Revisión de los modelos paramétricos de BRDF

A. Verger, F. Camacho-de Coca y J. Meliá aleixandre.verger@uv.es

Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València. C/Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (València).

RESUMEN

Los modelos paramétricos se utilizan a nivel operativo para obtener los productos de BRDF (*Bidireccional Reflectance Distribution Function*) y albedo de los sensores de nueva generación (e.g., POLDER, SEVIRI, VEGETATION). En el contexto de la estimación de parámetros biofísicos de las cubiertas vegetales mediante técnicas de teledetección, nuestro inter/res en los modelos paramétricos reside en que éstos permiten abordar la anisotropía de la BRDF desde dos puntos de vista: como una fuente adicional de información relacionada con la estructura de las superficies vegetales o como un "ruido" que enmascara la información de interés.

En este trabajo se realiza un estudio teórico de los modelos paramétricos de BRDF de más amplia aceptación entre la comunidad científica, haciendo un análisis comparataivo de los mismos y una revisión de las principales aproximaciones realizadas. Se consideran los modelos semiempíricos lineales de tipo *kernel-driven*, introduciendo algunos de los *kernels* geométricos y de volumen más conocidos, así como el modelo empírico lineal de Walthall y el modelo multiplicativo RPV. Finalmente se presenta un ejemplo de aplicación de los modelos paramétricos. EN concreto, los modelos Li-Ross, Walthall y RPV se utilizan para caracterizar la BRDF de una cubierta de alfalfa mediante dados CHRIS/PROBA.

PALABRAS CLAVE: BRDF, modelos paramétricos, anisotropía, normalización.

ABSTRACT

Parametric models are employed for operational purposes in order to obtain near real-time BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution FUnction*) and albedo products from coarse resolution satellite data (e.g., POLDER, MSG, VEGETION). In the context of retrieving vegetation biophysical parameters from remote sensing data, our interest in parametric models is based on the utility of this kind of models in order to take into account the anisotropy of the BRDF from two different points of viwe: as a source of noise that should be minimized or as a source of information related to the 3D-structure of surface.

In this paper, a theoretical study of principal parametric BRDF models is realized. Different models are compared and a review of main hypothesis is presented. Kernel-driven models, the empirical Walthall model and the no-linear RPV model are introduced. Finally an example to illustrate the potential of apllicability of parametric models is shown. In concrete, Li-Ross, Walthall and RPV models are used to characterize the directional behaviour of the BRDF of an alfalfa crop with CHRIS/PROBA acquisitions.

KEY WORDS: BRDF, parametric models, anisotropy, normalization.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas tradicionales para la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal en teledetección han ignorado, mayoritariamente, el dominio direccional de la reflectividad, a pesar de que puede introducir errores importantes, especialmente, cuando el campo de visión (FOV) es grande y en estudios multitemporales (Verger *et al.*, 2002 y 2004a). La razón de no considerar hasta ahora la influencia de los efectos angulares se debe a las limitaciones para muestrear adecuadamente la función de distribución de reflectividad bidireccional o BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) (Nicodemus et al., 1977). La BRDF, como es bien sabido, es la magnitud básica que caracteriza las propiedades espectrales y direccionales de la reflectividad.

En la actualidad, las diferencias en las configuraciones orbitales (muestreo angular, frecuencia de observación) y las características complementarias (espectrales, angulares, espaciales, temporales) de los sensores de última generación (POLDER, VEGETATION, MODIS, SEVIRI, AVHRR) ofrecen posibilidades para obtener una caracterización mucho más precisa de la BRDF de la biosfera desde el espacio.

En la bibliografía pueden encontrarse numerosos modelos propuestos para simular o reproducir la BRDF de las superficies naturales. Los modelos de BRDF conectan el patrón espectro-angular de la reflectividad bidireccional con las características estructurales de las superficies y permiten, por una parte, corregir los efectos direccionales y, por otra, explotar la signatura direccional de la reflectividad.

Una revisión de los diferentes modelos de BRDF puede encontrarse en Goel and Thompson (2000). Según el nivel de detalle con que se describen los procesos físicos responsables de la dispersión de la luz en la escena, el grado de conocimiento que se requiere *a priori* sobre el tipo de cubierta considerada y el número de observaciones necesarias para derivar los parámetros del modelo (Wanner *et al.*, 1995), puede distinguirse entre modelos empíricos, modelos semiempíricos y modelos físicos. Los modelos empíricos o semiempíricos que no utilizan más de tres o cuatro parámetros independientes para modelar la BRDF se conocen con el término de modelos paramétricos (Lucht and Roujean, 2000).

Los modelos paramétricos proporcionan una parametrización relativamente simple y directa de la BRDF, expresando la reflectividad como una función de los ángulos cenitales de observación y de iluminación y del ángulo acimutal relativo. Estos modelos empezaron a ser investigados a principios de la década de 1990 después de los considerables avances producidos en los años 1980 en la teoría física de la BRDF. Dadas las dificultades prácticas que presentaban los modelos físicos para derivar la BRDF y frente a la cada vez mayor cantidad de datos de teledetección ofrecidos por los distintos sensores de la época, los modelos paramétricos fueron desarrollados para estimar, casi a tiempo real, la BRDF y el albedo a escala global (Wanner et al, 1995).

Prueba de la importancia que, en la actualidad, han adquirido los modelos paramétricos de BRDF es que éstos constituyen la base de la mayoría de los métodos operativos para procesar los datos multiangulares (e.g. POLDER, SEVIRI o VEGETA-TION) y se utilizan en diferentes aplicaciones, como son: normalizar la reflectividad a una configuración óptima (normalmente, "nadir-cenit"), interpolar o extrapolar la reflectividad a condiciones donde no existen observaciones, calcular el albedo de la superficie a partir de la integración angular de la BRDF, establecer el muestreo óptimo para la inversión de modelos físicos de BRDF, estimar parámetros biofísicos a partir de la signatura direccional de la superficie, o intervenir en la mejora de las correcciones atmosféricas y de las clasificaciones del uso del suelo.

En este trabajo se presentan los modelos paramétricos más ampliamente aceptados entre la comunidad científica, realizando un análisis comparativo de los mismos y haciendo una revisión de las principales aproximaciones consideradas. Nuestro principal interés en los modelos paramétricos reside en la utilidad de estos para caracterizar la BRDF. El acceso al dominio direccional permite normalizar la anisotropía de la reflectividad o incorporar la signatura direccional como una fuente de información adicional. Para ilustrar la potencialidad del uso de estos modelos para abordar el problema de la anisotropía de la BRDF desde estas dos perspectivas y para comparar las diferencias entre los distintos modelos propuestos, se muestra la función de reflectividad bidireccional que resulta de aplicar diferentes modelos en una misma cubierta vegetal: alfalfa, y con datos de un mismo sensor: CHRIS/PROBA.

REVISIÓN DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS DE BRDF

Siguiendo la notación de Lucht and Roujean (2000), hemos clasificado los modelos paramétricos en tres categorías: modelos semiempíricos lineales de tipo *kernel-driven*, modelos empíricos lineales y modelos semiempíricos no lineales de tipo multiplicativo.

