

CASO PRÁCTICO

Misión FLEX (*Fluorescence Explorer*): Observación de la fluorescencia por teledetección como nueva técnica de estudio del estado de la vegetación terrestre a escala global

Moreno, J., Alonso, L., Delegido, J.*, Rivera, J.P., Ruiz-Verdú, A., Sabater, N., Tenjo, C., Verrelst, J. Vicent, J.

Laboratorio de Procesamiento de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia, España.

Resumen: La misión FLEX (*Fluorescence Explorer*) es una candidata al 8º explorador del programa "Earth Explorer" de la ESA. Es la primera misión espacial diseñada específicamente para la estimación de la fluorescencia de la vegetación a escala global. La propuesta incluye que FLEX vuele en tándem con el futuro Sentinel-3 de la ESA. La información proporcionada por los sensores de Sentinel-3 será complementada con la proporcionada por FLORIS (*Fluorescence Imaging Spectrometer*) a bordo de FLEX, que medirá la radiancia entre 500 y 800 nm con una anchura de bandas entre 0,1 nm y 2 nm, proporcionando imágenes con un ancho de barrido de 150 km y tamaño de pixel de 300 m. Esta información permitirá el estudio detallado de la dinámica de la vegetación con métodos mejorados para la estimación de parámetros biofísicos clásicos y la introducción de nuevos parámetros biofísicos como la fluorescencia. En este trabajo se muestra el estado actual de la misión FLEX en fase A/B1 y de los distintos estudios, campañas y proyectos que se están llevando a cabo en torno a la misión FLEX.

Palabras clave: FLEX, fluorescencia, parámetros biofísicos, Sentinel-3.

FLEX (Fluorescence Explorer) mission: Observation fluorescence as a new remote sensing technique to study the global terrestrial vegetation state

Abstract: FLEX (Fluorescence Explorer) is a candidate for the 8th ESA's Earth Explorer mission. Is the first space mission specifically designed for the estimation of vegetation fluorescence on a global scale. The mission is proposed to fly in tandem with the future ESA's Sentinel-3 satellite. It is foreseen that the information obtained by Sentinel-3 will be supplemented with that provided by FLORIS (Fluorescence Imaging Spectrometer) onboard FLEX. FLORIS will measure the radiance between 500 and 800 nm with a bandwidth between 0.1 nm and 2 nm, providing images with a 150 km swath and 300 m pixel size. This information will allow a detailed monitoring of vegetation dynamics, by improving the methods for the estimation of classical biophysical parameters, and by introducing a new one: fluorescence. This paper presents the current status of FLEX mission in A/B1 phase and the different ongoing studies, campaigns and projects carried out in support of the FLEX mission.

Key words: FLEX, fluorescence, biophysical parameters, Sentinel-3.

* Autor para la correspondencia: Jesus.Delegido@uv.es

1. Introducción

El conocimiento de la fluorescencia emitida por la vegetación ha sido usado por los fisiólogos para caracterizar los efectos de distintos tipos de estrés en las plantas, tanto terrestres como acuáticas y algas. El método usado para medir estos efectos en el laboratorio (fluorescencia inducida) se basa en la medida de la fluorescencia como resultado de la iluminación con una fuente artificial de luz de intensidad y frecuencia controlada. Sin embargo, la medida de la fluorescencia que se produce en las plantas de forma natural en el proceso de fotosíntesis gracias a la luz solar (fluorescencia pasiva), es un método no invasivo que puede ser llevado a cabo por técnicas de teledetección (Meroni *et al.*, 2010) con importantes aplicaciones en agronomía de precisión, estudios forestales y medioambientales y balance global de carbono en la Tierra. El principal problema es que la señal de fluorescencia es muy débil frente a la reflectividad de la luz solar, por lo que se necesitan instrumentos de muy alta resolución espectral para desacoplar la señal.

El estudio de la fluorescencia es útil también para los estudios de calidad de aguas. La medición *in vivo* de la fluorescencia se introdujo en las ciencias acuáticas en 1966 (Lorenzen, 1966). Actualmente, se mide de forma rutinaria en el mar utilizando diversos fluorómetros *in situ*. Los primeros trabajos publicados (Morel y Prieur, 1977; Neville y Gower, 1977) sugieren que la emisión de fluorescencia se puede observar analizando la luz natural ascendente del océano utilizando espectroradiómetros. Algunas misiones de teledetección han incorporado técnicas para la observación de la fluorescencia en agua, por ejemplo, MODIS a bordo de Terra y Aqua, y MERIS en Envisat. Futuras misiones con más alta resolución espectral y mejor cociente señal/ruido, permitirían obtener la medida de la fluorescencia de manera mucho más exacta (Huot y Babin, 2010).

