

SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS ARBOLADOS USANDO INFORMACIÓN ESPECTRAL MULTI-ANGULAR

ON THE CLASSIFICATION OF TREE SYSTEMS USING SPECTRAL MULTI-ANGULAR INFORMATION

Alejandro Cano-González, Fernando Paz-Pellat*, Martín Bolaños-González, Enrique Palacios-Vélez, Enrique Mejía-Sáenz, José L. Oropeza-Mota, Rene Valdez-Lazalde, José Chávez-Chan, Alfonso Zarco-Hidalgo

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Km. 36.5, Carretera México-Texcoco, 56230. Montecillo, Texcoco. Estado de México (pellat@colpos.mx).

RESUMEN

El uso de información espectral multi-angular se ha justificado como una estrategia para aumentar la precisión de los sistemas de clasificación de cultivos y de la vegetación natural, los cuales ahora sólo usan información espectral, con un esquema de análisis multivariado o de árboles de decisión, entre otros. En este trabajo se discuten los esquemas de caracterización de la información espectral multi-angular asociada a la vegetación, así como su uso en los sistemas de clasificación. Para revisar la factibilidad de uso de datos espectrales multi-angulares, se diseñó un experimento tipo maqueta con sistemas arbolados, cinco especies forestales y se realizaron mediciones asociadas a la función de distribución bidireccional de las reflectancias. La información multi-angular fue modelada en forma compacta y usada para definir un parámetro general, la pendiente, que engloba toda la variación angular de las reflectancias. Los resultados muestran que, dejando fijo el fondo de la vegetación, es posible discriminar sistemas arbolados y que cuando el fondo de la vegetación varía hay confusión con coberturas aéreas bajas, la cual se reduce al incrementarse ésta.

Palabras clave: BRDF, clasificación, sistemas arbolados, sensores remotos.

INTRODUCCIÓN

La clasificación de la vegetación, asignación de tipos homogéneos de vegetación a una clase u otorgar una etiqueta de clase a un píxel de una imagen satelital, usando sensores remotos ha sido un objetivo de largo plazo de la tecnología satelital. Para clasificar la vegetación, entendida en términos de la clase asociada a la cobertura (parcial o total) de las plantas sobre una parcela o píxel de una imagen satelital, se ha usado una gran variedad de sensores remotos en plataformas espaciales, donde predominan los que son gratuitos y con resolución espacial suficiente para análisis regionales o globales. Dentro de los sensores de uso gratuito, uno de los más usados para clasificar

ABSTRACT

Multi-angular spectral information has been used to increase precision in classifying crops and natural vegetation. These classification systems now use only spectral information with a scheme of multivariate analysis or of decision trees, among others. In this paper, the characterization schemes of multi-angular spectral information associated with vegetation and its use in classification systems are discussed. To review the feasibility of using multi-angular spectral data, a maquette-type experiment was designed for tree systems with five forest species. Measurements taken were associated with the bidirectional reflectance distribution function (BRDF). The multi-angular information was modeled in a compact form and used to define a general parameter, the slope, which comprises all the angular variation of the reflectances. The results show that, with the vegetation background remaining fixed, it is possible to discriminate tree systems, and when the vegetation background varies and there is little canopy cover, confusion arises but decreases in the measure that canopy cover increases.

Key words: BRDF, classification, tree systems, remote sensors.

INTRODUCTION

Classifying vegetation, assigning homogeneous types of vegetation to a class, or giving a class label to a pixel of a satellite image using remote sensors has been a long-term objective of satellite technology. To classify vegetation, understood in terms of the class associated with plant cover (total or partial) over a plot or pixel of a satellite image, a wide variety of sensors has been used on space platforms, of which the most widely used are those that have no cost and sufficient spatial resolution for regional or global analysis. Among the free sensors, one of the most widely used for classifying vegetation is AVHRR, with a nadir spatial resolution of 1.1 km; this has been available for use since 1978. The MODIS sensor, with a nadir resolution of 250, 500, and 1000 m, in operation since 2000, is used intensively in mapping vegetation at regional and

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Agosto, 2007. Aprobado: Marzo, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 279-290. 2009.

la vegetación es el AVHRR, con resolución espacial a nadir de 1.1 km, el cual ha estado disponible desde 1978. El sensor MODIS, con resolución a nadir de 250, 500 y 1000 m, en operación desde 2000, es usado intensivamente en el mapeo de la vegetación a escalas regionales y globales. Ambos sensores son de barrido ancho, por lo que los píxeles en una escena son vistos con diferentes ángulos cenitales de visión e iluminación solar, generando un problema de geometría sol-sensor. La información multi-angular asociada a la vegetación, geometría sol-sensor, ha sido la base para desarrollar sensores operacionales como el POLDER, que tiene hasta catorce ángulos de observación y una resolución espacial de 7 km; el ATSR-2 con dos ángulos de visión y una resolución de 1 km; y, el MISR, con nueve ángulos de visión y resolución espacial de 275 m a 1.1 km. Así, la información espectral multi-angular es inherente a los sensores actuales de cubrimiento global y alta resolución temporal.