Modelos semiempíricos lineales: modelos *kernel-driven*

Los modelos *kernel-driven* se basan en la hipótesis que a resoluciones espaciales moderadas (escala de pocos centenares de metros hasta el kilómetro), la radiación dispersada por las superficies heterogéneas puede descomponerse en componentes o *ker*- *nels* que representan una componente particular del comportamiento dispersivo de las cubiertas vegetales. Se asume que estas componentes o *kernels* son separables y están no correlacionadas.

Los modelos *kernel-driven* presentan la forma genérica siguiente:

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = \sum_n k_n(\lambda) f_n(\theta_i, \theta_v, \phi; \{p\}_n)$$
(1)

donde *R* es la reflectividad de la superficie bajo ángulos cenitales de iluminación y de observación θ_i y θ_v , respectivamente, con ángulo acimutal relativo ϕ , y longitud de onda λ . Las funciones o *kernesl*, f_n , son expresiones geométricas que caracterizan el comportamiento básico de la BRDF de las cubiertas vegetales y describen los procesos de interacción de la radiación con la escena. k_n son los parámetros del modelo. Y, $\{p\}_n$ son parámetros adicionales que pueden modificar el comportamiento de los *kernels*.

El modelo de Roujean *et al.* (1992) y la mayoría de modelos posteriores del tipo *kernel-driven* utilizan tres componentes o *kernels*:

- Un *kernel* constante que representa la dispersión múltiple con una distribución aproximadamente isótropa.
- 2. Un *kernel* geométrico (f_l) asociado a la dispersión simple que se produce en los elementos tridimensionales de la superficie, mayoritariamente en las capas exteriores de la cubierta vegetal y en las irregularidades o rugosidades del terreno. Esta componente describe los efectos de sombras y los mecanismos de ocultación mutua entre los distintos elementos de la escena.
- 3. Un *kernel* volumétrico (f_2) que, se puede interpretar, representa la dispersión simple que se produce en el interior de los elementos de la escena: entre las hojas de las plantas o copas de los árboles, y por efecto de la porosidad del suelo.

Así, de una manera más explícita, los modelos *kernel-driven* consideran, típicamente, la BRDF de la forma siguiente:

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = k_0(\lambda) + k_1(\lambda) f_1(\theta_i, \theta_v, \phi) + k_2(\lambda) f_2(\theta_i, \theta_v, \phi)$$
(2)

donde los parámetros del modelo k_0 , k_1 y k_2 actúan como factores de peso asociados a los *kernels* isó-

tropo, geométrico y volumétrico respectivamente. Los modelos *kernel-driven* son lineales respecto a los parámetros k_0 , k_1 y k_2 , permitiendo aplicar la teoría de los sistemas lineales y hacer una inversión analítica del modelo.

En los modelos lineales *kernel-driven*, por un convenio introducido por Roujean *et al.* (1992), los *kernels* se expresan de manera que cuando el sol y el observador están en el cenit ($\theta_i = \theta_v = 0$), $f_1(0,0,\lambda) = f_2(0,0,\lambda) = 0$. Y, por tanto, $R(0,0,\phi;\lambda) = k_0(\lambda)$. Es decir, k_0 se define como la reflectividad de la superficie cuando ésta es observada desde el nadir con el sol sobre el cenit. k_0 se puede considerar, por tanto, como una reflectividad normalizada de los efectos de anisotropía y proporciona la base para intercomparar datos adquiridos por un sensor bajo diferentes ángulos de observación y de iluminación.

En los *kernels* geométrico y volumétrico se contempla solo la radiación dispersada de primer orden. Esta hipótesis es válida, en general, cuando la absortividad es alta, pero pierde vigencia en el infrarrojo cercano donde las hojas presentan una baja absortividad. Sin embargo, se considera que las contribuciones de orden superior, que contribuyen significativamente a la reflectividad, presentan una distribución aproximadamente isótropa que el modelo recoge en su término lambertiano k_0 .

Los *kernels* geométricos y volumétricos se derivan, respectivamente, aproximando los modelos físicos óptico-geométricos y de transferencia radiativa. Por una parte, los *kernels* geométricos, f_I , consideran una cubierta vegetal formada por un conjunto discreto de elementos, y tienen en cuenta la estructura geométrica de reflectores opacos y de las sombras proyectadas. Por otra parte, en los *kernels* de volumen, f_2 , la vegetación se modela como un medio turbio donde las hojas se distribuyen de manera aleatoria.

En la bibliografía encontramos una amplia colección de *kernels* geométricos y volumétricos. Un compendio de estos *kernels* y de otros modelos semiempíricos puede encontrarse en Jupp (1998). A continuación se describen algunos de los *kernels* más utilizados. Presentamos los *kernels* geométricos: Roujean (Roujean *et al.*, 1992), LiSparse (Wanner *et al.*, 1995), LiSparse recíproco (Lucht, 1998) y LiDense (Wanner *et al.*, 1995). Y, los *kernels* volumétricos: RossThick (Roujean *et al.*, 1992) y RossThin (Wanner *et al.*, 1995). Además de estos *kernels* se describe una de las muchas modificaciones que se han realizado sobre estos *kernels* para incorporar el efecto *hot spot*: el *kernel* RossThick modificado por Maignan *et al.* (2004).

Kernel de Roujean (f_1^R)

El *kernel* geométrico introducido por Roujean *et al.* (1992) se obtiene modelando la reflectividad que resulta de considerar un conjunto de paralepípedos que representan los árboles y que se distribuyen de manera aleatoria sobre una superficie plana y lambertiana. Las fracciones de suelo y de vegetación iluminadas se consideran igualmente brillantes, es decir, tienen la misma reflectividad. Las sombras se consideran perfectamente negras de manera que no contribuyen a la reflectividad. Se desprecian las sombras mutuas entre los elementos de la escena por lo que tienen que considerarse ángulos cenitales no superiores a 60°, aproximadamente. Realizadas estas hipótesis, el *kernel* de Roujean viene dado por la expresión:

$$f_1^R(\theta_i, \theta_v, \phi) = \frac{1}{2\pi} [(\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi] \tan \theta_i \tan \theta_v - \frac{1}{\pi} [\tan \theta_i + \tan \theta_v + D)]$$
(3)

donde,

$$D = \sqrt{\tan^2 \theta_i + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_i \tan \theta_v \cos \phi}$$
(4)

En la Figura 1 se representa el *kernel f₁^R* en función del ángulo de observación, θ_{ν} , tanto en el plano principal como en el plano ortogonal, para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$). Con valores de θ_{ν} negativos indicamos que la contribución a la reflectividad proviene de la dispersión hacia delante, y con valores positivos que proviene de la retrodispersión.

 f_l^R tiene un máximo en la dirección de retrodispersión para valores de θ_i inferiores a un cierto valor mínimo (según Roujean *et al.*, 1992). Cuando θ_i está por encima de este valor límite, f_l^R aumenta de manera monótona con θ_v y diverge para θ_v aproximándose a p/2, ya que para estas condiciones no pueden despreciarse las sombras mutuas. En el plano ortogonal, la variación del *kernel* de Roujean, f_l^R , con θ_v presenta simetría respecto al nadir. Esta tendencia, común en todos los *kernels* que aquí se presentan, reproduce el comportamiento observado en la reflectividad de las cubiertas naturales en esta configuración (Camacho-de Coca *et al.*, 2004a) donde la anisotropía es mínima. Además, puede verse, en la Figura 1, que el *kernel* de Roujean cumple la condición impuesta en su definición de anularse cuando $\theta_i = \theta_v$.