El objetivo de este trabajo es presentar el estado actual de la primera misión de la Agencia Espacial Europea (ESA) diseñada específicamente para medir la fluorescencia pasiva desde un satélite y optimizada para los estudios de la vegetación, aunque también puede mejorar los estudios de la fluorescencia en aguas.

2. La fluorescencia de las plantas

La fotosíntesis es el proceso por el cual la vegetación convierte la energía lumínica proveniente del Sol en energía química que da lugar a la creación de biomasa, mediante la conversión de dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno. En este proceso la luz es absorbida por los pigmentos fotosintéticos, principalmente clorofila y carotenoides. Mediante los complejos antena, la molécula de clorofila absorbe un fotón, quedando ésta en un estado excitado inestable (Figura 1).

Para volver a su estado de equilibrio las moléculas de clorofila disipan esta energía por cuatro procesos que compiten entre sí: parte es utilizada para realizar la fotosíntesis, parte es re-emitida como fluorescencia de la clorofila (Figuras 1 y 2) (Maxwell y Johnson, 2000), y el exceso de energía se pierde en forma de disipación térmica mediante dos mecanismos regulados por la planta de manera que existe una correlación entre la fluorescencia y la fotosíntesis. Por lo tanto, la medida de la fluorescencia puede proporcionar información directa del proceso de fotosíntesis y de los cambios en la eficiencia fotoquímica, lo cual proporciona una novedosa herramienta para la rápida detección del stress en la vegetación, antes de que el daño sea irreversible. Además, es un buen indicador de la presencia de perturbaciones medioambientales como puedan ser el exceso de ozono, presencia de contaminantes, deficiencia en nutrientes o stress hídrico. La observación de la fluorescencia también puede ser usada para la estimación de la productividad de las

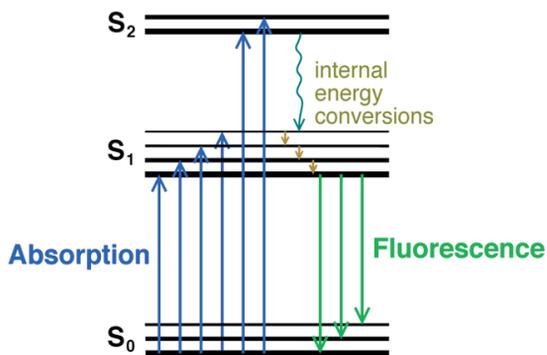


Figura 1. Esquema de los diferentes niveles de energía S de los electrones como consecuencia de la absorción de la luz solar y la emisión de fluorescencia. S₀ es el estado basal o fundamental. S₁ y S₂ son estados excitados.

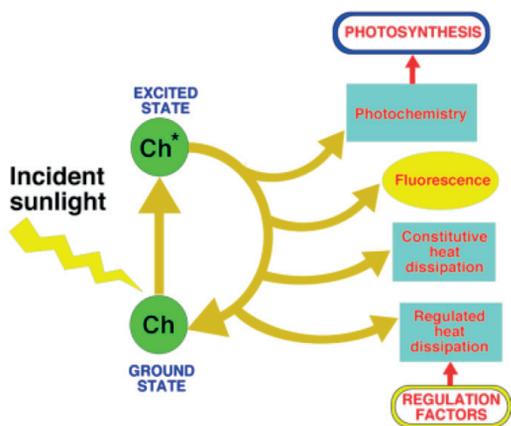


Figura 2. Esquema de la energía lumínica capturada por las moléculas de clorofila y los diferentes mecanismos de disipación de energía.

plantas y el balance de carbono a nivel global, cuyo conocimiento es fundamental en los modelos de cambio climático.

El método usado para medir estos efectos en el laboratorio se basa en la medida de la fluorescencia a nivel de hoja, a través de pulsos de amplitud modulada (PAM) mediante láser (técnicas activas). Estas mediciones permiten una estimación relativa de la variación en el rendimiento de la fluorescencia, donde rendimiento indica el cociente entre la fluorescencia emitida y la luz absorbida por las moléculas de clorofila. Las técnicas activas son muy útiles para entender los mecanismos que controlan la fluorescencia y su relación con la fotosíntesis, pero no es posible realizar este tipo de medidas en condiciones de campo o desde satélite.

