

Situación Actual de la Estimación de la Fluorescencia Mediante Teledetección

Fluorescence retrieval from Remote Sensing

B. Franch y J. A. Sobrino
belen.franch@uv.es

*Global Change Unit. Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica.
Universitat de València.*

Polígono La Coma s/n, 46980 Paterna, València (SPAIN)

Recibido el 7 de enero de 2008 , aceptado el 2 de mayo de 2008

RESUMEN

En este artículo se presenta una breve descripción de los conceptos básicos de la fluorescencia. En primer lugar se introducen los factores que afectan a su emisión y deben considerarse para tener una medida precisa de la fluorescencia, tales como la temperatura o el estrés hídrico. Así mismo se hace una revisión de los métodos que permiten su medida mediante teledetección, con especial hincapié en el método FLD (Fraunhofer Line Discrimination). Finalmente se describen algunas experiencias realizadas en los últimos años por la comunidad científica con el objetivo de preparar el camino para la futura misión espacial dedicada a la estimación de este parámetro, como es la misión FLEX, cuya prefase A ha sido aprobada por la Agencia Espacial Europea (ESA).

PALABRAS CLAVE: fluorescencia, fotosíntesis, PRI, efecto Kautsky, método FLD.

ABSTRACT

In this paper a brief description of the basic concepts of fluorescence is presented. First of all we describe the fluorescence concept analyzing its origin. After that, we present some factors that affect the fluorescence emission and have to be taken into account for its precise retrieval, just as temperature and hydric stress. We have revised different methods to measure fluorescence from remote sensing, placing emphasis on the FLD (Fraunhofer Line Discrimination) method. Finally we describe some recent experiences developed by the scientific community with the aim of supporting the future spatial mission dedicated to estimate this parameter, the FLEX mission, whose prephase A has been approved by the European Spatial Agency (ESA).

KEYWORDS: fluorescence, photosynthesis, PRI, Kautsky effect, FLD method.

INTRODUCCIÓN

Cuando una planta recibe un flujo de luz, esta se distribuye en luz transmitida, reflejada y absorbida como se puede observar en la Figura 1. Esta última fracción de luz se invierte en la realización de la fotosíntesis, que es el proceso de convertir la energía solar incidente en energía química y almacenarla. La luz utilizada en la fotosíntesis se sitúa en la región del visible entre 400 y 700 nm y se denomina Ra-

diación fotosintética activa (Photosynthetic Active Radiation, PAR).

La energía lumínica que sobra al realizar la fotosíntesis es disipada por los cloroplastos (orgánulos en donde se realiza la fotosíntesis en las células vegetales) para protegerse de daños de dos formas diferentes. Por una parte emite la fluorescencia que es el proceso mediante el cual la energía lumínica es absorbida a una longitud de onda y es reemitida a una longitud de onda diferente debido a que los elec-

trones después de ser excitados vuelven al estado estacionario. La fluorescencia consiste por tanto en la reemisión de la radiación pero a más baja intensidad y con una longitud de onda mayor. Por otra parte, la planta libera calor, el cual es el mecanismo más importante de disipación de energía.

Debido a que estos procesos (fotosíntesis, fluorescencia y disipación de calor) ocurren en competición, la variación en la eficiencia de uno afecta a la eficiencia de los demás. Esta unión entre ellos justifica la utilización de la señal de fluorescencia para deducir la vitalidad del sistema fotosintético y por lo tanto para supervisar el estado hídrico (sequía) de la planta (Field *et al.*, 1994; Lichtentaler *et al.*, 1998 y Schreiber & Bilger, 1987). En la actualidad diversos estudios apuntan que la fluorescencia puede aportar información relevante en el estudio del ciclo del carbono y de ahí el gran interés por su obtención a escala planetaria mediante la teledetección desde satélite. Además, la fluorescencia contiene información que no incluye el NDVI¹ (Moya *et al.*, 2006), por lo que su conocimiento permitiría caracterizar mejor la vegetación.

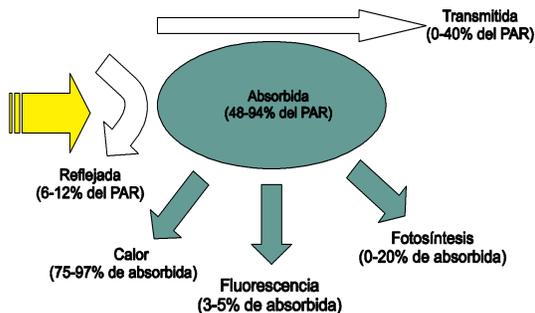


Figura 1. Esquema de la utilización del PAR por parte de la vegetación

La fluorescencia y la fotosíntesis están, en general, inversamente relacionados: la fluorescencia emitida es baja cuando la fotosíntesis es alta. En cambio la Fluorescencia puede decrecer cuando la fotosíntesis es baja debido a un mecanismo de protección consistente en un cierre de fotosistemas denominado “quenching”.