Los sistemas de clasificación de la vegetación basados en sensores remotos se han fundamentado en análisis de agrupaciones (Alvarez *et al.*, 2003), análisis logístico de regresión (Seto y Kaufmann, 2005), conjuntos borrosos (Foody, 1996), conjuntos rugosos (Yun y Jianwen, 2006), teoría matemática de la evidencia (Cayuela *et al.*, 2006), redes neuronales (Carpenter *et al.*, 1979), árboles de decisión (Running *et al.*, 1995; Friedl y Brodley, 1997) y reglas generadas por sistemas expertos (Daniels, 2006). La evolución temporal de índices de vegetación como el *NDVI* o las reflectancias o temperaturas radiativas es usada para mejorar las clasificaciones (Justice *et al.*, 1985; Nemani y Running, 1997). Uno de los sistemas de clasificación de la vegetación con mayor uso es la del grupo del sensor MODIS/MISR (Knyazikhin *et al.*, 1998a y b; Zhang *et al.*, 2002a y b). Un punto crítico de este sistema es el uso de las relaciones del índice espectral *NDVI* con la RFAA (radiación fotosintéticamente activa absorbida) y el IAF (índice de área foliar), en sus patrones temporales y espectrales. La validez de la relación entre el *NDVI* y la RFAA y el IAF ha sido discutida y, en ciertas condiciones, se ha establecido una relación más o menos lineal (Asrar *et al.*, 1992; Myneni y Williams, 1994). Con un enfoque de clasificación basado en árboles de decisión, Nemani y Runing (1997) usaron la relación entre el *NDVI* y la temperatura de superficie, *Ts*, para discriminar diferentes clases de vegetación, usando balances de energía y agua como paradigma. El problema de este enfoque es que requiere un canal térmico de los sensores y los multi-angulares rara vez cuentan con este tipo de canal.

Los sistemas de clasificación de la vegetación basados en sensores remotos discutidos, utilizan el *NDVI*

global scales. Both sensors are wide-scanning, and so the pixels in a scene are seen with different zenith angles of vision and solar illumination, generating a problem of sun-sensor geometry. The multi-angular information associated with vegetation, sun-sensor geometry, has been the basis for developing operational sensors such as POLDER, which has up to fourteen angles of observation and a spatial resolution of 7 km; ATSR-2 with two angles of vision and a resolution of 1 km; and MISR with nine angles of vision and spatial resolution of 275 m to 1.1 km. Thus, multi-angular spectral information is inherent in present-day sensors of global coverage and high temporal resolution.

Vegetation classification systems based on remote sensors have been founded on cluster analysis (Alvarez *et al.*, 2003), logistic regression analysis (Seto and Kaufmann, 2005), fuzzy sets (Foody, 1996), rough sets (Yun and Jianwen, 2006), mathematical evidence theory (Cayuela *et al.*, 2006), neural networks (Carpenter *et al.*, 1994), decision trees (Running *et al.*, 1995; Friedl and Brodley, 1997), and expert-system-generated rules (Daniels, 2006). Temporal evolution of vegetation indexes, such as *NDVI* or radiative reflectances or temperatures, are used to improve classifications (Justice *et al.*, 1985; Nemani and Running, 1997). One of the most widely used vegetation classification systems is that of the MODIS/MISR sensor group (Knyazikhin *et al.*, 1998a and b; Zhang *et al.*, 2002a and b). A critical point of this system is the use of relationships of the *NDVI* spectral index with FAPAR (fraction of absorbed photosynthetically active radiation) and LAI (leaf area index) in their temporal and spectral patterns. The validity of the relationship of *NDVI* with FAPAR and LAI has been discussed and, under certain conditions, a more or less linear relationship has been established (Asrar *et al.*, 1992; Myneni and Williams, 1994). With a classification approach based on decision trees, Nemani and Running (1997) used the relationship between *NDVI* and surface temperature, *Ts*, to discriminate different vegetation classes using energy and water balances as paradigms. The problem of this approach is that it requires that the sensors have a thermic channel, which multi-angular sensors rarely have.

The vegetation classification systems based on remote sensors discussed above use *NDVI* as an important part of their discrimination algorithms, making it unattractive for ecosystems with dense foliage because of a problem of saturating the red (*R*) band, which is included in *NDVI* together with the near infrared (*NIR*) band. Paz *et al.* (2007) discuss the design of vegetation indexes and show that the implicit

como parte importante de sus algoritmos de discriminación, lo cual los hace poco atractivos para ecosistemas con mucho follaje, por el problema de saturación de la banda del rojo (*R*), la cual está incluida en el *NDVI* junto con la banda del infrarrojo cercano (*IRC*). Paz *et al.* (2007) discuten el diseño de índices de vegetación y muestran que las hipótesis implícitas del *NDVI* son de las peores para capturar la dinámica del crecimiento de la vegetación.

Para poder definir los alcances y limitaciones de posibles sistemas de clasificación de la vegetación usando información espectral multi-angular, uno de los objetivos principales de esta investigación fue evaluar el potencial de discriminación de diferentes tipos de vegetación, diferentes tamaños, tipos de hojas y distribución espacial y angular, mediante la información obtenida por mediciones angulares de la reflectancia.

INFORMACIÓN ESPECTRAL MULTI-ANGULAR

Los objetos terrestres generalmente reflejan la energía solar en forma anisotrópica, de tal forma que esta señal angular puede ser usada para distinguir o clasificar los diferentes objetos en una escena con un satélite multi-angular (Diner *et al.*, 1999; Asner, 2000). La caracterización de las mezclas suelo-vegetación ha sido estudiada (Kimes, 1983; Ranson *et al.*, 1985) y es la base para que la información espectral multi-angular puede ser usada para una mejor discriminación y caracterización de los cultivos y ecosistemas.