Kernel LiSparse $(f_1^{S'})$

Este kernel propuesto por Wanner et al. (1995) se obtiene partiendo del modelo óptico-geométrico de BRDF de Li and Strahler (1986) realizando las mismas hipótesis consideras en el kernel de Roujean, con la salvedad que ahora los elementos geométricos, que representan la vegetación de la escena, no son paralepípedos sino esferoides con una longitud 2b, una anchura 2r y una distancia h entre sus centros y la superficie. Como en el caso anterior del kernel de Roujean, la separación espacial entre los elementos de la escena (se considera vegetación dispersa) y el rango de ángulos de observación y de iluminación considerados (ángulos cenitales no superiores a 60°, aproximadamente), permiten despreciar las sombras mutuas. El kernel LiSparse se expresa de la forma:

$$f_1^{S'}(\theta_i, \theta_v, \phi) = O(\theta_i', \theta_v', \phi) - \sec \theta_i' - \sec \theta_v' + \frac{1}{2} (1 + \cos \xi') \sec \theta_v'$$
(5)



Figura 1. Comportamiento del *kernel* geométrico de Roujean (f_j^R) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes $(\theta_i = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$.

donde,

$$O = \frac{1}{\pi} (t - \sin t \cos t) (\sec \theta_i' + \sec \theta_v')$$

$$\cos t = \min \left\{ 1, \frac{h}{b} \frac{\sqrt{D'^2 + (\tan \theta_i' \tan \theta_v' \sin \phi)^2}}{\sec \theta_i' + \sec \theta_v'} \right\}$$

$$D' = \sqrt{\tan^2 \theta_i' + \tan^2 \theta_v' - 2 \tan \theta_i' \tan \theta_v' \cos \phi}$$

$$\cos \xi' = \cos \theta_i' \cos \theta_v' + \sin \theta_i' \sin \theta_v' \cos \phi$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{b}{r} \tan \theta \right)$$
(6)

Este *kernel* contiene dos parámetros internos adimensionales, *b/r* y *h/b*, que describen, respectivamente, la forma y la altura relativa de los árboles. Cada combinación de valores *b/r* y *h/b* dará lugar a una familia de *kernels* LiSparse. En la práctica, estos parámetros pueden fijarse a uno o dos valores. Así, por ejemplo, en el procesado de MODIS se utiliza la combinación *b/r=1*, *h/b=2* (Lucht, 1998).

En la Figura 2, se representa el *kernel* LiSparse, $f_1^{S'}$, frente al ángulo de observación, q_{v_i} para la selección de parámetros *b/r* =1, *h/b*=2. Se observa que $f_1^{S'}$ presenta un máximo más pronunciado en la configuración del *hot spot* que el *kernel* de Roujean, f_I^R , y una forma más compleja que la de éste. Así mismo, en el plano principal, $f_I^{S'}$ diverge para valores altos de θ_y ...

Kernel LiSparse recíproco (f_1^S)

El *kernel* LiSparse en la forma original es no recíproco respecto al intercambio de los ángulos cenitales de observación y de iluminación. Lucht (1998) introduce una modificación en este *kernel* para hacer que cumpla la condición de reciprocidad:

$$f_1^{s}(\theta_i, \theta_v, \phi) = O(\theta_i', \theta_v', \phi) - \sec \theta_i' - \sec \theta_v' + \frac{1}{2} (1 + \cos \xi') \sec \theta_i' \sec \theta_v'$$
(4)

El comportamiento de la función f_I^S se ilustra en la Figura 3. Se observa que f_I^S presenta una forma similar al *kernel* LiSparse en la forma original, $f_I^{S'}$ (comparar Figuras 2 y 3). $f_I^S y f_I^{S'}$ difieren básicamente en que mientras que el *kernel* f_I^S permanece inalterado al intercambiar los valores de los ángulos $q_i y q_v \operatorname{con} f$ constante, el *kernel* $f_I^{S'}$ no cumple esta condición.



Figura 2.Comportamiento del *kernel* geométrico LiSparse (f_1^S) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^\circ$, 30° , 60°) y con la selección de parámetros *b/r* =1, *h/b*=2.



Figura 3. Comportamiento del *kernel* geométrico LiSparse recíproco (f_1^S) en el plano principal y en el plano ortogonal para cuatro ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^\circ$, 30°, 60°, 70°) y con la selección de parámetros b/r = 1, h/b=2.

Kernel LiDense (f_1^D)

Wanner *et al.* (1995) formula el *kernel* geométrico LiDense para modelar la reflectividad en cubiertas vegetales densas donde no puede despreciarse las sombras mutuas entre los árboles pero donde puede despreciarse la fracción de suelo desnudo que resulta iluminada:

$$f_{1}^{D}(\theta_{i},\theta_{v},\phi) = \frac{(1+\cos\xi')\sec\theta_{v}'}{\sec\theta_{v}'+\sec\theta_{i}'-O(\theta_{i}',\theta_{v}',\phi)} - 2$$
(8)

La función f_I^D se representa en la Figura 4. Se observa que con la aproximación LiDense, f_I^D , se evitan las soluciones no físicas que presentan los *kernels* geométricos de Roujean, f_I^R , y LiSparse, f_I^S y $f_I^{S'}$, que divergen para ángulos cenitales grandes, porque ahora se consideran las sombras mutuas entre las copas de los árboles (comparar la Figura 4 con las Figuras 1, 2 y 3). La inclusión de estas sombras produce, también, picos más pronunciados en la dirección de retrodispersión para el *kernel* LiDense en comparación con el resto de *kernels* geométricos considerados.

Por otra parte, entre los distintos kernels de volumen existentes, destacamos los siguientes:

Kernel RossThick (f_2^K)

Este *kernel* introducido por Roujean *et al.* (1992) se obtiene a partir del modelo de transfe-

rencia radiativa de Ross (1981) haciendo las siguientes hipótesis. Se considera una distribución isótropa de elementos dispersores (hojas) en un medio turbio sobre una superficie plana y lambertiana. Se asume que la reflectividad de estos elementos dispersores es igual a su transmisividad (esta hipótesis es válida, en general, para la vegetación tanto en el visible como en el infrarrojo cercano pero resulta más difícil de aceptar en los suelos). Se considera que la cubierta vegetal es densa y presenta valores altos del índice de área foliar (LAI>>1). Bajo estas hipótesis, el *kernel* RossThick viene dado por la expresión:

$$f_2^{\kappa}(\theta_i, \theta_{\nu}, \phi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos\theta_i + \cos\theta_{\nu}} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos\xi + \sin\xi \right] - \frac{1}{3}$$
(9)

donde ξ es el ángulo de fase,

$$\xi = \cos^{-1} (\cos\theta_i \ \cos\theta_v + \sin\theta_i \ \sin\theta_v \ \cos\phi)$$

La figura 5 muestra el comportamiento de la función f_2^K en el plano principal y en el plano ortogonal. La función f_2^K presenta un mínimo en el plano principal en la dispersión hacia delante. En el plano ortogonal, como en el resto de *kernels*, la variación de f_2^K con θ_v presenta simetría respecte al nadir. f_2^K aumenta con θ_v , cuando θ_v es suficientemente grande, para cualquier ángulo ϕ .