En la Figura 2 se muestra el espectro de emisión de una hoja en el laboratorio iluminada con luz ultravioleta (UV). Se observa claramente cómo el espectro de emisión de fluorescencia tiene cuatro picos ubicados en 440 nm (azul), 520 nm (verde), 690 nm (rojo) y 740 nm (infrarrojo).

¹ Normalized Difference Vegetation Index, es un índice de vegetación normalizado que se suele utilizar en teledetección e indica si el blanco observado contiene vegetación o no.

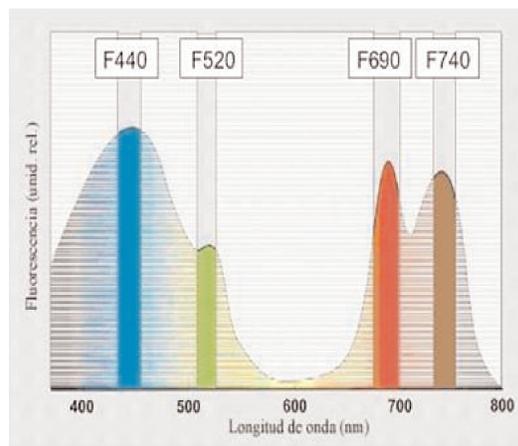
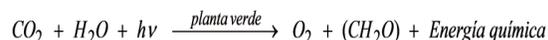


Figura 2. Ejemplo de un espectro de emisión de una hoja normal excitada con radiación UV. (Adaptada de Buschmann *et al.* 2002)

En cambio, cuando la hoja se ilumina con luz solar hay una pequeña proporción de luz UV lo que modifica el anterior espectro de emisión. En estas condiciones los picos azul y verde serán menores ya que sólo pueden ser excitados por luz UV. Sin embargo, los picos rojo e infrarrojo pueden ser excitados tanto por el visible como por el UV, por lo que estas serán las principales componentes de la emisión de fluorescencia en condiciones normales. A continuación vamos a analizar el significado y procedencia de estos picos de emisión.

ORIGEN DE LA FLUORESCENCIA

El proceso fotosintético consiste básicamente en una oxidación-reducción en la que los electrones del agua pasan al carbono del CO₂ liberando oxígeno en una reacción ayudada por la luz según la siguiente reacción.



Las moléculas que captan la energía luminosa para utilizarla durante el transporte de electrones se denominan *pigmentos fotosintéticos*. El principal pigmento fotosintético y, además, responsable de la emisión de la fluorescencia es la *clorofila a*. Este pigmento tiene dos máximos de absorción a 663 y 420 nm.

La emisión de fluorescencia aumenta cuando la intensidad con que se ilumina la planta sobrepasa la de saturación de la velocidad fotosintética, cuando disminuye la concentración de CO₂ o cuando se

aplican inhibidores de la fotosíntesis. Es como si la luz absorbida se pudiera utilizar en dos procesos distintos: fotosíntesis y fluorescencia. Algunas moléculas de *clorofila a* se disponen en parejas y en un entorno especial formando los complejos denominados P700 y el P680 ya que sus máximos de absorción son 700 y 680 nm respectivamente. El P700 es responsable de la emisión de fluorescencia a 740 nm y el P680 de la fluorescencia a 690 nm. Intercalados en el transporte de electrones que se produce en la fotosíntesis actúan como reductores potentes, es decir, capaces de ceder electrones.

Los pigmentos fotosintéticos se encuentran en los tilacoides (estructuras laminares en el interior de los cloroplastos) formando complejos con proteínas específicas. Los complejos responsables de la emisión de fluorescencia son:

- **Fotosistema II (PSII).** Es un complejo cuyo centro de reacción incluye clorofilas tipo P680 y por lo tanto es responsable de la emisión de fluorescencia en el pico rojo (F690).
- **Fotosistema I (PSI).** Es un complejo cuyo centro de reacción incluye clorofilas tipo P700 y por lo tanto es responsable de la emisión de fluorescencia en el pico infrarrojo (F740).

Se puede consultar el libro Barceló Coll *et al.* (2001) para mayor información en este campo.

VARIABLES QUE AFECTAN A LA EMISIÓN DE FLUORESCENCIA

A continuación vamos a presentar los principales parámetros que afectan a la emisión de fluorescencia clorofilica.

a) Actividad fotosintética

Como hemos visto en el apartado anterior, en general, la fluorescencia está inversamente relacionada con la realización de la fotosíntesis. En cambio, la evolución temporal de la fluorescencia cuando una hoja se ilumina después de estar cierto tiempo en oscuridad presenta un comportamiento característico que podemos observar en la Figura 3. Este comportamiento se denomina *efecto Kautsky* (Kautsky *et al.*, 1960).

Las distintas transiciones de la inducción reflejan el inicio de la fotosíntesis ya que afecta a la densidad de excitación dentro del Fotosistema II. Así, el nivel F_o que representa el momento en que se empieza a iluminar la planta (punto O de la Figura 5) se alcanza casi instantáneamente y es una medida de la distribución inicial de energía al Fotosistema II.

Dentro del PSII caben destacar dos agentes oxidantes que sirven de aceptores de electrones y que facilitan su transporte: la quinona fija (Q_A) y la quinona libre (Q_B). En condiciones normales todos los centros de reacción del Fotosistema están abiertos en F_o , es decir, todos los aceptores primarios, Q_A , están oxidados.

