

ESTIMACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD FOLIAR A PARTIR DE MEDIDAS DE LA SIGNATURA DIRECCIONAL HOT SPOT

F. Camacho-de Coca(*), M. Leroy (**), F. J. García-Haro (*), M. A. Gilabert (*) y J. Meliá (*)

Fernando.Camacho@uv.es

(*) *Departament de Termodinàmica. Universitat de València
C/ Doctor Moliner, 50. 46100 Burjassot. España.*

(**) *Médias-France
18 av. Edouard Belin-CNES Bpi 2102. 31401 Toulouse. France.*

RESUMEN

La signatura direccional hot spot de diferents cultius ha sigut obtinguda utilitzant dades POLDER i HyMAP adquirides durant la campanya DAISEX'99 de l'ESA. Les signatures direccionals s'han ajustat a una funció de l'angle de fase ($RMS < 0.05$) deducida de la transferència radiativa en cobertes vegetals homogènies. La inversió de la signatura direccional ha permès estimar la semianchura i l'amplitud del hot spot, la qual està directament relacionada amb la reflectivitat foliar. D'aquesta manera hem pogut estimar la reflectivitat foliar a partir del hot spot utilitzant mesures obtingudes amb dos instruments de característiques diferents. Els resultats han demostrat que la reflectivitat foliar pot ser estimada a partir de l'amplitud del hot spot, mostrant una bona coincidència amb mesures de laboratori. La comparació de HyMAP (resolució direccional de 0.078°) amb POLDER (resolució direccional de 0.3°) ha demostrat que la resolució de POLDER és adequada per mesurar la signatura direccional hot spot, confirmant el potencial del POLDER2 per estimar la reflectivitat foliar des del satèl·lit.

ABSTRACT

The hot spot directional signature has been obtained over several agricultural crops using POLDER and HyMAP data acquired during the DAISEX'99 campaign of the ESA. These directional signatures have been fitted to a function of the phase angle ($RMS < 0.05$), which was derived from the leaf canopies radiative transfer. The inversion of the hot spot directional signature has allowed to estimate the half width and the amplitude of the hot spot. The amplitude of the hot spot is related to the leaf reflectance. In this work, leaf reflectance has been estimated from the hot spot measurements using two different instruments. Results show that the leaf reflectance can be retrieved from the hot spot amplitude, showing good agreement with laboratory measurements. In addition, the comparison between HyMAP (0.078° directional resolution) and POLDER (0.03° directional resolution) shows that the POLDER directional resolution is good enough to reproduce properly the hot spot directional signature. It confirms the potentiality of POLDER2 to estimate leaf reflectance from space.

Palabras claves: Hot Spot, Reflectivitat foliar, HyMAP, POLDER

INTRODUCCIÓN

El efecto hot spot contiene información relativa a la microescala de la cubierta vegetal. Este efecto, observado por primera vez por Seelinger (1887), se produce cuando el ángulo de fase (ángulo que subtenden la dirección de la fuente y la del observador) tiende a cero, y constituye una signatura direccional fina de las superficies. Este efecto ha suscitado el interés de la comunidad científica por sus posibles aplicaciones al estudio de la cubierta vegetal desde el espacio. Diferentes modelos y estudios de campo han evidenciado que la amplitud y la anchura del hot spot contiene información relacionada con la arquitectura de la cubierta (Qin y Goel, 1995). En general, el hot spot es un fenómeno relacionado con el recorrido libre medio de un fotón

en el interior de la cubierta vegetal. Por tanto, se comprende fácilmente que este efecto se modele utilizando parámetros estructurales tales como el LAI, la altura o la dimensión foliar. Bréon *et alii.*, (2002) encuentran que la amplitud del hot spot nos permite acceder a la reflectividad de las hojas y, por tanto, a sus constituyentes bioquímicos. Sin embargo, y a pesar de su interés, son todavía muy escasas las medidas experimentales del hot spot. En medidas de laboratorio o de campo el hot spot está afectado por la propia sombra del sensor, si bien los sensores aerotransportados ya han mostrado su utilidad para registrar este efecto. Desde el espacio, la medida del hot spot es ciertamente difícil ya que la mayoría de los satélites en órbita polar adquieren

las medias fuera del Plano Principal, por lo que no pueden registrar el efecto hot spot. Sin embargo, el concepto óptico del POLDER ha permitido registrar el hot spot desde el espacio (Bréon *et alii.*, 2002).

Durante la campaña DAISEX (*Digital Airborne Experiment*) de la ESA (ESA, 2001) se puso especial interés en obtener el efecto hot spot. Este efecto fue registrado por dos sensores diferentes, el POLDER (*Polarization and Directionality of Earth's Reflectance*) y el HyMAP (*Hyperspectral Mapping*), dos conceptos diferentes de radiómetros. Nuestro objetivo ha sido obtener la signatura direccional del hot spot, y evaluar sus posibles aplicaciones en teledetección. En concreto, discutiremos la estimación de la reflectividad foliar a partir de la signatura direccional hot spot.