En la naturaleza también se emite fluorescencia en el transcurso de la fotosíntesis, producida por la luz solar en las plantas. El enorme desarrollo de la teledetección durante los últimos 30 años, proporciona nuevas técnicas para la observación de esta fluorescencia natural (Meroni *et al.*, 2010), lo cual puede ser interesante para aplicaciones en estudios forestales y medioambientales, agronomía de precisión, o estudios de cambio climático en los que es fundamental el balance global de carbono en la Tierra (Kuze *et al.*, 2009; Daumard *et al.*, 2010; Frankenberg *et al.*, 2011). Sin embargo, la señal de fluorescencia es muy débil frente a la luz solar reflejada, lo cual dificulta enormemente su observación. La luz emitida en forma de fluorescencia

pasiva se produce en la región entre 650-850 nm, con un pico localizado en 685-690 nm y otro entre 735 y 745 nm (Figura 3). La radiancia emitida como fluorescencia se superpone a la luz solar reflejada por la planta pero con mucha menos intensidad, por lo que se hace necesario el uso de refinadas técnicas capaces de separar ambas señales a partir de la radiancia obtenida por un sensor remoto. Para ello, con el fin de poder medir la fluorescencia inducida por la luz solar en la naturaleza a escala global, han sido propuestos en el pasado diferentes algoritmos basados en medidas hiperespectrales (técnicas pasivas) (Meroni *et al.*, 2009; Joiner *et al.*, 2011). El método de discriminación por las líneas de Fraunhofer (FLD) (Plascyk, 1975; Plascyk y Grabriel, 1975) es el algoritmo más simple y extendido. Este mide la fluorescencia en las bandas de absorción de la atmósfera terrestre (parte inferior de la Figura 3) en las cuales la irradiancia solar está muy reducida y por lo tanto comparable con la emisión de fluorescencia. En la parte del visible y del infrarrojo próximo, el espectro atmosférico tiene dos importantes bandas de absorción del oxígeno, la O₂-B centrada en 687,0 nm y la O₂-A centrada en 760,4 nm. Debido a la escasa anchura de estas bandas, los métodos de estimación de la fluorescencia por teledetección hiperespectral, precisan de una muy alta resolución espectral, del orden de 0,1 nm (Meroni *et al.*, 2010). La mayoría de las técnicas pasivas están basadas en la medida de la fluorescencia desde la parte superior de la cubierta vegetal (o *Top of Canopy*, TOC), lo que requiere, además, una precisa corrección atmosférica.

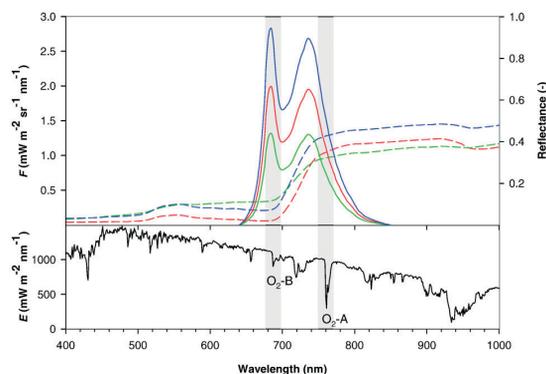


Figura 3. Señal simulada con FluorSAIL3.0 de fluorescencia (arriba) de tres vegetales diferentes junto a la curva de reflectividad (en líneas discontinuas). Abajo, irradiancia solar (Meroni *et al.*, 2010).

3. La fluorescencia como nuevo parámetro biofísico en el estudio de la vegetación

El estudio de la fotosíntesis a partir de técnicas clásicas de observación de la Tierra está basada en índices espectrales de reflectividad. Los índices como el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y EVI (*Enhance Vegetation Index*) propuestos para medir fotosíntesis son considerados índices estructurales, los cuales principalmente detectan cambios en la estructura de la cubierta vegetal pero tienen poca o ninguna sensibilidad a cambios fisiológicos de la vegetación independientes de la estructura. Dobrowski *et al.* (2005) demostraron que el NDVI no es sensible a cambios fisiológicos en la vegetación durante el día debidos a stress térmico o hídrico, ya que solo detecta cambios a largo plazo. Para este propósito, la medida de la fluorescencia de la vegetación representa la única opción para una medida directa y dinámica del estado fisiológico de la vegetación.