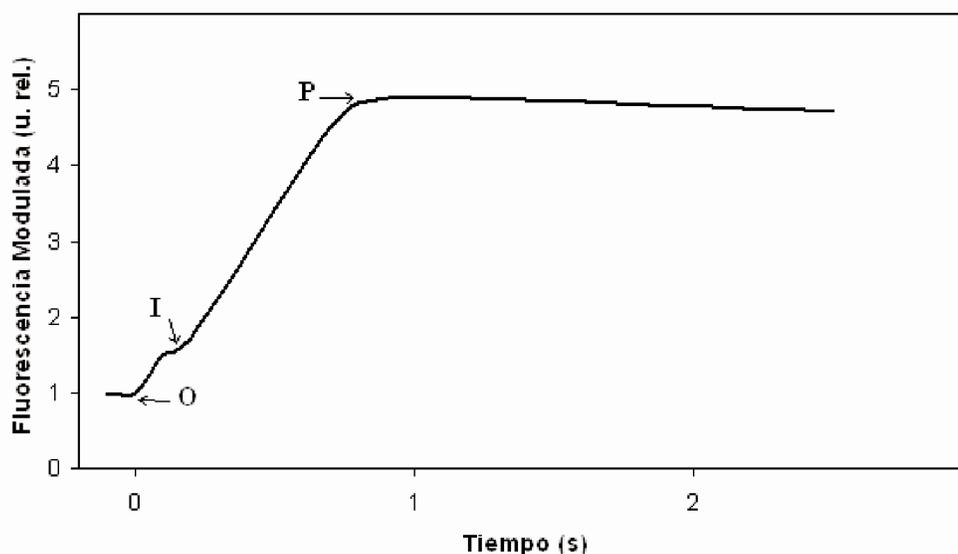


Figura 3. Efecto Kautsky.

El primer aumento de fluorescencia (O-I) es debido a la reducción de Q_A que está en equilibrio con el aceptor secundario Q_B . Éste debe coexistir con una completa oxidación de la plastoquinona (PQ), la cual es un compuesto de bajo peso molecular difusible en la membrana de los tilacoides. El siguiente aumento más pronunciado que el anterior (I-P) consiste en la reducción de la plastoquinona. Por lo tanto, este aumento desde el punto O al P, se atribuye a la saturación progresiva de los centros de reacción en el camino de la fotosíntesis. Cabe destacar que el aumento de la intensidad de fluorescencia en este rango, implica una disminución de la extinción de la fluorescencia por la fotosíntesis (*extinción fotoquímica o photochemical quenching, PQ*) con el tiempo de iluminación. La disminución de la fluorescencia a partir del punto P refleja la activación por la luz de la capacidad del transporte de electrones al Fotosistema I así como el desarrollo de numerosos procesos de extinción de fluorescencia. Esta disminución de la fluorescencia se denomina *extinción no fotoquímica (non-photochemical quenching, NPQ)*. Esto se debe a un mecanismo de protección de la planta para evitar los daños. Los procesos que conducen a la extinción no fotoquímica se denominan a menudo como fotoinhibición (Becker *et al.*).

b) Estrés hídrico

Debido a que la variación en la fluorescencia puede detectarse mucho antes que las hojas estén cloróticas (el tejido de las plantas se amarillea o emblanquece al disminuir el contenido de clorofila debido a enfermedad o deficiencia en alimento) la utilización de la fluorescencia para medir el estrés hídrico de la planta es una técnica rápida. Además es no destructiva y no invasiva, por lo que se utiliza normalmente para investigar el estrés de diferentes poblaciones (Zarco-Tejada *et al.*, 2000).

c) Temperatura

Generalmente la fluorescencia crece cuando disminuye la temperatura. La fluorescencia de la clorofila presenta bandas adicionales cuando la temperatura baja de 0 °C. Además a temperatura ambiente la fluorescencia del azul-verde disminuye fuertemente (Buschmann *et al.*, 2002). En la actualidad se están realizando diversas campañas de medida para poder estudiar esta dependencia. Por ejemplo, a partir de los datos obtenidos en la campaña SEN2FLEX en Barrax (2005) se pudo observar una buena correla-

ción entre ambos parámetros para el caso del trigo (Sobrino *et al.*, 2007).

d) Penetración de la luz incidente

Para poder tener emisión de fluorescencia la luz debe penetrar en la hoja hasta ser absorbida. Como la hoja es un complejo sistema óptico en que las células causan dispersión, la emisión de fluorescencia depende de la distribución de las sustancias que absorben la luz a lo largo de esta. Por ejemplo, las plantas en invernadero emiten más fluorescencia al ser iluminadas con luz UV que las del exterior ya que estas últimas acumulan sustancias en la epidermis que absorben radiación UV (Buschmann *et al.*, 2002).

e) Reabsorción de la fluorescencia

Cuando la fluorescencia es emitida, esta puede sufrir absorciones en el interior de la hoja hasta llegar al exterior. Las absorciones dependerán de la longitud de onda de la fluorescencia. Así, la emisión de fluorescencia en la zona azul del espectro es atenuada debido a su absorción por parte de los carotenoides y la clorofila, y la fluorescencia en la zona roja es absorbida en mayor proporción que la infrarroja por la clorofila. En consecuencia, se suele utilizar el ratio entre las dos para medir la variación del contenido de clorofila ya que éste disminuye con el aumento de la clorofila (Buschmann *et al.*, 2002).