Modelos de la BRDF

Una función utilizada para caracterizar la variación de las reflectancias con la geometría sol-sensor es la BRDF (Nicodemus *et al.*, 1977) o función de distribución de la reflectancia bidireccional, que caracteriza las reflectancias en función de los ángulos (cenitales y acimutales) de visión y de iluminación. La modelación de la BRDF ha tenido un enfoque empírico (Minnaert, 1941; Hapke, 1981; Walthall *et al.*, 1985) o basado en la teoría de transferencia radiativa de medios turbios u homogéneos (Ross, 1981; Goel, 1988) o basado en óptica geométrica (Li y Strahler, 1985, 1992; Strahler y Jupp, 1991).

Los modelos de la BRDF más usados están basados en funciones matemáticas que representan las componentes esenciales del proceso de transferencia de radiación (kernels) que combinan modelos de medios turbios y de óptica geométrica (Wanner *et al.*, 1995). Estos modelos semi-empíricos de kernels pueden ser lineales (Roujean *et al.*, 1992; Lucht y Roujean, 2000)

hypotheses of *NDVI* are the worst for capturing vegetation growth dynamics.

To be able to define the scope and limitations of possible vegetation classification systems using multi-angular spectral information, one of the main objectives of this study was to evaluate the potential of information obtained through angular measurements of reflectance to discriminate vegetation of different types, sizes, leaf types and spatial and angular distribution.

MULTI-ANGULAR SPECTRAL INFORMATION

Terrestrial objects generally reflect solar energy anisotropically, in such a manner that the angular signal can be used to distinguish or classify different objects in a scene with a multi-angular satellite (Diner *et al.*, 1999; Asner, 2000). Soil-vegetation mixtures have been studied (Kimes, 1983; Ranson *et al.*, 1985) and are the basis for enabling multi-angular spectral information to be used for better discrimination and characterization of crops and ecosystems.

BRDF models

The function used to characterize the variation in sun-sensor geometry reflectances is BRDF (Nicodemus *et al.*, 1977), or bidirectional reflectance distribution function, which characterizes reflectances in function of angles of vision and illumination (zenith and azimuthal). Modeling BRDF has been approached with empirical methods (Minnaert, 1941; Hapke, 1981; Walthall *et al.*, 1985) or has been based on the theory of radiative transfer using turbid or homogeneous media (Ross, 1981; Goel, 1988) or geometric optics (Li and Strahler, 1985, 1992; Strahler and Jupp, 1991).

The most widely used BRDF models are based on mathematical functions that represent the essential components of the radiation transfer process (kernels), which combine turbid medium models with geometric optics (Wanner *et al.*, 1995). These semi-empirical kernel models can be linear (Roujean *et al.*, 1992; Lucht and Roujean, 2000) or non-linear (Staylor and Suttles, 1986; Rahman *et al.*, 1993). BRDF models require at least three parameters, making it necessary for multi-angular information to have minimal variation in the reflectance from the surface to be characterized.

Pinty *et al.* (2002) and Gobron *et al.* (2002) used the Rahman *et al.* (1993) non-linear BRDF model to propose that *k* (shape parameter of the modified Minnaert function) of this model can be used to discriminate vegetation types with highly reflective backgrounds (snow or desert sand). Thus, the BRDF

o no lineales (Staylor y Suttles, 1986; Rahman *et al.*, 1993). Los modelos de la BRDF requieren al menos tres parámetros, lo que obliga a contar con información multi-angular con mínimas variaciones de las reflectancias de las superficies a caracterizar.

Pinty *et al.* (2002) y Gobron *et al.* (2002) usaron el modelo no lineal de la BRDF de Rahman *et al.* (1993) para proponer que k (parámetro de forma de la función de Minnaert modificada) de este modelo puede usarse para discriminar tipos de vegetación con fondos muy reflectivos (nieve o desierto). Así, la forma de la BRDF puede ser caracterizada en función de ser cóncava ($k > 1$), convexa ($k < 1$) o lineal ($k = 1$). Este enfoque ha sido usado por Nolin (2004).

Bolaños *et al.* (2007) proponen una nueva familia de modelos de la BRDF que simplifican el problema de modelación, ya que sólo requieren un parámetro para su caracterización.

Clasificación de la vegetación con información spectral multi-angular

Se ha argumentado que la información spectral multi-angular mejora las clasificaciones de la vegetación (Bicheron *et al.*, 1997; Asner, 2000). El uso de información multi-angular en una sola banda espectral en la clasificación de la vegetación, da resultados similares al uso de información de múltiples bandas espectrales con un solo ángulo de visión; aunque la discriminación de clases de vegetación está fuertemente influenciada por las diferencias a nivel espectral y, en menor medida, a nivel angular (Barnsley *et al.*, 1997).

Zhang *et al.* (2002a y b) argumentan que la clasificación de la vegetación debe basarse en principios de consistencia entre las propiedades radiativas de las clases y sus firmas espectrales distintivas, manteniendo fija la resolución espacial (problema de mezclas). Estos autores utilizan espacios espectrales (R - IRC), y muestran que las clases de vegetación (radiativamente diferentes) están diferenciadas en función de su localización en el espacio espectral y tres métricas: inclinación, longitud e intercepción de los patrones cuasi-lineales en ese espacio. Así, estos autores favorecen la hipótesis de firmas espectrales multi-angulares únicas para las clases de vegetación.