Figura 4. Comportamiento del *kernel* geométrico LiDense (f_1^D) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^\circ$, 30° , 60°) y con la selección de parámetros *b/r* =1, *h/b*=2.



Figura 5. Comportamiento del *kernel* volumétrico RossThick (f_2^{k}) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^\circ$, 30° , 60°).

Kernel RossThick modificado (f_2^{Khs})

Maignan *et al.* (2004) incorporan en el *kernel* RossThick un factor $1 + (1 + \xi / \xi_0)^{-1}$ que reproduce, de acuerdo con el modelo de Bréon *et al.* (2002), el aumento que se produce en la reflectividad cuando se considera el efecto *hot spot*. Así, la versión modificada del *kernel* RossThick toma la forma:

$$f_{2}^{\mathcal{K}s}(\theta_{i},\theta_{v},\phi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos\theta_{i} + \cos\theta_{v}} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \xi\right) \cos\xi + \sin\xi \right] \left\{ 1 + \left(1 + \frac{\xi}{\xi_{0}}\right)^{-1} \right\} - \frac{1}{3}$$

$$(10)$$

 ξ_0 es un ángulo característico relacionado con el tamaño de los elementos dispersores y la densidad vertical de la escena. Se toma el valor constante ξ_0 = 1.5° observado en la mayoría de superficies a diferentes escalas (Bréon *et al.*, 2002; Camacho-Coca *et al.*, 2004b).

La función f_2^{Khs} se representa en la Figura 6. Las diferencias entre el *kernel* RossThick original, f_2^K , y el *kernel* modificado, f_2^{Khs} , se manifiestan en la geometría del *hot spot* (plano principal, $\theta_i = \theta_v$): f_2^K no reproduce el efecto *hot spot* mientras que f_2^{Khs} , como era de esperar, aumenta rápidamente cuando el ángulo de observación se aproxima a la dirección de retrodispersión (comparar Figuras 5 y 6).

Kernel RossThin (f_2^N)

El *kernel* RossThin fue introducido por Wanner *et al.* (1995) para el caso de una cubierta vegetal poco densa (LAI<<1). La formulación de este *kernel* es:

$$f_2^N(\theta_i, \theta_v, \phi) = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \xi\right)\cos\xi + \sin\xi}{\cos\theta_i \cos\theta_v} - \frac{\pi}{2}$$
(11)



Figura 6. Comportamiento del *kernel* volumétrico RossThick modificado por Maignan *et al.* (2004) (f_2^{Khs}) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^\circ$, 30° , 60°).

 f_2^N se representa en la Figura 7. Los *kernels* RossThick, f_2^K , y RossThin, f_2^N , no presentan diferencias significativas para ángulos cenitales pequeños, pero con la aproximación RossThin la reflectividad aumenta más rápidamente para ángulos cenitales grandes, es decir, f_2^N presenta una forma cóncava más pronunciada que f_2^K (comparar Figuras 5 y 7).

Las principales diferencias entre los *kernels* geométricos y los de volumen residen en que mientras los *kernels* geométricos, f_1 , presentan una forma convexa y muestran grandes diferencias entre el plano principal y el plano ortogonal (véanse Figuras 1, 2, 3 y 4); las funciones de volumen, f_2 , presentan una dependencia menor con el ángulo acimutal y presentan una forma cóncava con una tendencia a aumentar para ángulos cenitales grandes (Figuras 5, 6 y 7).

La forma que presentan los *kernels* geométricos y de volumen puede interpretarse en términos de los mecanismos físicos que explican la anisotropía de la BRDF: el *gap effect*, o efecto hueco, y el *backshadow effect*, o efecto de dispersión direccional (Sandmeier *et al.*, 1998; Camacho-de Coca *et al.*, 2002).

Los *kernel* geométricos pueden relacionarse con el *backshadow effect* o efecto de dispersión direccional. En este sentido, su forma viene dada por la cantidad de sombras que son visibles o quedan ocultas al sensor, y que determinan que la reflectividad disminuye a medida que la dirección de observación, θ_v , se separa de la dirección de iluminación, θ_i . Por este motivo, las funciones f_I presentan una fuerte dependencia con el ángulo acimutal y, en el plano principal, disminuyen en la dispersión hacia delante y aumentan en la retrodispersión, con un valor máximo en la geometría del *hot spot* ($\theta_i = \theta_v$) (Figuras 1, 2, 3 y 4).

Por su parte, la forma que presentan los *kernels* de volumen viene gobernada por la función de fase y por la orientación de las hojas, que determinan un aumento de la reflectividad con el ángulo cenital θ_{v} (Figuras 5, 6 y 7). Esta tendencia es característica del *gap effect*, efecto que produce un aumento de la reflectividad a medida que aumenta θ_{v} , independientemente del plano de observación. Considerando solamente la influencia del *gap effect*, la forma de la BRDF seria la de un bol cóncavo con simetría acimutal y centrado en el valor del nadir.

En principio, los distintos kernels geométricos y volumétricos introducidos en esta sección pueden combinarse libremente para formar diferentes modelos kernel-driven de la forma mostrada en la ecuación 2. Así, cualquier combinación de un kernel geométrico con uno volumétrico dará lugar a un modelo. Pero dado que los modelos son sensibles al muestreo angular y a las características de la superficie, según el sensor que se utilice y el tipo de cubierta vegetal, unas combinaciones de kernels resultan más efectivas que otras para reproducir la BRDF observada. En la práctica, se utiliza la combinación de kernels Roujean-RossThick (modelo de Roujean) para procesar los datos del sensor POL-DER, VEGETATION o SEVIRI. Mientras que el algoritmo utilizado para calcular los productos BRDF y albedo de MODIS se basa en invertir en paralelo diferentes combinaciones de kernels: LiSparse(recíproco)-RossThick, LiDense-RossThick, LiSparse(recíproco)-RossThin y LiDense-RossThin, para encontrar el modelo que mejor se ajusta a las observaciones (Strahler et al., 1999).



Figura 7. Comportamiento del *kernel* volumétrico RossThin (f_2^N) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes $(\theta_i = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$.

Modelos empíricos lineales

Los modelos empíricos lineales pueden considerarse como modelos del tipo *kernel-driven*, donde los *kernels* son ahora funciones empíricas (Wanner *et al.*, 1995). Un ejemplo de este tipo de modelos es el modelo de Walthall, introducido por Walthall *et al.* (1985), y modificado posteriormente por Nilson and Kuusk (1989).