Numerosos estudios avalan el uso de la fluorescencia como indicador temprano de stress. A continuación se enumeran dos ejemplos en los que la fluorescencia ha sido usada para detectar deficiencia en nutrientes y stress hídrico. Corp *et al.* (2003) estudiaron la variación de la fluorescencia en un campo de maíz bajo diferentes tratamientos de nitrógeno. Dicho estudio muestra como la fluorescencia aumenta significativamente cuando aumenta la concentración de nitrógeno en la planta, alcanzando un máximo para ratios óptimos. Además, en este estudio la fluorescencia tenía una correlación lineal significativa con las medidas de productividad de la planta. En relación con el stress hídrico, Rascher *et al.* (2009) estudiaron la variación de la fluorescencia durante el día en un campo de maíz sometido a dos tratamientos hídricos, sequía y control. Los resultados muestran cómo la fluorescencia decrece con el tiempo, siendo las plantas no regadas las que presentan valores significativamente menores con respecto a las plantas control.

4. La misión FLEX

Aunque la observación de la vegetación ha sido uno de los principales objetivos de diferentes misiones de satélites en el pasado, FLEX será la primera misión diseñada explícitamente para medir la señal de fluorescencia de la clorofila, que ofrece

nuevas posibilidades para evaluar la dinámica de la fotosíntesis.

La primera vez que se presentó la idea de FLEX, fue en el programa EE-7 de la ESA *Earth Explorer Core Mission*, donde fue seleccionada para estudios *Phase-0*. Después de la evaluación llevada a cabo por el *Earth Science Advisory Committee* (ESAC) en 2009, FLEX no fue seleccionada para su estudio en *Phase-A*, pero ESAC expresó una recomendación a la ESA para investigar con detalle la posibilidad de convertir la misión en un *in-orbit demonstrator* con un único espectrómetro a bordo para medir fluorescencia en sinergia con alguna de las misiones aprobadas de la ESA. Inicialmente la misión FLEX original EE-7 estaba diseñada contando con un satélite con cuatro instrumentos a bordo, necesarios para medir de forma autónoma la señal de fluorescencia de las plantas, para hacer la corrección atmosférica y para proporcionar los datos auxiliares necesarios para interpretar la fluorescencia y relacionarla con la fotosíntesis.

El nuevo concepto de misión FLEX EE-8 consiste en un pequeño satélite con un único sensor a bordo, el *Fluorescence Imaging Spectrometer* (FLORIS) que volará en tándem con el satélite Sentinel-3 de la ESA (Figura 4). FLORIS es un sensor hiperespectral que medirá la reflectividad entre 500 y 800 nm para cubrir la región espectral del PRI (*Photochemical Reflectance Index*), las bandas de absorción de la clorofila y el *red-edge*, con una anchura de bandas de 0,1 nm en las bandas de absorción del oxígeno y de 0,5 a 2 nm en el *Red-Edge* y el PRI, lo que proporcionará información adicional para la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación, principalmente contenido en clorofila y

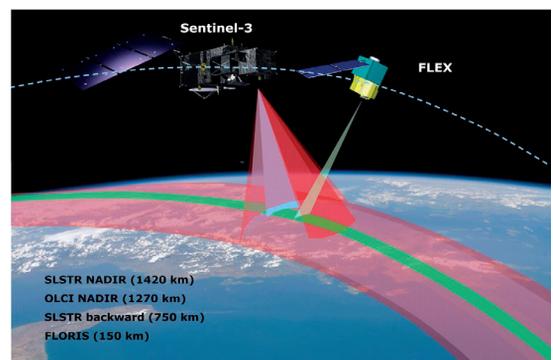


Figura 4. Composición artística del tándem Sentinel-3 y FLEX (ESA, 2013).

Leaf Area Index (LAI). Con los datos de FLORIS, la misión FLEX utilizará el fenómeno de la absorción del oxígeno en las bandas O2-A y O2-B para la estimación de los dos picos de emisión de la clorofila (Figura 3).

La duración de la misión debe ser al menos de 4 años, de tal manera que se puedan realizar varios ciclos estacionales que nos permita estudiar la evolución temporal de los cambios de la fluorescencia.

Se tomarán imágenes de latitudes entre $-56,5^{\circ}$ y 75° de la cobertura vegetal terrestre con resolución espacial de 300 m y un ancho de barrido de 150 km. Las imágenes se tomarán a media mañana, hacia las 10 h. Aunque la misión está optimizada para vegetación terrestre, también se tomarán imágenes del agua en zonas costeras debido al interés del estudio de la fluorescencia en el agua.