METODOLOGÍA

La experiencia DAISEX tuvo lugar los años 1998, 1999 y 2000 sobre un área experimental de cultivos de 3x3 km localizada en Barrax (Albacete). En el año 1999 se adquirieron imágenes con los sensores POLDER y HyMAP entre otros. La descripción completa de la experiencia DAISEX se puede encontrar en ESA (2001).

POLDER es un sensor multiespectral (9 canales entre 443 y 864 nm), de gran FOV (hasta 114° en la diagonal) y con una resolución espacial de 20 m. En cada vuelo, el sensor registra una secuencia de alrededor 140 imágenes (1 imagen cada 10 s). Cada una de las imágenes tiene asociada una geometría de adquisición en función de la posición del avión. Así, para cada píxel tenemos un conjunto de entre 30-60 observaciones con distinta geometría. Se realizaron 4 vuelos, en dos de los cuales se obtuvo el hot spot (aquellos en los que el ángulo cenital solar fue menor que 1/2FOV). Una descripción detallada de los datos POLDER en la campaña DAISEX, así como de la reconstrucción de la BRDF se puede encontrar en Camacho-de Coca *et alii.*, (2003).

HyMAP, es un sensor hiperespectral (128 canales entre 400 nm y 2500 nm), que muestrea la superficie perpendicular a la dirección de vuelo. El FOV del HyMAP es de 60.3° y la resolución espacial de 5 m. Por tanto, para registrar el hot spot, el ángulo cenital solar debe ser inferior a 30.15°, y el avión debe volar en el Plano Ortogonal. El vuelo realizado a las 12h (ángulo cenital solar de 16.8°) en la dirección Este-Oeste, verificaba esta condición con un azimut relativo inferior a 1°. Este vuelo fue simultáneo a un vuelo POLDER, por lo que además podemos comparar la signatura hot spot y la reflectividad foliar estimada con ambos

instrumentos, algo totalmente novedoso hasta la fecha.

Para un píxel determinado, una secuencia POLDER nos permite reconstruir la BRDF y la Signatura Direccional con una resolución angular no inferior a 5°. Esta resolución no es suficiente para obtener el hot spot por lo que debemos de asumir otro principio de medida. Éste se basa en la homogeneidad espacial de la muestra. Si esta suposición se cumple, entonces la variabilidad de la reflectividad con el ángulo de observación debe considerarse como una signatura direccional de la superficie, y la resolución direccional se aumenta hasta 0.3° entre píxeles contiguos. Para reducir los efectos de la heterogeneidad de la escena deberá realizarse una corrección de la heterogeneidad espacial. Una vez identificados los píxeles que satisfacen la condición del hot spot, obtenemos la reflectividad de una ventana centrada en el hot spot (el máximo tamaño de la ventana utilizado ha sido de 7x7 píxeles). El desplazamiento de un píxel implica un cambio de 0.3° en el ángulo de fase. Diferentes imágenes POLDER servirán para incrementar el muestreo de la signatura direccional. De los datos POLDER solamente hemos procesado 4 canales espectrales: 443, 550, 670 y 800 nm. En total se han identificado 79 hot spots en 2 vuelos donde se satisfacía la condición del hot spot. Finalmente 24 muestras pertenecientes a parcelas homogéneas fueron seleccionadas para el análisis (coeficiente de variabilidad < 10%). En este trabajo solamente mostramos los resultados POLDER correspondientes al vuelo coincidente con HyMAP. El análisis detallado de la signatura direccional hot spot obtenida con datos POLDER se puede consultar en Camacho-de Coca *et alii.*, (2002). Nótese que la localización del hot spot se desplaza unos 250 m desde la primera hasta la última banda, por lo que no siempre podremos tener la signatura direccional en los 4 canales estudiados. Posteriormente, realizamos una corrección simple de la heterogeneidad restando la desviación de la reflectividad media cerca del nadir de la signatura direccional. Los hot spots obtenidos con POLDER en el vuelo del mediodía son 12, a los que tenemos que añadir las 3 signaturas hot spot obtenidas simultáneamente con HyMAP.

Finalmente, la signatura direccional del hot spot se ajusta a la ecuación propuesta por Bréon *et alii.*, (2002), derivada de modelar la transferencia radiativa en el interior de cubiertas vegetales considerando el efecto hot spot, y que se escribe como:

$$R = \frac{\Delta R_{HS}}{1 + \xi/\xi_0} + b\xi + c \quad (1)$$

donde ΔR_{HS} es la amplitud del hot spot, ξ el ángulo de fase y ξ_0 es la semianchura del hot spot relacionada con parámetros estructurales (LAI, altura y dimensión de la hoja) de la cubierta. La amplitud se relaciona con la reflectividad foliar como sigue (para una demostración formal ver Bréon *et alii.*, 2002):

$$\Delta R_{HS} = \frac{1}{2} R_s \Big|_{\xi=0} = \frac{\rho_{leaf}}{3\mu_s} \quad (2)$$

donde ρ_{leaf} es la reflectividad foliar y μ_s el coseno del ángulo cenital de iluminación.