EXPERIMENTOS CON SISTEMAS ARBOLADOS

Para analizar si la información spectral multi-angular puede discriminar los diferentes tipos de vegetación, particularmente los arbolados, se diseñó un experimento tipo maqueta (superficie de suelo con vegetación de altura o edad pequeña, como una

shape can be characterized as a function of being concave ($k > 1$), convex ($k < 1$) or linear ($k = 1$). This approach has been used by Nolin (2004).

Bolaños *et al.* (2007) propose a new family of BRDF models that simplify the modeling problem by requiring a single parameter.

Vegetation classification with multi-angular spectral information

It has been argued that multi-angular spectral information improves vegetation classification (Bicheron *et al.*, 1997; Asner, 2000). Using multi-angular information in a single spectral band has given results similar to that from multiple spectral bands with a single angle of vision, although discrimination of vegetation classes is strongly affected by differences at the spectral level and, to a lesser degree, at the angular level (Barnsley *et al.*, 1997).

Zhang *et al.* (2002a and b) argue that vegetation classification should be based on principles of consistency among the radiative properties of the classes and their distinctive spectral signatures, maintaining spatial resolution fixed (mixture problem). These authors use spectral spaces (R - NIR) and show that vegetation classes (radiatively different) are differentiated in function of their location in the spectral space and of three measurements in that space: slope, length and interception of the quasi-linear patterns. These authors thus favor the hypothesis of unique multi-angular spectral signatures for vegetation classes.

EXPERIMENTS WITH TREE SYSTEMS

To test whether the multi-angular spectral information can differentiate vegetation types, particularly tree stands, a maquette-type experiment (soil surface with low or young vegetation, as in an architectural maquette) was designed at the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, State of México, in September 2006. The experiment used five forest species with relatively homogeneous plants (Table 1). BRDF was measured in each forest species using three geometric configurations (Figure 1).

For each species and geometric configuration, two soils (light and dark) were used as background and measurements were made during three or four zenith (and azimuthal) angles of illumination. In all cases, we used BRDF equipment especially designed to measure 0 to 50° angles of vision, with increments of 10°, in both the direction of solar illumination and the opposite direction, thus obtaining 12 measurements by effects of vision (nadir angles were measured

maqueta arquitectónica) en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, en septiembre de 2006. En el experimento se usaron cinco especies forestales, con plantas relativamente homogéneas (Cuadro 1). En cada especie forestal se midió BRDF usando tres configuraciones geométricas (Figura 1).

Para cada especie y configuración geométrica se usaron dos suelos (claro y oscuro) como fondo y se realizaron mediciones durante tres o cuatro ángulos cenitales (y acimutales) de iluminación. En todos los casos se usó un equipo de BRDF diseñado ex profeso para medir ángulos de visión de 0 a 50°, con incrementos de 10°, tanto en la dirección de iluminación solar como en la contraria, obteniéndose 12 mediciones por efectos de visión (los ángulos de nadir se midieron dos veces: iluminación y sombreado). El equipo de BRDF mantiene relativamente constante el área de observación reduciendo la altura de medición (para el ángulo de visión del radiómetro) en función del ángulo de visión. El radiómetro usado fue el modelo FR Jr de ASD^{MR}, que es un radiómetro hiperspectral con rango de medición de 350 a 2500 nm y resolución de proceso de 1 nm. En todas las mediciones se tomaron fotografías de la cobertura de la vegetación con una cámara digital modelo Cybershot DSC-V1 de SonyTM. Con estas fotografías se obtuvo la cobertura aérea (COB) de la vegetación, con un proceso de

twice: illuminated and shaded). The BRDF equipment maintains the observation area relatively constant, reducing the measuring height (for the radiometer field of view) in function of the angle of vision. The radiometer used was the ASDTM model FR Jr, which is a hyperspectral radiometer with a measurement range of 350 to 2500 nm and processing resolution of 1 nm. During all of the measurements photographs were taken of the vegetation cover with a SonyTM digital camera, model Cybershot DSC-V1. With these photographs, vegetation canopy cover (COB) was obtained with a process of supervised classification using soil or foliage objects in the digital photographs as control points.

In addition, measurements were taken for the case of soil alone (COB = 0) to have four different cover-types for each species analyzed. Soil as background for the vegetation was used to observe effects of backgrounds with contrasting reflectances (optical properties of the material under the plants that define multiple interactions of the photons that collide with it and bounce back to intercept the plant foliage again). In natural systems, the background under tree systems (forests) varies seasonally (Miller *et al.*, 1997) and has its own BRDF (Peltonieri *et al.*, 2005).

The hyperspectral reflectances are converted into spectral TM sensor (Landsat 5) bands using the corresponding spectral response functions, after

Cuadro 1. Características de las especies forestales del experimento.
Table 1. Characteristics of the forest species used in the experiment.

Nombre común	Nombre científico	Tipo de hoja	Altura [†] (cm)	Diámetro de copa [†] (cm)	Diámetro basal [†] (mm)
Oyamel	<i>Abies religiosa</i>	Acicular	38.1 (9.3)	24.4 (2.7)	5.74 (0.6)
Fresno	<i>Fraxinus uhdei</i>	Ancha	75.6 (11.5)	37.8 (7.9)	9.7 (1.5)
Encino	<i>Quercus rugosa</i>	Ancha	73.9 (9.7)	21.6 (3.9)	6.92 (0.9)
Pino greggii	<i>Pinus greggii</i>	Acicular	34.2 (3.0)	14.5 (3.1)	4.8 (0.4)
Pino montezumae	<i>Pinus montezumae</i>	Acicular	8.9 (4.1)	41.8 (3.7)	11.34 (1.4)

[†] Los datos entre paréntesis son la desviación estándar.