FLEX volará a unos pocos segundos en la misma órbita de Sentinel-3 que es uno de los satélites de la ESA dentro del programa Copernicus de la Comisión Europea. Sentinel-3 se lanzará en 2015 y está especialmente diseñado para la observación de la vegetación y masas de agua y para medir la temperatura de la superficie terrestre y del océano, con múltiples aplicaciones como las medioambientales y la vigilancia del clima. Sentinel-3 contará con distintos sensores, entre ellos el *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI) y *Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR). OLCI es una mejora de MERIS, con 21 bandas y 300 m de resolución especialmente diseñado para el estudio de vegetación y calidad de aguas. SLSTR está diseñado para medir la temperatura de la superficie terrestre y marina con una precisión de 0,3 K, cuenta con nueve canales espectrales y dos más diseñados para el seguimiento de incendios y resolución de 500 m en las bandas visibles e infrarrojas, y de 1 km en las bandas del térmico.

Sentinel-3 proporcionará conjuntos de datos auxiliares (temperatura, detección de nubes, corrección atmosférica y parámetros biofísicos) requeridos por FLEX. Y los datos de FLEX también podrán mejorar los productos de Sentinel-3 a través de la disponibilidad de información de muy alta resolución espectral.

Una de las más importantes novedades de esta misión, es la importante gama de productos de Nivel 2 que se ofrecen en el segmento terreno, bajo la responsabilidad del centro ESRIN de la ESA.

Así, en el Nivel 2a se ofrece la reflectividad de la superficie y la emisión de fluorescencia, después de la corrección atmosférica de la imagen georeferenciada. El Nivel 2b ofrece una imagen del nivel de actividad fotosintética junto a las variables biofísicas asociadas (fracción de cobertura vegetal, contenido en clorofila de la cubierta, índice de área foliar y fAPAR). Para ello se utilizarán junto a los datos de FLEX los de los sensores OLCI y SLSTR de Sentinel-3. Por último el Nivel 3 está formado por productos geofísicos generados por la composición espacial y temporal de los productos de Nivel 2 que proporcionarán información necesaria para el estudio de la asimilación de carbono, modelos climáticos y la dinámica global de la vegetación.

Las principales aplicaciones de la misión FLEX se obtendrán en estudios de cambio climático, en detección de stress en la vegetación y alerta temprana o estudios de productividad vegetal. La detección de cambios temporales puede ser clave para la mayoría de las aplicaciones. Además el conocimiento de la fluorescencia puede ofrecer gran información del proceso fotosintético y por tanto en la productividad de los sistemas de vegetación terrestre y en el balance global de carbono, fundamental para los estudios de cambio climático ya que la vegetación es el principal absorbente de CO_2 . En el contexto de la disponibilidad de alimentos y seguridad alimentaria, un problema creciente en muchas regiones es la propagación de plagas y enfermedades, por lo que sería bueno tener una herramienta para el seguimiento de los primeros signos de infestación con el fin de orientar la planificación de la gestión agrícola y forestal.

5. Proyectos actuales en torno a la misión FLEX

Las actividades industriales de la fase A/B1 se están llevando a cabo por dos consorcios independientes, encabezados por Astrium SAS (ahora AIRBUS) y por Thales Alenia Space, ambos desarrollando de forma independiente el diseño de instrumentos o requerimientos técnicos de la misión, en continua coordinación con los científicos que dirigen la misión.

Hay diferentes actividades científicas que se están llevando a cabo en torno al proyecto FLEX, de las que podemos destacar:

5.1. FLUSS – *Atmospheric corrections for fluorescence signal and surface pressure retrieval over land*

El estudio FLUSS ha abordado varios aspectos de la misión FLEX, sobre todo los relacionados con la combinación de datos FLEX y Sentinel-3 para correcciones atmosféricas, incluida la calibración radiométrica relativa de datos espectrales de los instrumentos FLORIS y OLCI y técnicas de determinación de parámetros biofísicos de la vegetación. Como parte de este estudio, también se ha tratado la importancia del conocimiento del perfil vertical de aerosoles en los algoritmos de estimación de la fluorescencia de la vegetación, así como la posibilidad de utilizar las mediciones de alta resolución espectral de FLORIS para derivar información acerca de la estructura y distribución vertical de los aerosoles.