Modelo de Walthall (W)

Walthall *et al.* (1985) desarrollan un modelo simple de tres parámetros (p_0, p_1, p_2) que permite modelar la reflectividad de las cubiertas vegetales y de los suelos en función del ángulo cenital de visión, θ_v , y del acimutal relativo, ϕ , de la forma siguiente:

$$R^{\Psi}(\theta_{\nu}, \phi; \lambda) = p_0(\lambda)\theta_{\nu}^{2} + p_1(\lambda)\theta_{\nu}\cos\phi + p_2(\lambda)$$
(12)

El termino θ_v^2 describe la forma cóncava de la BRDF asociada al *gap effect* (Figura 8). El termino $\theta_v cos \phi$ proporciona una dependencia lineal entre la reflectividad y el ángulo θ_v que permite describir la anisotropía de la BRDF y el aumento que se produce en la reflectividad en la retrodispersión. Este segundo término, por tanto, recoge básicamente la influencia del *backshadow effect*. Finalmente, el termino constante, p_2 , representa el valor de la reflectividad en el nadir.

El modelo de Walthall permite una inversión simple, rápida y analítica, y se ha mostrado como uno de los modelos más robustos en estudios a escala global sobre una gran variedad de superficies (Strahler *et al.*, 1999). Sin embargo, este modelo no verifica el principio de reciprocidad y no tiene en consideración el efecto *hot spot*.

Modelo de Walthall modificado (MW)

Nilson and Kuusk (1989) proponen una variante mejorada del modelo de Walthall, recíproca respecto a los ángulos de observación y de iluminación. Expresan la reflectividad de la forma:

$$R^{MW}(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = p_0(\lambda)(\theta_i^2 + \theta_v^2) + p_1(\lambda)\theta_i^2\theta_v^2 + p_2(\lambda)\theta_i\theta_v\cos\phi + p_3(\lambda)$$
(13)

donde $p_i(\lambda)$ son los cuatro parámetros del modelo.

En la Figura 9 mostramos una representación que ilustra el comportamiento de los términos del modelo de Walthall en esta versión modificada.

Modelos semiempíricos no lineales: modelos multiplicativos

Rahman *et al.* (1993) proponen de manera alternativa a los modelos lineales de tipo *kernel-driven*, un modelo semiempírico no lineal donde la reflectividad se expresa como el producto de una serie de términos t_n que actúan como factores de peso, aumentando o disminuyendo, en un cierto dominio angular, rasgos particulares en la dependencia angular de la reflectividad, y controlando aspectos básicos de la forma de la BRDF:

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = \prod t_n(\theta_i, \theta_v, \phi; \{f(\lambda)\}_n)$$
(14)



Figura 8. Comportamiento de los términos del modelo Walthall en la forma original (W) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}$).



Figura 9. Comportamiento de los términos del modelo Walthall en la forma modificada por Nilson and Kuusk (1989) (MW) en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^{\circ}$, 30°, 60°).

donde f_n son los parámetros del modelo. Los modelos de este tipo se llaman modelos multiplicativos (Lucht and Roujean, 2000).

Modelo RPV

El modelo de Rahman-Pinty-Verstraete (RPV) (Rahman *et al.*, 1993) aproxima la reflectividad como el producto de tres funciones: la primera, se basa en la función empírica de Minnaert (M) y describe la concavidad de la BRDF (está relacionada, por tanto, con el *gap effect*); la segunda, es la función de fase Henyey-Greenstein (P) que describe la anisotropía de la BRDF entre la dispersión hacia delante y la retrodispersión (relacionada con el *backshadow effect*); y el tercer termino, tiene en cuenta, explícitamente, el efecto *hot spot* (H). De esta manera, la reflectividad se expresa de la forma:

$$R^{RPV}(\theta_{i},\theta_{v},\phi;\lambda) = \rho_{o}(\lambda)M(\theta_{i},\theta_{v};\lambda)P(\theta_{i},\theta_{v},\phi;\lambda)H(\theta_{i},\theta_{v},\phi;\lambda)$$
(15)

donde

$$M(\theta_i, \theta_v; \lambda) = \frac{\cos^{k(\lambda)-1} \theta_v \cos^{k(\lambda)-1} \theta_i}{(\cos \theta_v + \cos \theta_i)^{1-k(\lambda)}}$$
(16)

$$P(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = \frac{1 - \Theta^2(\lambda)}{\left[1 + \Theta^2(\lambda) - 2\Theta(\lambda)\cos(\pi - \xi)\right]^{3/2}}$$
(17)

$$H(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = 1 + \frac{1 - \rho_o(\lambda)}{1 + \sqrt{\tan^2(\theta_i) + \tan^2(\theta_v) - 2\tan\theta_i \tan\theta_v \cos\phi}}$$
(18)

y ρ_0 , k, Θ son los tres parámetros libres del modelo.

En la Figura 10, se representa la variación de los términos M, P y H del modelo RPV con el ángulo cenital de observación θ_v tanto en el plano principal como en el plano ortogonal. Los coeficientes ρ_0 , k y Θ que se utilizan en esta representación son los que



Figura 10. Comportamiento de los términos *M*, *P* y *H* del modelo RPV en el plano principal y en el plano ortogonal para tres ángulos de iluminación diferentes ($\theta_i = 0^\circ$, 30°, 60°) y con coeficientes $\rho_0 = 0.30$, k = 0.71, $\Theta = -0.03$ (alfalfa a 803 nm).

resultan de la inversión del modelo en una cubierta de alfalfa (LAI=1.4, FVC=0.4) con datos del sensor CHRIS/PROBA (Verger *et al.*, 2004b).

La no linealidad del modelo RPV respecto a sus parámetros ρ_0 , $k \neq \Theta$ conlleva los problemas inherentes que supone hacer una inversión numérica del modelo. Para evitar estos problemas de cálculo numérico se introduce el modelo MRPV (Martonchik *et al.*, 1998) que supone una versión modificada del modelo de Rahman para hacerlo lineal.

Modelo MRPV

El modelo MRPV se basa en reemplazar la función de fase Henyey-Greenstein, P, definida en la ecuación 17, por la expresión siguiente:

$$P(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = \exp(-\Theta(\lambda) \cos \xi)$$
(19)

Así mismo, se parametriza la función de *hot spot*, H, en términos de la media de la reflectividad medida, $\overline{\rho}$, y se sustituye la expresión original (ecuación 18) por:

$$H(\theta_i, \theta_v, \phi; \lambda) = 1 + \frac{1 - \overline{\rho}}{1 + \sqrt{\tan^2 \theta_i + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_i \tan \theta_v \cos \phi}}$$
(20)

Reemplazando estos términos en la ecuación 15 y tomando logaritmos, podemos expresar el modelo modificado de Rahman de la forma:

$$\ln\left(\frac{R^{MRPV}(\theta_{i},\theta_{v},\phi)}{H}\right) = \ln \rho_{0} - \Theta \cos \xi + (k-1)\ln(\cos \theta_{i} \cos \theta_{v}(\cos \theta_{i} + \cos \theta_{v}))$$
(21)

Así, el logaritmo neperiano de la reflectividad modelada es lineal respecto a los parámetros libres del modelo: ρ_0 , k, Θ . De manera que, haciendo la transformación:

$$F(R^{MRPV}) = \ln\left(\frac{R^{MRPV}}{H}\right)$$
(22)

podemos aplicar la teoría de sistemas lineales para invertir el modelo MRPV.