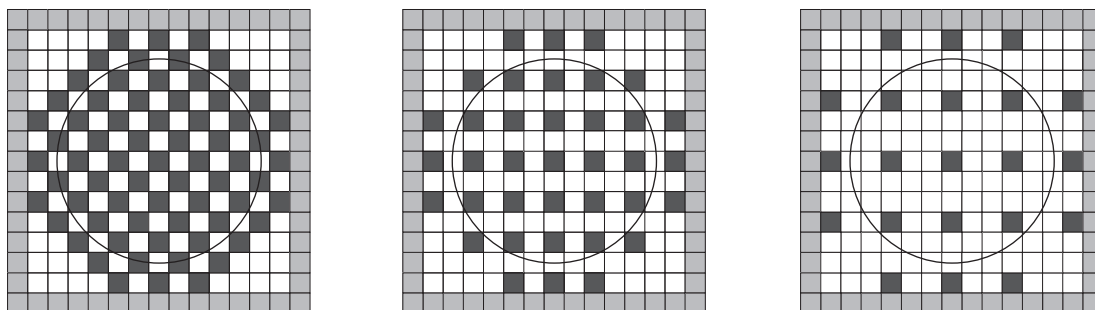


Figura 1. Configuraciones geométricas de los experimentos, donde cada cuadro sombreado representa la posición de una planta y los cuadros con sombreado más claro del perímetro no son usados. El círculo en la figura corresponde al área de medición.

Figure 1. Geometric configurations of the experiments, in which each shaded square represents the position of a plant; the lighter shaded squares of the perimeter were not used. The circle inside the figure delimits the measurement area.

clasificación supervisada usando puntos de control de los objetos suelo o follaje en la fotografía digital.

Además se efectuaron mediciones para el caso de sólo suelo (COB = 0), para tener cuatro coberturas diferentes para cada especie analizada. El uso de suelo como fondo de la vegetación fue para ver los efectos de fondos con reflectancias contrastantes (propiedades ópticas del material debajo de las plantas, que define las interacciones múltiples de los fotones que chocan contra éste y rebotan para interceptar de nuevo al follaje de las plantas). En los sistemas naturales el fondo de los sistemas arbolados (bosques) varía estacionalmente (Miller *et al.*, 1997) y tiene su propia función BRDF (Peltonieri *et al.*, 2005).

Las reflectancias hiperespectrales se convirtieron a bandas espectrales del sensor TM (Landsat 5) usando las funciones de respuesta espectrales correspondientes, después de eliminar valores con problemas de vapor de agua atmosférico detectables fácilmente por el rompimiento del patrón espectral (caso de la banda de 1000 nm) o por el ruido asociado a la señal del radiómetro. En el Cuadro 2 se muestra las bandas espectrales usadas.

Modelo de la BRDF usado

El modelo de la BRDF utiliza un solo parámetro (Bolaños *et al.*, 2007), basado en la siguiente convención para el ángulo de visión:

$$\begin{aligned} \theta_v &= -\theta_v \text{ si } \begin{cases} 0 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 90 \\ 270 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 360 \end{cases} \\ \theta_v &= +\theta_v \text{ si } \{90 < \text{abs}(\phi_s - \phi_v) < 270\} \end{aligned} \quad (1)$$

donde, la geometría de iluminación está definida por el ángulo cenital solar (θ_s) y el ángulo acimutal solar (ϕ_s), mientras que la geometría de visión está definida por el ángulo cenital de visión (θ_v) y el ángulo acimutal de visión (ϕ_v).

Dado que durante las mediciones de reflectancia hubo muchas variaciones en las componentes de la radiación solar (difusa y directa) y que el mayor contraste en las reflectancias angulares se da en la dirección contraria a la de la iluminación o θ_v positivo (Barnsley *et al.*, 1997), en este trabajo sólo se analiza el modelo de la BRDF para ese caso (Bolaños *et al.*, 2007):

$$\begin{aligned} \chi &= (90 - \theta_v) + \theta_s \\ \chi &= 90 + bRn \end{aligned} \quad (2)$$

eliminating problematic values from atmospheric water vapor, which are easily detected as breaks in the spectral pattern (case of the 1000 nm band) or by noise associated with the radiometer signal. Table 2 shows the spectral bands used.

BRDF model used

The BRDF model uses a single parameter (Bolaños *et al.*, 2007), based on the following convention for angle of vision:

$$\begin{aligned} \theta_v &= -\theta_v \text{ if } \begin{cases} 0 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 90 \\ 270 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 360 \end{cases} \\ \theta_v &= +\theta_v \text{ if } \{90 < \text{abs}(\phi_s - \phi_v) < 270\} \end{aligned} \quad (1)$$

where illumination geometry is defined by the solar zenith angle (θ_s) and the solar azimuthal angle (ϕ_s), while vision geometry is defined by the zenith vision angle (θ_v) and the azimuthal vision angle (ϕ_v).