PHOTOCHEMICAL REFLECTANCE INDEX (PRI)

Hasta ahora hemos visto cómo la fluorescencia está directamente ligada a la fotosíntesis, pero comparado con la reflectividad de las plantas, la señal es de menor intensidad. En la búsqueda de un parámetro capaz de caracterizar la vegetación, incluyendo sus propiedades fotosintéticas, se ha propuesto el PRI (Photochemical Reflectance Index):

$$PRI = \frac{R_{570} - R_{530}}{R_{570} + R_{530}} \quad (1)$$

donde R_i es la reflectividad en la longitud de onda i . El PRI se utiliza como indicador de los cambios en los pigmentos del ciclo de la xantofila ya que cuando esto ocurre, la reflectividad en torno a los 530 nm cambia.

Para tener en cuenta estas variaciones en la reflectividad en la definición de PRI, la señal de reflectividad a 530 nm se expresa relativa a una longitud de onda de referencia y en general se utiliza la reflectividad a 570 nm. El cambio en el ciclo de la xantofila se produce cuando las hojas absorben más luz de la que pueden utilizar en la fotosíntesis. Las xantofilas forman parte de los llamados carotenoides, los cuales son pigmentos fotosintéticos que tienen un máximo de absorción entre 450 y 490 nm y otros menores en las zonas cercanas, mostrando un color entre amarillo y naranja. Sirven para utilizar la energía luminosa poco absorbida por la clorofila y además tienen un papel protector contra la fotodestrucción de las clorofilas.

El PRI varía junto al cambio en la eficiencia fotosintética² (LUE, Light-Use Efficiency) y además es uno de los pocos índices capaz de reproducir cambios rápidos en la actividad fotosintética (Guanter *et al.*, 2006). Para analizar la relación entre el PRI y el LUE se realizó un experimento en los bosques boreales en Siberia a lo largo de la transición de invierno a primavera en el año 2000 (Nichol *et al.*, 2002). En esta transición los árboles se encuentran en una situación de estrés debido a las extremas temperaturas (desde -20 °C a 35 °C). En consecuencia, la actividad fotosintética se bloquea pero las hojas deben mantener la capacidad de realizar la fotosíntesis cuando vuelven las condiciones favorables. Al representar el PRI a lo largo de los meses desde mayo a junio se observó que disminuye, en cambio el LUE tenía un comportamiento contrario (aumenta). El NDVI además también aumenta (debido a la presencia de hierba o nuevas vegetaciones durante la primavera). Al representar el PRI frente LUE se observó que cuando el LUE aumenta el PRI disminuye con un coeficiente de correlación de 0.64. Esta dependencia varía en función del bosque (Nichol *et al.*, 2002).

En cambio, el PRI es muy sensible a factores como la estructura del cultivo, el LAI (Leaf Area Index) o el LAD (Leaf Angle Distribution) por lo que la utilización de este índice en medidas a grandes distancias puede ser problemático (Barton *et al.*, 2001).

² Proporción de la energía solar recibida que es convertida en material vegetal

MEDIDA A DISTANCIA DE LA FLUORESCENCIA. EL MÉTODO FLD.

En la actualidad la medida de la fluorescencia a escala global mediante teledetección está cobrando un gran interés en la comunidad científica debido a su posible conexión con el ciclo de carbono. Bajo iluminación natural la fluorescencia emitida por una hoja es muy difícil de detectar a distancia debido a que su señal queda enmascarada por la luz reflejada.

En consecuencia, es necesario utilizar algunas bandas de absorción del espectro solar, o también denominadas *líneas de Fraunhofer*, en la zona del infrarrojo cercano (ya que es donde se sitúan los picos de emisión de la fluorescencia). En este intervalo la irradiancia solar presenta tres bandas de absorción principales como se puede observar en la Figura 4, la línea H α a 656 nm debida a la absorción del hidrógeno en la atmósfera solar y las bandas a 687 (banda oxígeno-B) y 760 nm (banda oxígeno-A) que son debidas a la absorción molecular del oxígeno en la atmósfera terrestre.