5.2. PARCS – *Performance Analysis & Requirements Consolidation Study*

El proyecto Flex/S3 *Tandem Mission Performance Analysis and Requirements Consolidation Study* (PARCS) se lleva a cabo en el contexto de las actividades de la fase A/B1 de FLEX (PARCS, 2013). El objetivo principal es demostrar la capacidad de FLEX para observar la fluorescencia de la vegetación terrestre desde el espacio, que incluye tanto la metodología para la estimación de la fluorescencia como la adecuación del concepto tándem FLEX-Sentinel-3 para desarrollar la ciencia relacionada con los objetivos de la misión. Los objetivos de PARCS son evaluar y consolidar las necesidades de observación de la misión para la estimación de la fluorescencia de la vegetación con la precisión requerida para utilizar esta información en los modelos dinámicos de fotosíntesis, y para evaluar la viabilidad del concepto FLEX sobre la base de nuevas iteraciones de los requisitos técnicos y/o optimización en la carga útil, como consecuencia del estudio industrial, con el objetivo de proporcionar una adecuada optimización del diseño del instrumento. Los principales resultados obtenidos hasta ahora son:

- corrección atmosférica precisa a muy alta resolución espectral (0,1nm)
- desarrollo de algoritmos avanzados de estimación de fluorescencia mediante ajuste espectral
- estimación de parámetros biofísicos (clorofila, LAI, fCOVER) a partir de la sinergia de datos Sentinel-3/FLEX

- métodos de aprendizaje máquina para regresión de parámetros biofísicos a partir de datos espectrales de teledetección con estimación de confianza por pixel.

5.3. PHOTOSYNTHESIS – SIF

En el estudio PHOTOSYNTHESIS (*Sun Induced Fluorescence (SIF) and photosynthesis*), se está llevando a cabo una completa revisión de los diferentes métodos de modelización que vinculan la fluorescencia con la fotosíntesis y la *Gross Primary Productivity* (GPP), y también se hacen análisis de sensibilidad y validación usando modelos/datos experimentales y a diferentes escalas hoja/cobertura vegetal. Ha sido identificado el modelo de referencia (SCOPE) (Van der Tol *et al.*, 2009), adaptándolo para tener en cuenta los efectos bioquímicos y fisiológicos, incluyendo el acoplamiento de la atmósfera/superficie para el balance de energía y los intercambios bioquímicos. Se ha completado una base de datos de medidas de laboratorio/campo disponibles y útiles para la validación del modelo. Como resultado de este proyecto, ha sido incluida la fluorescencia en los modelos de transferencia radiativa a nivel de hoja y de cubierta vegetal, y se ha llevado a cabo el acoplamiento de los modelos fisiológicos y de transferencia radiativa a nivel de hoja. De esta forma la hoja modelizada reacciona de forma realista a los cambios ambientales, y esto se traslada a su interacción con la luz.

5.4. HYFLEX – *HyPlant Campaigns*

Recientemente se ha completado la fabricación del sensor aerotransportado HyPlant (*Hyperspectral Plant Imaging Spectrometer*) con características espectrales similares a las que tendrá FLORIS a bordo de FLEX con 0,3 nm SR (*spectral resolution*) y 0,1 nm SSI (*spectral sampling interval*). Este nuevo instrumento permitirá, a través de diversos experimentos y campañas de campo, consolidar los algoritmos de estimación de fluorescencia, al tiempo que se evalúa la viabilidad de la misión orbital. Entre estas se encuentra la campaña HyFLEX con el instrumento HyPlant, que se llevó a cabo con éxito en agosto y septiembre de 2012 en zonas agrícolas y boscosas de Alemania y la República Checa, proporcionando por primera vez imágenes desde el aire con características similares a FLORIS (HyFLEX, 2013). Hasta ahora, el trabajo dentro de HyFLEX se ha centrado en el desarrollo de una base de datos de campo y a

la vez los datos de avión recogidos durante la campaña, y la realización de todo el pre-procesamiento necesario de los datos aéreos. El conjunto de datos combinados permite simular no sólo datos FLORIS, sino también datos de Sentinel-3, mediante el uso de la información de los dos instrumentos que vuelan juntos en el avión. La base de datos se utiliza para la validación de los algoritmos de uso en FLEX sobre diferentes superficies naturales, debido a la disponibilidad de una base de datos de campo bastante completa con diferentes condiciones atmosféricas y distintas superficies. Como consecuencia del desarrollo y uso de la instrumentación se están mejorando las técnicas de medida para la observación pasiva de la fluorescencia a nivel de cubierta vegetal.