Given that during reflectance measurements there were many variations in the components of solar radiation (diffuse and direct) and that the greatest contrast in angular reflectances occurs in the opposite direction from that of illumination, or positive θ_v (Barnsley *et al.*, 1997), in this study we will analyze only the BRDF model for this case (Bolaños *et al.*, 2007):

$$\begin{aligned} \chi &= (90 - \theta_v) + \theta_s \\ \chi &= 90 + bRn \end{aligned} \quad (2)$$

where Rn is a normalized reflectance, multiplied by $\cos(\chi)$, and χ is an angular position variable that reduces BRDF complexity by using angular symmetries.

ANALYSIS OF RESULTS

Figure 2 shows the adjustment of the BRDF model for the case of ash trees, COB = 91.76%, $\theta_s = 14.4^\circ$,

Cuadro 2. Características de las bandas espectrales usadas.
Table 2. Characteristics of the spectral bands used.

Banda	Rango espectral (micrómetros)	Centro de banda (micrómetros)
A (azul)	0.450 - 0.515	0.485
V (verde)	0.525 - 0.605	0.570
R (rojo)	0.630 - 0.690	0.660
IRC (infrarrojo cercano)	0.780 - 0.900	0.840
IRM1 (infrarrojo medio 1)	1.550 - 1.750	1.650
IRM" (infrarrojo medio 2)	2.090 - 2.350	2.220

donde, Rn es una reflectancia normalizada, multiplicada por $\cos(\chi)$, y χ es una variable angular de posición que reduce la complejidad de la BRDF al usar simetrías angulares.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra el ajuste del modelo de la BRDF para el caso del fresno, $COB = 91.76\%$, $\theta_s = 14.4^\circ$ y en la Figura 3 el caso del suelo desnudo claro, $\theta_s = 56.1^\circ$. En ambos casos la regresión lineal fue forzada a tener una ordenada al origen de 90° . Los ajustes del modelo analizado de la BRDF fueron adecuados ($R^2 > 0.98$) para la gran mayoría de los casos, mostrando que la BRDF puede ser aproximada en forma simple al usar simetrías angulares. Resultados similares fueron encontrados para el caso de pastizales (Bolaños *et al.*, 2007).

Dado que las pendientes b de la función BRDF de las bandas espectrales están en función del ángulo cenital (y acimutal) solar, una forma de compactar (generalizar) la función BRDF es analizar la relación entre estas pendientes, dejando el ángulo cenital solar implícito. En este estudio las relaciones entre las b de la banda del R y del IRC fueron consideradas, aunque las relaciones entre el resto de las bandas presentan patrones similares al de éstas.

Para analizar las BRDF, en forma independiente del ángulo cenital solar, se usó la relación entre las pendientes del modelo BRDF de las bandas del R e IRC :

$$b \text{ del } IRC = A + B(b \text{ del } R) \quad (3)$$

El uso de sólo las bandas del R e IRC es debido a que este par de bandas espectrales se presenta en prácticamente todos los sensores remotos a bordo de plataformas espaciales y en el alto contraste entre estas dos bandas para el caso de la vegetación (Tucker, 1979).

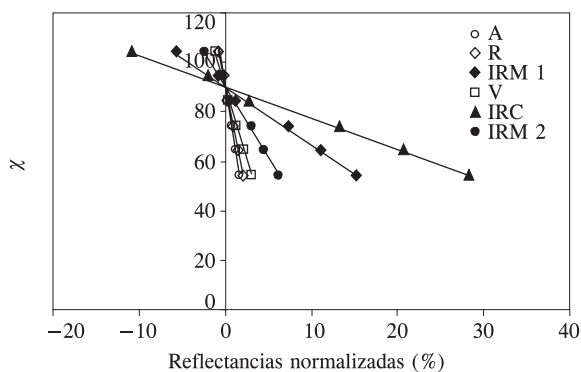


Figura 2. Ajuste del modelo de la BRDF para el fresno.
Figure 2. BRDF model adjustment for ash trees.

and Figure 3, the case of light bare soil, $\theta_s = 65.1^\circ$. In both cases linear regression was forced to have an intercept of 90° . The adjustments to the analyzed BRDF model were adequate ($R^2 > 0.98$) for the bulk of the cases, showing that BRDF can be approximated in a simple way using angular symmetries. Similar results were found for the case of grasslands (Bolaños *et al.*, 2007).

Given that the b slopes of the BRDF of the spectral bands are in function of the solar zenith (and azimuthal) angle, one way to compact (generalize) the BRDF function is to analyze the relationship among these slopes, leaving the solar zenith angle implicit. In this study, the relationships of the b slopes of the R and NIR bands were considered, although the relationships with the other bands have similar patterns.

To analyze BRDFs, independently of the solar zenith angle, the relationship among the slopes of the BRDF model of the R and NIR bands was used:

$$b \text{ of } IRC = A + B(b \text{ of } R) \quad (3)$$

The reason only R and NIR bands are used is that this pair of spectral bands is present in practically all remote sensors aboard spatial platforms and the sharp contrast they have for the case of vegetation (Tucker, 1979).

Figure 4 shows relationship (3) for the case of ash trees. Although the adjustments were reasonable ($R^2 > 0.9$) for the cases analyzed, the linear model proposed can be considered a consequence of the generalized BRDF model (Bolaños *et al.*, 2007).

Figure 5 shows the variation of the B slopes, relationship (3), in function of canopy cover for the species analyzed and the case of light soil. The same information for the case of dark soil is shown in Figure 6.