Las mejores bandas de absorción en el contexto de la medida de fluorescencia mediante teledetección son las del oxígeno ya que la línea H α se encuentra alejada del máximo de la emisión de fluorescencia. Respecto a estas dos bandas, si por una parte tenemos en cuenta la reflectividad de la planta, a 760 nm es entre 5-10 veces mayor que a 656 ó 687 nm, por lo que la señal de fluorescencia estará más enmascarada por la reflectividad a 760 nm, y la mejor banda de absorción sería la del oxígeno-B. En cambio, la profundidad de absorción de la banda oxígeno-A (760 nm) es más profunda y más ancha que la de oxígeno-B y, aunque no coincide exactamente con el pico de emisión de la fluorescencia, podemos concluir que la mejor banda para estudiar la fluorescencia a distancia es la banda oxígeno-A. (Moya *et al.*, 2004)

El método de las líneas de Fraunhofer (FLD iniciales en inglés de Fraunhofer Line Discrimination) se basa en la utilización de las líneas de Fraunhofer o sus proximidades para poder estimar la fluorescencia emitida. Para ello se realiza una comparación entre la radiancia de un panel de referencia con la radiancia reflejada por la vegetación en iguales condiciones de iluminación. La fluorescencia, como podemos comprobar en la Figura 5, será la diferencia entre la profundidad de la banda de absorción de la irradiancia solar para un blanco de referencia sin

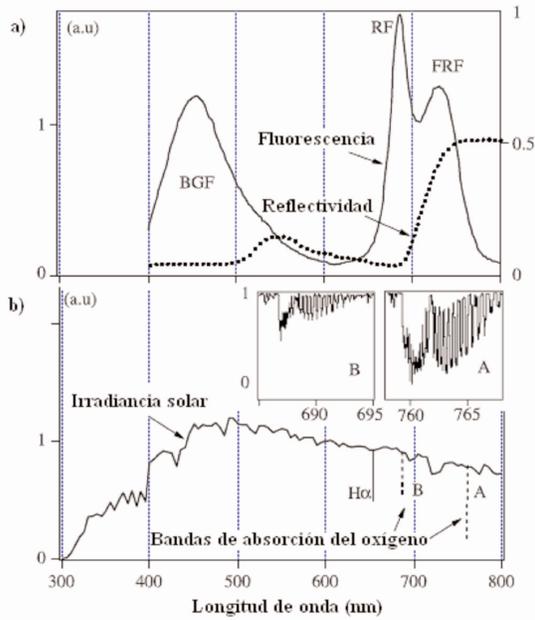


Figura 4. a) Reflectividad (línea de puntos) y Fluorescencia (línea continua) en unidades arbitrarias de una hoja de vid excitada a 355 nm. **b)** Irradiancia solar a nivel de mar. Las líneas de puntos indican las bandas de absorción del oxígeno y la línea continua la del hidrógeno. (Adaptada de Moya *et al.*, 2004)

emisión de fluorescencia (a-b) con la profundidad correspondiente a la vegetación que contiene la contribución de la fluorescencia y, por lo tanto, es menos profunda (c-d). Considerando que la reflectividad es:

$$R = \frac{c-d}{a-b} \text{ y que } d = R \cdot b + f$$

la fluorescencia se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$f = \frac{a \cdot d - c \cdot b}{a - b} \quad (2)$$

Para llegar a esta expresión, el método FLD considera que tanto la reflectividad como la fluorescencia dentro y fuera de la banda de absorción permanecen constantes (Moya *et al.*, 2004; Plascyk, 1975; Plascyk & Gabriel, 1975). Meroni *et al.* (2006) muestra que esta aproximación no es correcta, especialmente a 687 nm. Así, la radiancia que proviene de una muestra iluminada que emite fluorescencia, L^s , tiene las siguientes contribuciones:

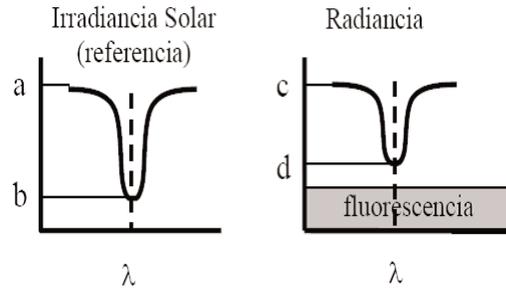


Figura 5. Representación del método FLD. La línea de absorción del oxígeno de un sistema no fotosintético (figura de la izquierda) es rellenada por la emisión de fluorescencia de la vegetación. (Adaptada de Guanter *et al.*, 2006)

$$L^s(\lambda) = \rho(\lambda)L^i(\lambda) + F(\lambda) \quad (3)$$

donde ρ es la reflectividad (libre de la componente de emisión), L^i es la radiancia incidente en la muestra y F es la fluorescencia. A partir de esta ecuación se puede formar un sistema lineal de dos ecuaciones, la primera considerará la señal medida dentro de la línea de Fraunhofer, es decir, a 760 nm en el caso del oxígeno-A y a 687 nm en el caso del oxígeno-B, y la segunda considera la señal medida en una banda próxima que contendrá la irradiancia solar de fondo del conjunto y que se situará al borde de la línea. Considerando que el flujo de fluorescencia y la reflectividad permanecen constantes en las longitudes de onda involucradas (la misma suposición que el método FLD) podemos deducir la emisión de fluorescencia a partir del siguiente sistema lineal (Meroni *et al.*, 2006).

$$\left. \begin{aligned} L^{s \text{ int linea}} &= b_1 L^{i \text{ int linea}} + b_0 \\ L^{s \text{ ext linea}} &= b_1 L^{i \text{ ext linea}} + b_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

En esta ecuación, la pendiente b_1 y la ordenada en el origen b_0 serán respectivamente la reflectividad y la fluorescencia en el intervalo espectral de la línea de Fraunhofer elegida.