Los modelos multiplicativos, como el RPV que aquí presentamos, suponen en muchos casos una alternativa a los modelos de tipo *kernel-driven* porque dada la forma de ser construidos, resultan muy flexibles y pueden reproducir una gran variedad de formas diferentes de la BRDF (Wanner *et al.*, 1995). Sin embargo, como se ha comentado, el principal problema de los modelos multiplicativos es que requieren una inversión numérica por ser no lineales. En cambio, los modelos *kernel-driven* presentan las ventajas operacionales, computacionales y de inversión que supone la linealidad, además de permitir el cambio de escala y obtener el albedo de una forma sencilla utilizando tablas y con los mismos factores de peso que se obtienen de la inversión de los modelos (Wanner *et al.*, 1995).

APLICACIÓN DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS DE BRDF PARA EL ESTUDIO DE LAS CUBIERTAS VEGETALES

Los modelos paramétricos constituyen una herramienta potente para acceder al dominio direccional de la BRDF a partir de un número limitado de observaciones en distintas condiciones angulares (un mínimo de tres). Para ilustrar la aplicabilidad de los modelos introducidos en este trabajo, aquí presentamos un ejemplo en el que utilizamos los modelos Li-Ross (combinación de *kernels* LiSparse recíproco y RossThick), Walthall modificado y RPV para caracterizar la BRDF de una cubierta de alfalfa mediante datos CHRIS/PROBA (Verger *et al.*, 2004b) de la campaña SPARC 2003 (http://gpds.uv.es/sparc).

Los modelos considerados en este ejemplo son de distinta naturaleza y la selección de los mismos se ha realizado en base a los siguientes criterios:

1. La combinación de kernels LiSparse-RossThick (modelo Li-Ross) es la más ampliamente utilizada entre la comunidad científica por haberse mostrado efectiva en un gran número de aplicaciones prácticas, permitiendo reproducir una amplia variedad de formas de BRDF y mostrándose estable para condiciones de observación con un muestreo angular reducido (Lucht and Roujean, 2000). Así mismo, en Verger et al. (2004b) se evalúan los distintos modelos paramétricos descritos en el presente trabajo sobre varias superficies de cultivo utilizando los mismos datos experimentales CHRIS/PROBA aquí considerados, y se concluye que el modelo Li-Ross es el que, en general, mejor se ajusta a las medidas de reflectividad.

- 2. Entre los modelos de naturaleza empírica, en esta discusión se considera el modelo de Walthall en la versión modificada con cuatro parámetros porque proporciona un mejor ajuste a los datos experimentales (Verger *et al.*, 2004b) que el modelo en la forma original con tres parámetros.
- Finalmente, se incluye en el análisis el modelo no lineal RPV porque en diferentes estudios (Hu et al., 1997; Bicheron and Leroy, 2000; Maignan et al., 2004) se ha comprobado que ofrece resultados comparables o incluso mejores que el modelo lineal Li-Ross.

El método de inversión de estos modelos se basa en minimizar la función:

$$\chi^{2} = \sum_{i=1}^{N} (R_{i} - \hat{R}_{i})^{2}$$
(23)

donde i=1,2...N son las observaciones disponibles, y \hat{R}_i las reflectividades modeladas. Dada la linealidad de los modelos Li-Ross y Walthall su inversión es rápida. Sea \hat{R} el vector con las observaciones y A la matriz con los kernels para las N geometrías, entonces el vector de parámetros incógnita $k=[k_{\alpha}]$ k_{1}, k_{2}] se obtiene como $k = (A^{T}A)^{-1} A^{T} R^{T}$. En el caso del modelo no lineal RPV, para determinar la solución que minimiza el residuo entre las observaciones y las predicciones, utilizamos el método multidimensional de Powell (Press et al., 1992) con un número máximo de 10000 iteraciones y una tolerancia de 10⁻⁸. En cuanto al tiempo de cálculo, la inversión del modelo de Walthall con cuatro parámetros es 1.4 veces más lenta que la inversión del modelo Li-Ross de tres parámetros, mientras que la inversión del modelo RPV, mediante la rutina POWELL de IDL, requiere un tiempo de computación 2200 veces superior a la del modelo lineal Li-Ross.

Los modelos paramétricos permiten abordar la anisotropía de la BRDF de las cubiertas vegetales desde dos perspectivas diferentes para la estimación de parámetros biofísicos:

1. Por una parte, cuando no se tiene acceso a la información direccional o el método de estimación no permite incorporar la dimensión angular, la anisotropía de la reflectividad constituye una fuente de variabilidad en la señal no deseada que puede introducir errores importantes y que, por tanto, se debe normalizar.

En trabajos previos (Verger *et al.* 2002 y 2004a), se analiza la dependencia de los índices espectrales de vegetación con la geometría de adquisición, y se discute en que medida esta dependencia afecta a la estimación de parámetros biofísicos como el índice de área foliar (LAI) o la fracción de cubierta vegetal (FVC) cuando se utilizan técnicas basadas en relaciones semiempíricas entre los índices de vegetación y los atributos de la vegetación (hasta un 70% de dispersión en los valores del LAI estimado por variaciones del ángulo cenital de observación entre $\pm 30^{\circ}$ o del ángulo de iluminación entre 15° y 55°).

En estos trabajos se pone de manifiesto, por tanto, que resulta fundamental en los sensores con un gran FOV y en los estudios multitemporales poder estandarizar las medidas a su equivalente desde el nadir, para mejorar así la interpretación de los índices de vegetación y la incertidumbre en la estimación de magnitudes derivadas como la FVC y el LAI.

En este sentido, el parámetro k_0 de los modelos *kernel-driven*, el parámetro p_2 del modelo original de Walthall (W) o el parámetro p_3 del modelo de Walthall modificado (MW) representan el valor de la reflectividad estandarizada a las condiciones $\theta_v = \theta_i = 0^\circ$. Y, por tanto, constituyen la base para normalizar las medidas adquiridas con sensores multiangulares de teledetección a una geometría de referencia, normalmente a observación nadir e iluminación cenital: geometría óptima para la obtención de la FVC.

2. Por otra parte, el acceso al dominio direccional de información introduce una nueva dimensión en el problema, permitiendo utilizar modelos físicos más complejos y realistas para estimar con mayor exactitud los parámetros biofísicos de interés. De esta manera, la anisotropía de la BRDF representa una fuente adicional de información relacionada con la estructura tridimensional de las superficies vegetales (Camacho-de Coca *et al.*, 2004a).

En esta segunda línea, los modelos paramétricos permiten explorar la forma de la BRDF y acceder a la signatura direccional de las superficies para estimar parámetros relacionados con la estructura de la cubierta mediante técnicas direccionales.