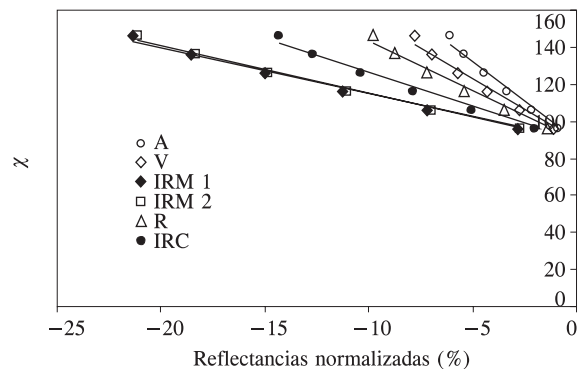


Figura 3. Ajuste del modelo de la BRDF para el suelo desnudo claro.
Figure 3. BRDF model adjustment for light bare soil.

En la Figura 4 se muestra la relación (3) para el caso del fresno. Aunque los ajustes resultaron razonables ($R^2 > 0.9$) para los casos analizados, el modelo lineal propuesto puede considerarse como una consecuencia del modelo de la BRDF generalizado (Bolaños *et al.*, 2007)

En la Figura 5 se muestra la variación de las pendientes B, relación (3), en función de la cobertura aérea, para las especies analizadas y el caso del suelo claro. En la Figura 6 se muestra esta misma información para el caso del suelo oscuro.

En las Figuras 5 y 6 se usó un polinomio de segundo grado para ajustar la relación entre B y COB, sólo para mostrar patrones. El uso de la pendiente B, relación (3), está de acuerdo en que este parámetro captura las diferencias producto de cambios en la iluminación solar. El análisis de las Figuras 5 y 6 muestra que los patrones espectrales multi-angulares de los sistemas arbolados analizados son separables (se pueden clasificar correctamente), si queda fijo el tipo de suelo como fondo de la vegetación. Esta evidencia experimental soporta la idea de utilizar información espectral multi-angular para una mejor discriminación de los tipos de vegetación naturales, particularmente los arbolados.

El caso de que el fondo de la vegetación varíe (caso normal), dejando fija la cantidad de vegetación, hay zonas de traslape de información (confusión en términos de clasificaciones), que no permiten separar las señales usando la información espectral multi-angular (Figuras 7 y 8). Esto se da particularmente para el caso de coberturas aéreas baja y no se presenta si la cobertura aérea aumenta.

En las Figuras 7 y 8 se muestra que, independientemente del tipo de fondo (suelo) de la vegetación, los patrones espectrales angulares compactados de las especies analizadas muestran dos formas: cóncavos y

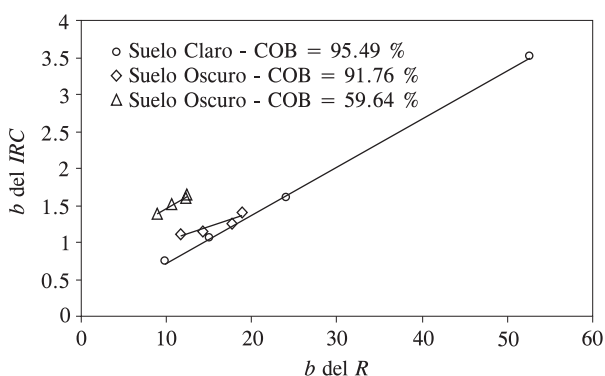


Figura 4. Ajuste del modelo entre las pendientes b para varios ángulos cenitales solares.

Figure 4. Adjustment of the model between b slopes for several solar zenith angles.

In Figures 5 and 6, a second degree polynomial was used to adjust the relationship between B and COB, only to show patterns. The use of the B slope, relationship (3), is in agreement in that this parameter captures the differences produced by changes in solar illumination. The analysis of Figures 5 and 6 show that the multi-angular spectral patterns of the tree systems analyzed are separable (they can be classified correctly) if the soil type as background to the vegetation remains fixed. This experimental evidence supports the idea of using multi-angular spectral information to better discriminate types of natural vegetation, particularly trees.

In the case that the background of the vegetation varies (normal case), and the amount of vegetation is fixed, there are overlapping zones of information (confusion in terms of classifications) that do not permit signals to be separated when using multi-angular spectral information (Figures 7 and 8). This occurs particularly in the case where there is little canopy cover, but does not happen if canopy cover increases.

Figures 7 and 8 show that, regardless of the background (soil) type, the compact angular spectral patterns of the species analyzed exhibit two shapes: concave and convex, thus defining a path of analysis of multi-angular spectral signals that can be used in a manner similar to that proposed by Pinty *et al.* (2002) and Gobron *et al.* (2002).

To put in perspective the problem of classifying tree systems using a classical spectral approach, the *R-NIR* space for the species analyzed is shown in Figure 9 (only the case of angles of vision in the direction opposite that of illumination), with light soil in the background and all of the canopy covers analyzed by species. Major overlapping of information is observed, and so species classification is very problematic.

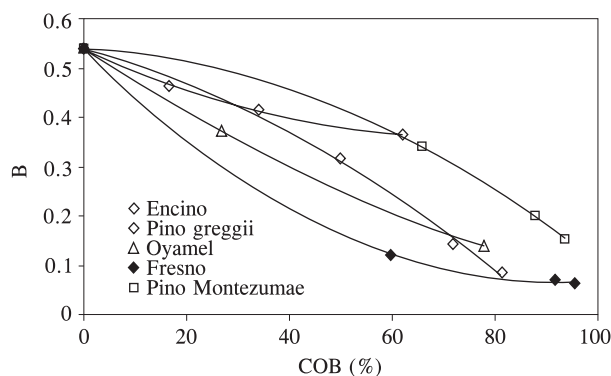


Figura 5. Relación entre la pendiente B y COB para suelo claro.

