel 1 (L1OP), que hará parte del segmento terreno de la misión.

El GPP genera las escenas L1B (radiancias TOA) en el formato final de los productos FLORIS. Por su parte, el S3M es una versión simplificada del procesador operacional de Sentinel-3, generando escenas

simuladas L1B de OLCI y SLSTR, partiendo de los mismos datos de referencia del SGM.

Finalmente, los datos L1B son leídos por el procesador de nivel 2, inicialmente denominado *L2 Retrieval Module* (L2RM) y que en la fase actual del proyecto se denomina L2PP (*L2 Prototype Processor*), prototipo del procesador operacional del segmento terreno (L2OP).

El L2PP contiene los algoritmos científicos que obtienen los productos L2 especificados en los requisitos de misión. Se divide a su vez en varios submódulos encadenados:

- L1C, que realiza la proyección y el co-registrado de las escenas TOA de los diferentes instrumentos sobre una geometría de referencia común.
- L2A, que lleva a cabo la caracterización y corrección atmosférica, a partir de las radiancias TOA del L1C, para obtener la denominada reflectividad aparente Top-of-Canopy, que resulta de la combinación de la

reflectividad real y la emisión de fluorescencia (Sabater *et al.*, 2017).

- L2B, que descompone la señal de la reflectividad aparente para obtener la curva de emisión de fluorescencia de la clorofila- a (Sun-Induced-Fluorescence, SIF) (Cogliati *et al.*, 2015).
- L2C, que genera productos biofísicos de la vegetación y suelos, estima la disipación no fotoquímica (NPQ) y, finalmente la tasa de transporte electrónico en la fotosíntesis (ETR).

3. USO DE FLEX-E EN LA EVALUACIÓN DE LOS REQUISITOS DE MISIÓN

La función principal de FLEX-E es la evaluación de los requisitos de misión L1 y L2 para diferentes escenarios (tipos de escenas, ruidos instrumentales, versiones de los algoritmos de proceso), mediante la comparación de los productos con los datos de referencia generados por el SGM.

Para ello existen dos módulos de evaluación del desempeño, a nivel 1 (*L1 Performance Assessment Module*) y a nivel 2 (*L2 Performance Evaluation Module*), que hacen una comparación píxel a píxel y generan estadísticos de error, mapas, histogramas y otras salidas gráficas que permiten determinar si el producto cumple con el documento de requisitos de la misión (ESA, 2024).

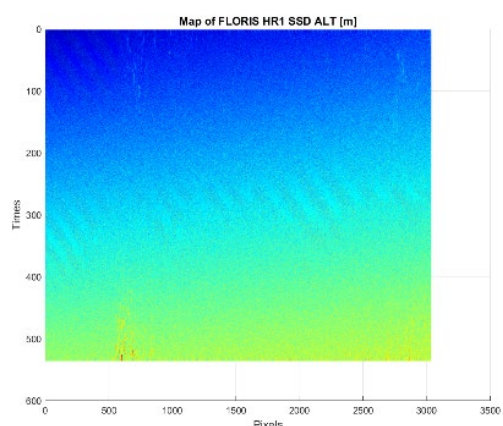


Figura 4. Ejemplo de resultado del módulo L1 PAM.

4. CONCLUSIONES

FLEX-E es el simulador integral del desempeño de la misión tándem FLEX/S3

Es la herramienta clave para demostrar la viabilidad del concepto de la misión FLEX y la base para el diseño del segmento terreno.

También es una herramienta científica versátil que permite simular la variabilidad de las condiciones terrestres, atmosféricas y de observación a las que se enfrentará la misión tándem FLEX-Sentinel-3.

Permite evaluar el impacto, en los productos científicos L2, de las limitaciones o restricciones impuestas por las soluciones técnicas adoptadas para el instrumento y la plataforma.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el proyecto de la Agencia Espacial europea (ESA) “FLEX L2 End to End Mission Performance Simulator” (Contrato 4000119707/17/NL/MP). <https://leoipl.uv.es/l2e2es/>

6. REFERENCIAS

- Cogliati, S., Verhoef, W., Kraft, S., Sabater, N., Alonso, L., Vicent, J., ... & Colombo, R. (2015). Retrieval of sun-induced fluorescence using advanced spectral fitting methods. *Remote Sensing of Environment*, 169, 344-357.
- Drusch, M., Moreno, J., Del Bello, U., Franco, R., Goulas, Y., Huth, A., ... & Verhoef, W. (2016). The fluorescence explorer mission concept—ESA’s earth explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(3), 1273-1284.
- ESA. (2015) "Report for mission selection: FLEX," ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Tech. Rep. ESA SP-1330/2, Jun. 2015.
- ESA, “FLEX Earth Explorer 8 Mission Requirements Document - FLEX MRD”. ESAEOP-SM/2221/MDrumd. Version 3.1. Dec. 2024
- Sabater, N., Vicent, J., Alonso, L., Cogliati, S., Verrelst, J., & Moreno, J. (2017). Impact of atmospheric inversion effects on solar-induced chlorophyll fluorescence: Exploitation of the apparent reflectance as a quality indicator. *Remote Sensing*, 9(6), 622.
- Tenjo, C., Rivera-Caicedo, J. P., Sabater, N., Servera, J. V., Alonso, L., Verrelst, J., & Moreno, J. (2017). Design of a generic 3-D scene generator for passive optical missions and its implementation for the ESA’s FLEX/Sentinel-3 tandem mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(3), 1290-1307.
- Van Wittenberghe, S., Amin, E., Pascual-Venteo, A. B., Pérez-Suay, A., Tenjo, C., Sabater, N., ... & Moreno, J. (2024). Retrieval of leaf-level fluorescence quantum efficiency and NPQ-related xanthophyll absorption through spectral unmixing strategies for future VIS-NIR imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 300, 113879.
- Verrelst, J., van der Tol, C., Magnani, F., Sabater, N., Rivera, J. P., Mohammed, G., & Moreno, J. (2016). Evaluating the predictive power of sun-induced chlorophyll fluorescence to estimate net photosynthesis of vegetation canopies: A SCOPE modeling study. *Remote Sensing of Environment*, 176, 139-151.
- Vicent, J., Sabater, N., Tenjo, C., Acarreta, J. R., Manzano, M., Rivera, J. P., ... & Moreno, J. (2016). FLEX end-to-end mission performance simulator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(7), 4215-4223.
- Yang, P., Prikaziuk, E., Verhoef, W., & van Der Tol, C. (2021). SCOPE 2.0: A model to simulate vegetated land surface fluxes and satellite signals. *Geoscientific Model Development*, 14(7), 4697-4712.