5.5. FLEX E2ES – FLEX *End-to-End Simulator*

La actividad FLEX E2ES – FLEX *End-to-End Simulator*, tiene por objetivo desarrollar un simulador completo de misión que abarca tanto el modelado directo de la señal, como todos los aspectos de procesamiento de datos de Nivel 1 y Nivel 2. Esta actividad se inicia en mayo de 2013, y ya se están realizando los diferentes módulos del problema directo y de inversión de modelos. Se está desarrollando un Módulo de Evaluación del Funcionamiento dedicado a la validación de los resultados mediante análisis estadísticos Montecarlo. Este simulador se está desarrollando de tal forma que se pueda generalizar para cualquier misión de teledetección óptica, para futuras misiones de la ESA.

En este mismo proyecto, y por requerimiento de la ESA, se hará la evaluación de cuál sería el escenario en el hipotético caso de no existir la disponibilidad de datos simultáneos de Sentinel-3, teniendo en cuenta que es un escenario poco probable ya que Sentinel-3 es un programa que durará al menos 20 años y en el que está previsto que siempre habrá al menos un satélite en correcto funcionamiento (ESA, 2013).

5.6. BIOFLEX – Estimación de parámetros biofísicos para la misión FLEX a partir de Sentinel-3 (del Ministerio de Economía y Competitividad)

La interpretación de la medida de la fluorescencia y su relación con el estado fisiológico de la planta,

exige un conocimiento detallado de algunos parámetros biofísicos como pueden ser la cantidad de clorofila en hoja, el LAI, la fracción de cobertura vegetal o la fracción absorbida de radiación fotosintéticamente activa (fAPAR). En el proyecto BIOFLEX se están evaluando diferentes modelos de estimación de parámetros biofísicos, tanto usando modelos de transferencia radiativa como índices desarrollados hasta ahora y proponiendo nuevos modelos con una amplia base de datos, simulando las características espaciales y espectrales de Sentinel-3 con el objetivo de valorar y seleccionar los mejores métodos a usar con los futuros datos de este satélite.

6. Conclusiones

En el contexto de las actividades de la misión FLEX, primera misión de la ESA diseñada específicamente para la observación de la fluorescencia de la vegetación, se están desarrollando nuevos instrumentos de campo/avión, como el sensor aerotransportado HyPlant de similares características al sensor que irá en FLEX. Además, en torno a FLEX se están llevando a cabo diversos proyectos científicos orientados a la mejora de las técnicas de corrección atmosférica, determinación de parámetros biofísicos y la medida e interpretación de la fluorescencia.

La principal conclusión que se puede obtener de los diferentes estudios es que la medida de la fluorescencia desde el espacio mediante técnicas de teledetección pasivas es posible. En el caso de FLEX, gracias a la alta resolución espectral de los espectrómetros incluidos en FLORIS, se proporciona una detallada descripción de las radiancias en las bandas de absorción del O2-A y O2-B. Estas bandas son ideales para la medida de la débil señal de fluorescencia gracias a la profundidad que alcanzan y a la poca variabilidad espacial y temporal de dicho componente atmosférico. Por otro lado, los sensores a bordo de Sentinel-3 complementan la información, haciendo posible realizar una corrección atmosférica lo suficientemente precisa con el fin de derivar la señal de fluorescencia como un producto final de calidad, ofreciendo el valor de la señal tanto en los máximos picos de emisión como su valor integrado en el rango de 500-800 nm.

Otro importante avance en el conocimiento necesario para la interpretación de la fluorescencia se ha producido al realizar una medida más precisa

y también al modelizar los procesos fotoquímicos de la fotosíntesis y la fisiología de la vegetación en función de parámetros biofísicos y ambientales, de forma que es posible entender e interpretar mejor la señal medida de fluorescencia.

Debido al alto interés de la fluorescencia en teledetección, la ESA viene organizando un congreso especializado de teledetección de la fluorescencia desde al año 2002. El último ha sido el *5th International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence* que se ha celebrado en abril de 2014 en París, Francia.

La decisión final sobre el paso a la siguiente fase de la misión FLEX, que consiste en el lanzamiento de la misión como *Earth Explorer*, se tomará por el *Earth Observation Programme Board* (PBE0) de la ESA hacia finales de 2015 siguiendo las recomendaciones del ESAC (*Earth Sciences Advisory Committee*) de la ESA.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al Proyecto AYA2010-21432-C02-01 (BIOFLEX) subvencionado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España.