RESULTADOS

En la figura 1 mostramos dos ejemplos de la signatura direccional hot spot medida con POLDER y HyMAP para dos superficie vegetales homogéneas, una en estado senescente ('barley') y otra vigorosa y fotosintéticamente activa (alfalfa). La signatura direccional hot spot se presenta en función del ángulo de fase, el cual toma valores positivos cuando $\theta_s \cos \phi > \theta_i$, teniendo los símbolos su significado habitual. Podemos observar perfectamente dos tendencias bien diferenciadas. Desde aproximadamente -40° hasta -3° la reflectividad aumenta linealmente, tendencia asociada a la rugosidad de la escena o macroestructura y conectada, principalmente, con los efectos de dispersión en superficie. Cerca del *backscattering*, para ángulos inferiores a 3° , la reflectividad aumenta rápidamente como consecuencia del efecto hot spot, el cual es asociado a los procesos de dispersión de volumen y, en particular, a la correlación entre la radiancia transmitida en el interior de la cubierta en su sentido descendente y ascendente. Es por ello que debemos reservar el termino hot spot exclusivamente para referirnos a este proceso físico.

Los resultados obtenidos con ambos instrumentos muestran que la ecuación propuesta para ajustar la signatura hot spot reproduce perfectamente los datos adquiridos. La comparación de los resultado obtenidos con ambos sensores es especialmente interesante para evaluar la influencia de la resolución espacial y direccional en las estimaciones realizadas utilizando la signatura hot spot. La figura 2 muestra la comparación para una superficie de cebada. En este caso, dos imágenes POLDER registran la superficie con ángulo de fase inferior a 5° , lo que aumenta el muestreo en el dominio hot spot. La coincidencia entre el hot spot obtenido con ambos sensores queda manifiesta en la figura 2. Los datos HyMAP presentan una mayor variabilidad, relacionada con la mayor resolución espacial y la falta de corrección de la heterogeneidad espacial en estos datos. La diferencia entre las

estimaciones realizadas con POLDER y HyMAP es típicamente inferior a 0.02 en amplitud y a 0.2° en la semianchura.

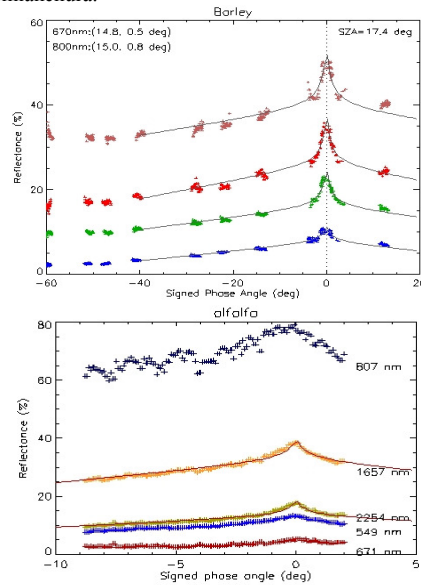


Figure 1.- Signatura direccional hot spot obtenidas con POLDER (arriba) y HyMAP (abajo), $\theta_i=17^\circ$. La línea representa el ajuste de la ec.1 a los datos.

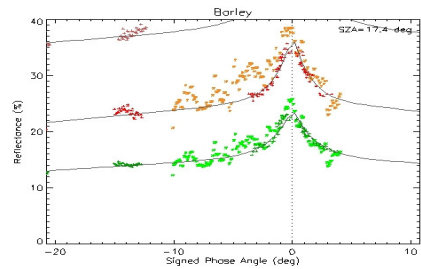


Figura 2.- Signatura direccional hot spot obtenida con POLDER (se presenta con el ajuste) y con HyMAP sobre una superficie homogénea de cebada.

Estos resultados sugieren que la resolución direccional del POLDER (0.3°) es suficiente para estimar con precisión la amplitud y semianchura del hot spot. Los efectos de escala no parecen tampoco muy importantes si bien los datos no son concluyentes a este respecto.

Finalmente, la reflectividad foliar ha sido estimada a partir de la amplitud del hot spot en aquellas superficies con cobertura vegetal superior al

75%, utilizando la ec. 2. Los resultados para POLDER se muestran en la figura 3 y para HyMAP en la figura 4.