Si se utiliza un espectroradiómetro, se puede formar un sistema de un mayor número de ecuaciones con la ventaja de tener menor error debido al ruido del instrumento. Así, se podrá utilizar el rango espectral 686.5-690.0 nm para la banda de 687 nm y el rango

759.0-764.0 nm para la banda de 670 nm. Como hemos comentado antes, este modelo en que se supone que la reflectividad y la fluorescencia son constantes en las dos longitudes de onda próximas involucradas, funciona bastante bien a 760 nm pero no tanto a 687 nm ya que en esta longitud de onda la reflectividad varía considerablemente. En consecuencia, se propone la suposición de aproximación lineal de la reflectividad y la fluorescencia (Meroni *et al.*, 2006) de acuerdo a

$$\begin{aligned} L^s(\lambda_0 + \Delta\lambda) &= \\ &= \left[\rho(\lambda_0) + \frac{d\rho}{d\lambda} \Delta\lambda \right] \cdot L^i + F(\lambda_0) + \frac{dF}{d\lambda} \Delta\lambda = \quad (5) \\ &= [b_2 + b_3 \cdot \Delta\lambda] \cdot L^i + b_0 + b_1 \cdot \Delta\lambda \end{aligned}$$

donde λ_0 es la menor longitud de onda en el borde de la línea de absorción dentro del rango espectral considerado. Este método, más complejo que el anterior, supone una resolución por el método de mínimos cuadrados. En la actualidad se sigue investigando en esta línea para conseguir la máxima precisión posible de la señal de fluorescencia.

CAMPAÑAS Y MISIONES RELACIONADAS CON LA MEDIDA DE LA FLUORESCENCIA

Para detectar la fluorescencia pasiva a nivel de la hoja o desde plataformas espaciales se utilizan instrumentos avanzados que detectan la señal en unas pocas y seleccionadas longitudes de onda utilizando filtros interferenciales y detectores con fotodiodos (Moya *et al.*, 2004) o sistemas basados en fluorescencia inducida. A continuación describimos algunas de las experiencias relacionadas con la medida de la fluorescencia.

SIFLEX (Solar Induced and Fluorescence Experiment).

La campaña SIFLEX tuvo lugar en los bosques boreales de Sodankylä (norte de Finlandia; 26°38' E, 67°22' N). El período de la campaña (entre el 23 Abril y el 10 Junio de 2002) cubrió la recuperación de los pinos de la inactividad del invierno al estado completamente activo del verano de la fotosíntesis. Los principales objetivos de la misión fueron la medida pasiva de la fluorescencia (F_{pas}) en las líneas de absorción del oxígeno A y B, la realización de medidas complementarias que permitan mejor inter-

pretación de la F_{pas} tales como irradiancia solar y reflectividad, y finalmente poner a disposición de la comunidad científica una base de datos de flujos de CO₂ para poder estudiar la posible relación entre indicadores de la fotosíntesis (como la fluorescencia o el PRI) y el CO₂.

La campaña SIFLEX se considera como un gran avance ya que por primera vez se pudo medir la fluorescencia a nivel de campo a lo largo de un gran período de tiempo y además de forma simultánea a medidas relacionadas con la radiación o con medidas de flujos de CO₂, siendo un buen argumento para seguir investigando la fluorescencia. Gracias a esta campaña se ganó experiencia en la caracterización de bosques boreales para estudios de teledetección y se recogió una base de datos de más de 1 Gigabyte (Davidson *et al.*, 2002).

SEN2FLEX (SENTinel-2 and Fluorescence Experiment).

SEN2FLEX (Moreno, 2006a) tuvo lugar durante Junio y Julio de 2005 sobre un área agrícola de Barrax (Albacete, España; 39°3' N, 2°6' W, 700m). Se trata de un terreno llano con un clima Mediterráneo. Cerca del 65% de las tierras cultivadas en Barrax son de secano, compuestas por un 67% de cereales de invierno y un 33% de barbecho, y en torno al 35% son de regadío, de los cuales el 75% es maíz, 15% cebada/girasol, 5% alfalfa y 5% cebollas y vegetales. Tres estaciones agro-meteorológicas fueron situadas en el área del estudio (Moreno *et al.*, 2001).

Los principales objetivos de esta campaña fueron: proporcionar los primeros datos del sensor aéreo AIRFLEX (Moya *et al.*, 2006) para realizar medidas de fluorescencia; simular datos y productos derivados para la misión GMES Sentinel-2 (Global monitoring for environment and security) y finalmente, derivar indicadores útiles y las herramientas necesarias para monitorizar recursos hídricos y para ayudar en la mejora del suministro de agua en el contexto del EU Water Framework Directive (legislación del parlamento europeo sobre las aguas). A parte de estos tres principales objetivos, la campaña SEN2FLEX sirvió también como validación de datos de satélite y productos derivados, particularmente de los satélites MERIS y CHRIS.