Referencias

- ESA. 2013. *ESA's Sentinel satellites*. Último acceso: 14 de mayo, 2014, de http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GMES/Sentinel-3
- ESA. 2014. *5th International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence*. Último acceso: 13 de Marzo, 2014, de <http://www.congrexprojects.com/2014-events/14c04/introduction>
- Corp, L.A., McMurtrey, J.E., Middleton, E.M., Mulchi C.L., Chappelle E.W., Daughtry C.S.T. 2003. Fluorescence sensing systems: In vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply. *Remote Sensing of Environment*, 86(4): 470-479. doi:10.1016/S0034-4257(03)00125-1
- Daumard, F., Champagne, S., Fournier, A., Goulas, Y., Ounis, A., Hanocq, J.-F., Moya, I. 2010. A Field Platform for Continuous Measurement of Canopy Fluorescence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(9): 3358-3368. doi:10.1109/TGRS.2010.2046420
- Dobrowski, S.Z., Pushnik, J.C., Zarco-Tejada, P.J., Ustin, S.L. 2005. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*, 97(3): 403-414. doi:10.1016/j.rse.2005.05.006
- Frankenberg, C., Fisher, J.B., Worden, J., Badgley, G., Saatchi, S.S., Lee, J.-E., Yokota, T. 2011. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*, 38(17): L17706. doi:10.1029/2011GL048738
- Huot Y, Babin, M. 2010. Overview of fluorescence protocols: theory, basic concepts, and practice. In: Chlorophyll-a fluorescence in aquatic sciences: methods and applications. *Developments in applied phycology*, 4: 31-74. Suggett DJ, Práil O, Borowitzka MA (eds.), Springer, Berlin.
- HyFLEX. 2013. *ESA's campaigns at work*. Último acceso: 13 de Marzo, 2014, de <http://blogs.esa.int/campaignearth/2012/09/06/hyflex-above-the-forest/>
- Joiner, J., Yoshida, Y., Vasilkov, A.P., Yoshida, Y., Corp, L.A., Middleton, E.M. 2011. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *Biogeosciences*, 8(3): 637-651. doi:10.5194/bg-8-637-2011
- Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., Hamazaki, T. 2009. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Applied Optics*, 48(35): 6716-6733. doi:10.1364/AO.48.006716
- Lorenzen, C.J. 1966. A method for the continuous measurement of *in vivo* chlorophyll concentration. *Deep Sea Research Oceanographic Abstract*, 13(2): 223-227. doi:10.1016/0011-7471(66)91102-8
- Maxwell, K., Johnson, G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345): 659-668. doi:10.1093/jexbot/51.345.659
- Meroni, M., Rossini, M., Guanter, L., Alonso, L., Rascher, U., Colombo, R., Moreno, J. 2009. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2037-2051. doi:10.1016/j.rse.2009.05.003
- Meroni, M., Busetto, L., Colombo, R., Guanter, L., Moreno, J., Verhoef, W. 2010. Performance of Spectral Fitting Methods for vegetation fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 114(2): 363-374. doi:10.1016/j.rse.2009.09.010

- Morel A, Prieur L. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 709-722. doi:10.4319/lo.1977.22.4.0709
- Neville, R.A., Gower, J.F.R. 1977. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll α fluorescence. *Journal Geophysical Research*, 82(24): 3487-3493. doi:10.1029/JC082i024p03487
- PARCS. 2013. *FLEX/S3 Tandem Mission Performance Analysis and Requirements Consolidation Study*. Último acceso: 13 de Marzo, 2014, de <http://ipl.uv.es/flex-parcs/index.php/news-a-press-1>
- Plascyk, J. 1975. The MKII Fraunhofer Line Discriminator (FLD-II) for airborne and orbital remote sensing of solar stimulated luminescence. *Optical Engineering*, 14(4): 339-346. doi:10.1117/12.7971842
- Plascyk, J., Grabriel, F. 1975. The Fraunhofer Line Discriminator MKII - an airborne instrument for precise and standardized ecological luminescence measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 24(4): 306-313. doi:10.1109/TIM.1975.4314448
- Rascher, U., Agati, G., Alonso, L., Cecchi, G., Champagne, S., Colombo, R., Zaldei, A. 2009. CEFLES2: the remote sensing component to quantify photosynthetic efficiency from the leaf to the region by measuring sun-induced fluorescence in the oxygen absorption bands. *Biogeosciences*, 6(7): 1181-1198. doi:10.5194/bg-6-1181-2009
- Van Der Tol, C., Verhoef, W., Timmermans, J., Verhoef, A., Su, Z. 2009. An integrated model of soil - canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences*, 6(12): 3109-3129. doi:10.5194/bg-6-3109-2009