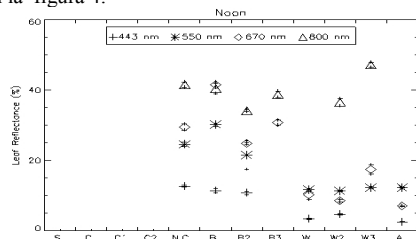


Figura 3.- Reflectividad foliar estimada a partir de la signatura direccional hot spot POLDER. S (suelo), C(maíz), B(cebada), W (trigo), A (alfalfa)

La reflectividad foliar estimada a partir de las medidas POLDER muestra valores del orden de los esperado. Las muestras senescentes presentan valores en aumento con la longitud de onda, mientras que la alfalfa o el trigo presentan valores inferiores a 670 nm (alrededor de 7%) que a 550 nm (alrededor de 12%) tal y como cabe esperar. A 800 nm la reflectividad foliar ronda el 40%.

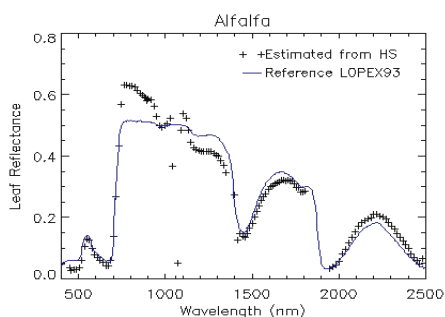


Figura 4.- Reflectividad foliar hiperespectral de una cubierta de alfalfa. derivada de la signatura direccional hot spot obtenida con HyMAP. El resultado se compara con valores de alfalfa medidos en laboratorio durante una campaña diferente.

La Figura 4 muestra la reflectividad foliar de la alfalfa obtenida en los 128 canales del HyMAP, valores que se comparan con los obtenidos en laboratorio sobre una muestra de alfalfa durante la campaña LOPEX93 (Leaf Optical Properties Experiment) (Hasgood *et alii.*, 1995). Los resultados demuestran la validez, tanto del método como de las ecuaciones propuestas, con la salvedad del IRC, donde el efecto de la dispersión múltiple produce peores resultados, algo que esperabamos ya que el modelo de hot spot solo considera la dispersión simple.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos mostrado que la signatura direccional hot spot se puede obtener a partir de datos POLDER. Dicha signatura se ajusta muy bien a una función del ángulo de fase, con lo que es posible invertir la amplitud y la semianchura del hot spot. A partir de la amplitud podemos estimar la reflectividad foliar. La existencia de datos simultaneos HyMAP, de resolución direccional inferior a 0.08 grados, ha permitido comprobar que efectivamente la reflectividad foliar puede ser estimada a partir de la amplitud del hot spot, y que la resolución direccional POLDER (0.3°) es adecuada para medir adecuadamente el efecto hot spot. Por lo tanto, el POLDER2/ADEOS2 va a permitir obtener estimaciones desde satélite de la reflectividad foliar siguiendo la metodología aquí expuesta.

REFERENCIAS

- Bréon, F.M., F. Maignan, M. Leroy and I. Grant, 2002. Analysis of the hot spot directional signatures measured from space. *Journal of Geophysical Research*, 107, D16, 10.1029-10.1044
- Camacho-de Coca, F., M. Leroy, J.P. Gastellu-Etchegorry and F.J. Garcia-Haro (2002). Measured hot spot directional signatures of agricultural crops during DAISEX'99 using POLDER data. *In Recent Advance in Quantitative Remote Sensing*, 108-115. Ed. J. Sobrino. Universitat de Valencia..
- Camacho-de Coca F, García-Haro, F.J., Gilabert, M.A. and Meliá, J., (2003). La anisotropía de la BRDF: Una nueva signatura de las superficies. *Revista de Teledetección* (en prensa).
- ESA, 2001. Proceedings of the DAISEX final results workshop, *ESA SP-499*, ESA Publication Division, ESTEC, The Netherlands, July 2001 (277 pp).
- Hosgood B., Jacquemoud S., Andreoli G., Verdebout J., Pedrini G., and Schmuck G. (1995). Leaf Optical Properties EXperiment 93 (LOPEX93). European Commission - Joint Research Centre, Ispra (Italy), EUR 16095 EN, 20 pages.
- Qin, W. and N.S. Goel, 1995. An evaluation of hot spot models for vegetation canopies, *Remote Sensing Reviews*, 13,121-159.
- Seeliger, H., 1887, Zur theorie der Beleuchtung der grossen planeten insbesondere des Saturn, *Abhandl. Bayer. Akad. Wiss. Math-Naturw. Kl. II* 16: 405-516.
- AGRADECIMIENTOS**
- Este trabajo ha sido posible gracias a los proyectos DAISEX (ESA) y LSA SAF (EUMETSAT). Agradecemos especialmente a F.-M. Bréon su valiosa aportación a este trabajo.