Durante esta campaña, además de las medidas del sensor AIRFLEX también se realizaron medidas con los sensores aéreos AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) (Rejas *et al.*, 2005) para disponer de esta forma de datos en la región térmica del espectro y

obtener así mapas de temperatura y CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) (Itres Research Ltd., 2006) en el modo de alta resolución espectral, permitiendo de esta forma obtener mapas de fluorescencia en la banda de absorción del oxígeno-A (760 nm) para poder ser comparados con los datos de AIRFLEX.

SEN2FLEX es la primera campaña en que se proporcionan datos aéreos de medidas de fluorescencia por lo que los objetivos se centraron en entender las variaciones de la señal de fluorescencia y la demostración de la repetitividad de las medidas. Un resultado relevante fue la reproducción del mismo patrón espacial a partir de vuelos consecutivos a lo largo de distintos días. Una vez demostrada la repetitividad del patrón espacial de fluorescencia, también se estudió la variación de la señal a lo largo del día mediante vuelos realizados sobre la misma línea de vuelo y a la misma altura pero a diferentes horas del día. Asimismo el uso de los datos CASI permitió la comparación directa entre mapas de fluorescencia y mapas de otros indicadores fisiológicos como el PRI.

CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2).

La campaña CEFLES2 (CarboEurope, FLEX and Sentinel-2) se desarrolló en la región de Francia de Les Landes en los periodos de abril, junio y septiembre de 2007. Se centra en varios tipos de paisajes, incluyendo zona urbana, zona agrícola y zonas forestales. Es una campaña que combina diversas actividades en apoyo a los proyectos CERES (CarboEurope Regional Experiment), FLEX (FLuorescence EXperiment) y Sentinel-2.

Los principales objetivos han sido: medir la fluorescencia sobre distintos blancos, sobre todo sobre vegetación natural, para determinar niveles de señal de referencia y variabilidad relativa; integrar medidas aéreas y medidas in situ para proporcionar respuestas fotosintéticas bien calibradas a la luz, temperatura y otras variables y, finalmente, analizar el papel de la detección de la fluorescencia y definir técnicas de observación espaciales y requisitos cuantitativos en términos de la medida de fluorescencia efectiva.

Al igual que en la campaña SEN2FLEX en esta campaña se realizaron medidas con los sensores aéreos AIRFLEX y AHS, en cambio el sensor CASI fue sustituido por el sensor HYPER. Este es un sensor espectral de barrido de 512+256 bandas con la posibilidad de captar imágenes en el visible y pró-

ximo infrarrojo (visible and near-infrared, VNIR) y en el infrarrojo de onda corta (short-wavelength infrared, SWIR). En la actualidad se están procesando los datos obtenidos durante esta campaña.

FLEX (FLuorescence EXperiment)

La misión FLEX (Moreno, 2006b) se propone con la finalidad de lanzar un satélite capaz de observar a nivel global la fotosíntesis a través de la medida de la fluorescencia mediante un espectrómetro de muy alta resolución espectral que permita desacoplar la débil señal de fluorescencia de la luz reflejada de fondo. Este satélite llevará instalados tres instrumentos principales centrados cada uno de ellos en la medida de la fluorescencia en las líneas de Fraunhofer, la reflectividad en la región espectral entre 450 nm y 1000 nm y la temperatura de los cultivos. La misión FLEX se encuentra actualmente en prefase A dentro del programa Earth Explorer de la ESA (European Space Agency).

CONCLUSIÓN

En la actualidad la medida de la fluorescencia está adquiriendo una gran importancia a nivel científico debido principalmente a su posible relación con el ciclo de carbono. Numerosos experimentos se han desarrollado en los últimos años con el objetivo de estimar este parámetro. El presente trabajo muestra el papel que puede jugar la teledetección para la estimación de la fluorescencia a nivel global. Una prueba de ello es la aprobación de la prefase A de la misión FLEX por parte de la ESA, lo que está impulsando a la investigación de métodos para su obtención con la máxima precisión, así como su relación con el flujo de CO₂.

REFERENCIAS

- BARCELÓ COLL J., NICOLÁS RODRIGO G., SABATER GRACÍA B., SÁNCHEZ TAMÉS R. 2001, *Fisiología vegetal*, Ediciones Pirámide (Grupo Anaya, S. A.)
- BARTON and NORTH 2001, Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index - Model and sensitivity analysis, *Remote Sens. Environ.*, Vol. 78, pp.: 264-273.
- BECKER W., BERGMANN A., BISCOTTI G., BECKER & HICKL GMBH, *Recording the*