Para la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal mediante estas dos metodologías, es necesario previamente caracterizar la BRDF. En la Figura 11 se muestra la reflectividad de la cubierta de alfalfa (LAI=1.4, FVC=0.4) modelada mediante los

modelos Li-Ross, Walthall modificado y RPV, a 803 nm y con un ángulo de iluminación θ_i =15°. Sobre la superficie de BRDF (Figura 11a) se pueden definir curvas de nivel, a intervalos constantes de reflectividad, que proyectamos sobre el plano cartesiano XY (X = θ_v cosf, Y = θ_v cosf). Así, en esta representación un pico en la BRDF viene representado por isolíneas concéntricas de radio cada vez menor, mientras que un gradiente constante de reflectividad se representa con un conjunto de isolíneas paralelas. Esta representación proyectada sobre un diagrama polar es la que se utiliza en las Figuras 11b. Finalmente, en las Figuras 11c se muestra la signatura direccional de la cubierta de alfalfa tanto en el plano principal como en el plano ortogonal.

La forma de las funciones de BRDF correspondientes a los modelos Li-Ross y RPV puede explicarse en términos del gap effect y del backshadow effect (Camacho-de Coca et al., 2002). El gap effect tiene en cuenta el aumento de la contribución de los estratos superiores más irradiados de la vegetación a medida que aumenta el ángulo cenital de observación. El backshadow effect, por su parte, está relacionado con la irradiancia que reciben los elementos de la cubierta, dada por la ley del coseno y por la presencia de sombras. En las Figuras 11b, el gap effect se manifiesta con líneas cerradas en la región de dispersión hacia delante, produciendo la forma cóncava asociada a la dispersión de volumen. Por otra parte, el backshadow effect produce, en las representaciones 11b, líneas equidistantes que reflejan un gradiente continuo de la reflectividad cuyo valor disminuye monótonamente a medida que nos alejamos de la dirección de retrodispersión.



Figura 11. BRDF de una cubierta de alfalfa obtenida mediante los modelos Walthall (en la versión modificada de 4 parámetros), Li-Ross y RPV a 803 nm y para un ángulo de iluminación $\theta_i = 30^{\circ}$. (a) Representación de la BRDF en coordenades cartesianes: $X = \theta_v \cos\phi$, $Y = \theta_v \sin\phi$. (b) Diagrama polar que representa la proyección de la superficie de BRDF sobre el plano XY. El asterisco marca la posición del sol. PP: plano de observación principal. PO: plano ortogonal. Los círculos representan ángulos de observación constante, se marcan cada 15° hasta 60°. (c) Signatura direccional en el plano principal y en el plano ortogonal.

El modelo de Walthall dada su naturaleza empírica tiene más dificultades para reproducir la BRDF en condiciones donde no existen observaciones (el muestreo angular de CHRIS/PROBA consta de 10 adquisiciones y ninguna de ellas en el plano principal (Verger *et al.*, 2004b)) y la forma de BRDF modelada mediante este modelo resulta más difícil de explicar en términos de mecanismos físicos.

En las representaciones 11c, se pone de manifiesto que las mayores diferencias entre los modelos considerados tienen lugar en el plano principal y en la geometría del *hot spot*: solo el modelo RPV reproduce este efecto. Mientras tanto, en el plano ortogonal donde la anisotropía es mínima, las diferencias en la signatura direccional de la alfalfa que los distintos modelos proporcionan son mínimas.

Por tanto, dado que el *hot spot* es un efecto importante para caracterizar la anisotropía de la BRDF, puede concluirse que el modelo RPV es, entre los tres modelos analizados, el que mejor reproduce la forma de la BRDF de la alfalfa mediante datos CHRIS/PROBA.

Por otra parte, en la Figura 11c también puede apreciarse que, en la geometría de $k_0 (\theta_v = \theta_i = 0^\circ)$, la

reflectividad modelada por los distintos modelos toma valores muy similares: 0.42 para el modelo de Walthall, y 0.41 para los modelos Li-Ross y RPV. Por tanto, los tres modelos parecen adecuados para corregir las medidas CHRIS/PROBA de los efectos direccionales y normalizar las observaciones a la geometría de referencia k_0 . Ahora bien, por tiempo de cálculo y por ser el modelo que, en general, mejor ajusta las observaciones CHRIS/PROBA (menor RMS) en las diferentes superficies de cultivo presentes en la zona de estudio (Verger *et al.*, 2004b), el modelo Li-Ross es el más apropiado para corregir la anisotropía en las medidas de reflectividad.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado los modelos paramétricos de más amplia aceptación entre la comunidad científica, haciendo un análisis comparativo de los mismos y una revisión de las principales aproximaciones consideradas. Siguiendo el criterio de Lucht and Roujean (2000), hemos clasificado los modelos introducidos en: modelos

	Kernels geométricos	Kernels de volumen
Kernels introducidos	 Roujean (f₁^R, ecuación 3). LiSparse en su forma original (f₁^S ecuación 5) y en su forma recíproc (f₁^S, ecuación 7). LiDense (f₁^D, ecuación 8). 	 RossThick en su forma original (f₂^K, ecuación 9) y en la forma modificada para incluir el hot spot (f₂^{Khe}, ecuación 10). RossThin (f₂^N, ecuación 11).
Se basan en modelos físicos	Óptico-geométricos.	• Transferencia radiativa.
Vegetación	 Los árboles se representan mediant elementos geométricos (paralepípedo en el kernel de Roujean o esferoide para la familia de kernels 'Li') que s distribuyen de manera aleatoria sobr una superficie plana y lambertiana. 	 Distribución isótropa de hojas sobre una superficie plana y lambertiana. El kernel f₂^K considera LAI>>1. El kernel f₂^N considera LAI<<1.
Propiedades ópticas	 Las fracciones de suelo y divegetación iluminadas presentan la misma reflectividad. Las sombras se considerat perfectamente negras de manera qui no contribuyen a la reflectividad. Los kernels f_i^R, f_i^S y f_i^S desprecian la sombras mútuas entre los elementos de la escena. El kernel f_i^D considera nula la fracción de suelo desnudo que resultat iluminada. 	• La reflectividad de las hojas es igual a su transmisividad.

Tabla 1. Principales hipótesis realizadas en la formulación de los kernels geométricos y de volumen.

semiempíricos lineales de tipo *kernel-driven*, modelos empíricos lineales y modelos multiplicativos no lineales.

En la Tabla 1 se resumen las principales hipótesis realizadas en la obtención de los distintos *kernels* geométricos y volumétricos considerados. Además de los modelos *kernel-driven*, analizamos el modelo empírico de Walthall *et al.* (1985) en la forma original (W, ecuación 12) y en la versión recíproca de Nilson and Kuusk (1989) (MW, ecuación 13). Y, el modelo multiplicativo introducido por Rahman *et al.* (1993) (RPV, ecuación 15) y modificado por Martonchik *et al.* (1998) para hacerlo lineal (MRPV, ecuación 21).