- Kautsky Effect by Fluorescence Lifetime Detection*, Disponible en www.beckerhickl.com
- BUSCHMANN C. (2002), *Interpretation of the Fluorescence Signature from Vegetation*, FLEX Workshop, 19-20 June 2002
- FIELD C.B., GAMON J.A. and PEÑUELAS J. (1994), *Remote sensing of terrestrial photosynthesis*. In: E.-D. Schulze and M.M. Caldwell, Editors, *Ecophysiology of photosynthesis*, Ecological studies Vol. 100, Springer-Verlag, Berlin, pp. 511–527.
- GUANTER L., GÓMEZ-CHOVA L., ALONSO L., AMORÓS J., VILA J., MORENO J. (2006), *Estimation of solar-induced vegetation fluorescence from remote sensing data acquired during the SEN2FLEX campaign*. Oral presentation at the SENTinel-2 and FLuorescence EXperiment (SEN2FLEX) Workshop, 30-31 October 2006, ESA-ESTEC Noordwijk (The Netherlands).
- ITRES RESEARCH LTD. (2006). URL: http://www.itres.com/CASI_1500
- KAUTSKY, H., APEL, W. and AMANN, H. (1960), *Chlorophyllfluoreszenz und Kohlensauresimilation*. *Biochemische zeitschrift*, 322, 277–292
- LICHTENTALER H.K., WENZEL O., BUSCHMANN C. and GITELSON A.A. (1998), *Plant stress detection by reflectance and fluorescence*, *Annals of the New York Academy of Sciences* 851, pp. 271–285.
- MERONI M., COLOMBO R. (2006). *Leaf level detection of solar induced chlorophyll fluorescence by means of a subnanometer resolution spectroradiometer*. *Remote Sensing of Environment*, Volume 103, Issue 4, 30 August 2006, Pages 438-448
- MOYA I., CAMENEN L., EVAÏN S., GOULAS Y., CEROVIC Z.G., LATOUCHE G., FLEXAS J., OUNIS A. (2004), *A new instrument for passive remote sensing. 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence*, *Remote Sensing of Environment*, (Vol. 91) (No. 2) 186-197
- MOYA I., DUMARD, F., MOISE N., OUNIS A., GOULAS Y. (2006), *First airborne multiwavelength passive chlorophyll fluorescence measurements over La Mancha (Spain) fields*. Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, 25-29 September 2006, Torrent, Spain
- MORENO J. (2006a), *SEN2FLEX campaign overview*. Proceedings of the SEN2FLEX Workshop, ser. WPP, vol. 271. ESA/ESTEC, 30-31 Oct 2006.
- MORENO J. (2006b), *Fluorescence Explorer (FLEX): mapping vegetation photosynthesis from space*. Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, RAQRS'II, J. A. Sobrino, Ed. Universitat de Valencia, 25-29 Sep 2006, pp. 832–837.
- NICHOL C.J., LLOYD J., SHIBISTOVA O., ARNETH A., ROSER C., KNOLL A., MATSUBARA A., GRACE J. (2002), *Remote sensing of photosynthetic-light-use efficiency of Siberian boreal forest*, *Tellus B* 54 (5), 677–687
- PÉREZ PRIEGO O. (2004), *Detección de estrés hídrico en olivar mediante fluorescencia clorofílica, métodos de espectroscopia y teledetección térmica*, Tesina
- 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.
- PLASCYK, J. and GABRIEL, F. (1975), *The Fraunhofer Line Discriminator MKII - an airborne instrument for precise and standardized ecological luminescence measurements*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 24, 306–313.
- REJAS J.G., PRADO E., JIMÉNEZ M., FERNÁNDEZ-RENAU A., GÓMEZ J.A., DE MIGUEL E. (2005) *Caracterización del sensor hiperespectral AHS para la georreferenciación directa de imágenes a partir de un sistema inercial GPS/IMU*. *Mapping*, ISSN 1131-9100, 103, 18-25.
- SCHREIBER U. and BILGER W. (1987), *Rapid assessment of stress effects on plant leaves by chlorophyll fluorescence measurements*. In: J.D. Tenhunen, F.M. Catarino, O.L. Lange and W.C. Oechel, Editors, *Plant response to stress—Functional analysis in mediterranean ecosystems*. NATO Advanced Science Institute Series, Springer, Berlin, pp. 27–53
- SOBRINO J. A., SÓRIA G., JIMENEZ-MUÑOZ J. C., FRANCH B., HIDALGO V., SEPULCRE-CANTÓ G., ZARCO-TEJADA P. J., MORENO J., and MOYA I. (2007), *Surface temperature in the context of FLuorescence*, in *IEEE International Geoscience and Re-*

- remote Sensing Symposium (IGARSS), 23-27 July 2007, Barcelona, Spain.
- ZARCO-TEJADA P.J., MILLER J.R., MOHAMMED G.H., NOLAND T.L. and SAMPSON P.H. (2000), *Chlorophyll Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance: II. Laboratory and Airborne Canopy-Level Measurements with Hyperspectral Data*, Remote Sensing of Environment, Volume 74, Number 3, December 2000, pp. 596-608(13)
- DAVIDSON M., MOYA I., OUNIS A., LOUIS J.M. DUCRET, MORENO J., CASSELLES V., SOBRINO J., ALONSO L., PEDROS R. JIMENEZ J.C., GOMEZ J.L., SORIA G., NICLOS R., EL-KHARRAZ, MARTINEZ-LOZANO J.A., UTRILLAS M.P., MILLER J., TAURILLA T., THUM T. (2002), *The solar induced fluorescence experiment (SIFLEX-2002): Campaign Overview*, Flex Workshop 19-20 June 2002 The Netherlands.