Finalmente y como ejemplo de aplicación donde se pone de manifiesto la potencialidad de los modelos paramétricos para acceder al dominio direccional de la BRDF a partir de un número limitado de observaciones en distintas condiciones angulares (diez en nuestro caso), utilizamos los modelos Li-Ross, Walthall y RPV para caracterizar la BRDF de una cubierta de alfalfa mediante datos CHRIS/PROBA de la campaña SPARC 2003 (Figura 11). Del análisis de los resultados y en base a otros estudios precedentes, se concluye que el modelo RPV es el que mejor reproduce la forma de la BRDF de la alfalfa a partir de las medidas experimentales disponibles, mientras que el modelo Li-Ross resulta ser el modelo más adecuado para normalizar los efectos direccionales de las observaciones.

Así pues, el modelo de BRDF que mejor funciona depende de: la aplicación que se persigue, las características de la superficie de estudio, el sensor utilizado, y las observaciones disponibles (número de medidas y distribución angular de las mismas). La selección de un modelo paramétrico u otro es una cuestión abierta y en la práctica, como hemos comentado, se utilizan diferentes modelos para producir BRDF y albedo de diferentes sensores. Por ello, dada la multiplicidad de sensores y de modelos de BRDF, resulta necesario desarrollar estrategias de validación e intercomparación para garantizar la consistencia espacial y temporal de los productos (Verger *et al.*, 2005).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado, en parte, por los proyectos IDEAS (REN2002-01495), TEDEC-VA (GV04B-191), y LSA SAF (EUMETSAT). Los datos CHRIS/PROBA utilizados corresponden a la campaña SPARC 2003 (ESA).

BIBLIOGRAFÍA

- BICHERON, P. and LEROY, M. 2000. Bidirectional reflectance distribution function signatures of major biomes observed from space. *Journal of Geophysical Research*. 105:26669–26681.
- BRÉON, F.M., MAIGNAN, F., LEROY, M. and GRANT, I. 2002. Analysis of hot spot directional signatures measured from space. *Journal of Geophysical Research*. 107(16):4.282–4.296.
- CAMACHO-DE COCA, F., GARCÍA-HARO, F. J., GILABERT, M.A. and MELIÁ, J. 2002. La anisotropía de la BRDF: Una nueva signatura de las cubiertas vegetales. Revista de Teledetección. 18: 29-46.
- CAMACHO DE COCA, F. 2004a. La anisotropía de la BRDF en la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal mediante teledetección. PhD Thesis. Universitat de Valencia. 404 pp.
- CAMACHO DE COCA, F., BRÉON, F. M., LEROY, M., and GARCÍA-HARO, F. J. 2004b. Airborne measurements of hot spot reflectance signatures. *Remote Sensing of Environment*. 90(63-75).
- GOEL, N.S. and THOMPSON, R.L. 2000. A snapshot of canopy reflectance models, and a universal model for the radiation regime. *Remote Sensing of Environment*. 18:197–225.
- HU, B., LUCHT, W., LI, X. and STRAHLER, A.H. 1997. Validation of kernel-driven semiempirical models for the surface bidirectional reflectance distribution function of land surfaces. *Remote Sensing of Environment*. 62:201–214.
- JUPP, D.L.B. 1998. A compedium of kernel and other (semi-)empirical BRDF models. *CSIRO*. *Office of Space Science Applications. Earth Observation Centre (on the web)*.
- LI, X. and STRAHLER, A.H. 1986. Geometricaloptical reflectance modelling of a conifer forest canopy. *IEEE Transcations on Geoscience and Remote Sensing*. 24:906–919.
- LUCHT, W. 1998. Expected retrieval accuracies of bidirectional reflectance and albedo from EOS-MODIS and MISR angular sampling. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*. 103:8763–8778.
- LUCHT, W. and ROUJEAN, J.L. 2000. Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multiangle satellite sensor observations. *Remote Sensing Reviews*. 18:343–380.
- MAIGNAN, F., BRÉON, F.M., and LACAZE, R. 2004. Bidirectional reflectance of Earth targets: Analytical modeling and validation against a

large data set of satellite observations. Remote Sensing of Environment. 90:210-220

- MARTONCHIK, J.V., DINER, D.J., PINTY, B., VERSTRAETE, M.M., MYNENI, R.B., KNYA-ZIKHIN, Y. and GORDON, H.R. 1998. Determination of land ocean reflective, radiative and biophysical properties using multiangle imaging. *IEEE Transcations on Geoscience and Remote Sensing*. 36:1266–1281.
- NICODEMUS, F.E., RICHMOND, J.C., HSIA, J.J., GINSBERG, I. W. and LIMPERIS, F. 1977. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. *National Bureau of Standards. NBS*. Monograph 160.
- NILSON, T. and KUUSK, A. 1989. A reflectance model for the homogenous plant canopy and its inversion, *Rem. Sens. Environ.* 27, 157-167.
- PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A., VETTER-LING, W.T., and FLANNERY, B.P. 1992. Numerical Recipes in FORTRAN 77: The Art of Scientific Computing. *Cambridge University Press, Cambridge, U.K.*
- RAHMAN, H., PINTY, B. and VERSTRAETE, M.
 M. 1993. Coupled surface-atmospheric reflectance (CSAR) model 2. Semiempirical surface model usable with NOAA AVHRR data, J. Geophys. Res. 98(D11): 20, 791-20, 802.
- ROSS, J. K. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. *W. Junk, The Hague, Netherlands.*
- ROUJEAN, J.L., LEROY, M., and DESCHAMPS, P.Y. 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*. 97(D18):20455–20468.
- SANDMEIER, S., MÜLLER, C., HOSGOOD, B. y ANDREOLI, G. 1998. Physical mechanisms in Hyperspectral BRDF Data of Grass and

Watercress. *Remote Sensing of Environment*. 66: 222-223.

- STRAHLER, A.H., MULLER, J.P., and et al (21 authors). 1999. MODIS BRDF/Albedo product: Algorithm Theorical Basis Document Version 5.0. *NASA/GSFC, MODIS Product ID: MOD 43*. 53 pp.
- VERGER, A., GILABERT, M.A., CAMACHO-DE COCA, F. y MELIÁ, J. 2002. Influencia del ángulo cenital de iluminación en los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*. 18:75–89.
- VERGER, A., CAMACHO-DE COCA, F., y MELIÁ, J. 2004a. Influencia de la geometría de adquisición en el NDVI. *Revista de Teledetección*. 21:95–99.
- VERGER, A., CAMACHO-DE COCA, F. and MELIÁ, J. 2004b. Testing Parametric BRDF Models with CHRIS/PROBA Acquisitions over Agricultural Crops, *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystem and Hydrology, edited by M. Owe, G. D'Urso, B.T.Gouweleeuw, A.M. Jochum, ISBN 0-8194-5515-6, vol 5568 (Bellingham, WA)*, pp. 240.
- VERGER, A., ROUJEAN, J.L., CAMACHO-DE COCA, F. y MELIÁ, J. 2005. Intercomparación de la BRDF proporcionada por sensores de baja resolución espacial en zonas de bosque de Norte-América. XI Congreso Nacional de Teledetección. Tenerife. (enviado).
- WALTHALL, C.L., NORMAN, J. M., WELLES, J. M., CAMPBELL, G. and BLAD, B. 1985. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetated canopies and bare soil surfaces, *Appl. Opt.* 24(3), 383-387.
- WANNER, W., LI, X. and STRAHLER, A.H. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*. 100.