Figure 5. Relationship between the B slope and COB for light soil.

convexos, definiendo así un camino de análisis de las señales espectrales multi-angulares que puede usarse en forma similar a la propuesta por Pinty *et al.* (2002) y Gobron *et al.* (2002).

Para tener una perspectiva del problema de clasificación de sistemas arbolados usando un enfoque clásico espectral, en la Figura 9 se muestra el espacio del *R-IRC* para las especies analizadas (sólo el caso de ángulos de visión contrarios al de iluminación), teniendo como fondo un suelo claro y usando todas las coberturas aéreas analizadas por especie. Se observa que hay importantes traslapes de información, por lo que la clasificación de especies es muy problemática.

En la Figura 10 se presenta la información de la Figura 9, pero utilizando reflectancias normalizadas, asociadas al modelo de la BRDF discutido. Se observa que los patrones espectrales son más separables usando algoritmos de discriminación basados en análisis angulares lineales, por lo que puede inferirse que con el formateo angular, normalización, de los espacios espectrales puede obtenerse una mejoría en las clasificaciones de la vegetación, cuando menos en los extremos.

CONCLUSIONES

Partiendo de una discusión del uso de la información espectral multi-angular para clasificar y caracterizar a la vegetación, se han analizado las diferentes propuestas teóricas que soportan esta estrategia, así como los modelos de la función de distribución bidireccional de las reflectancias (BRDF).

Usando un modelo simplificado de la BRDF, dependiente de un solo parámetro, se han analizado los resultados de un experimento de sistemas arbolados en maquetas, donde se realizaron mediciones de las reflectancias variando los ángulos cenitales de visión

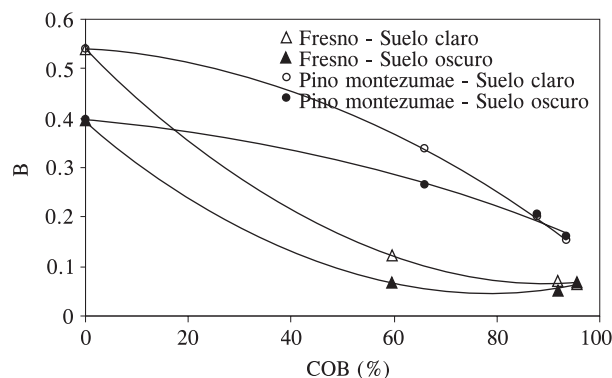


Figura 7. Efecto del suelo en la diferenciación de fresno y pino montezumae.

Figure 7. Effect of soil in differentiating ash from montezumae pine.

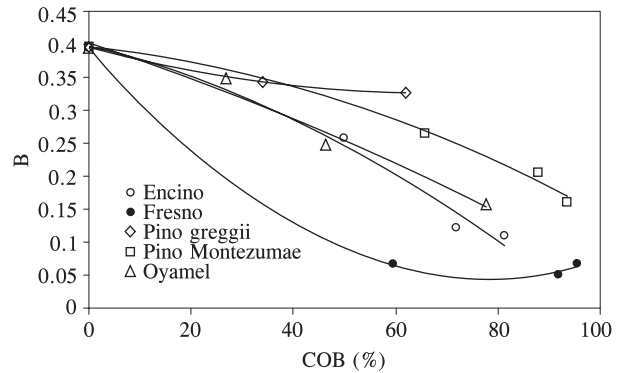


Figura 6. Relación entre la pendiente B y COB para suelo oscuro.

Figure 6. Relationship between B slope and COB for dark soil.

Figure 10 presents the information from Figure 9, but using normalized reflectances associated with the BRDF model discussed. It can be observed that the spectral patterns are more separable using discrimination algorithms based on linear angular analyses, and thus it can be inferred that with the angular format, normalization, of the spectral spaces, improved vegetation classifications can be obtained, at least in the extremities.

CONCLUSIONS

Based on a discussion of the use of multi-angular spectral information for classifying and characterizing vegetation, we analyzed different theoretical proposals that support this strategy, as well as bidirectional reflectance distribution function (BRDF) models.

Using a simplified BRDF model, dependent on a single parameter, we analyzed the results of an experiment with tree systems in maquettes, in which reflectances were measured with varying zenith angles

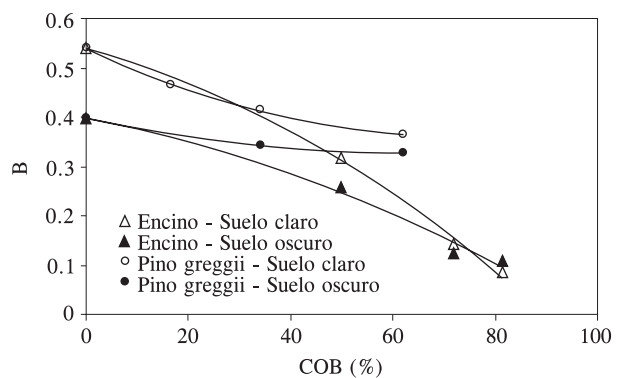


Figura 8. Efecto del suelo en la diferenciación de encino y pino greggii.

Figure 8. Effect of soil in differentiating oak from greggii pine.

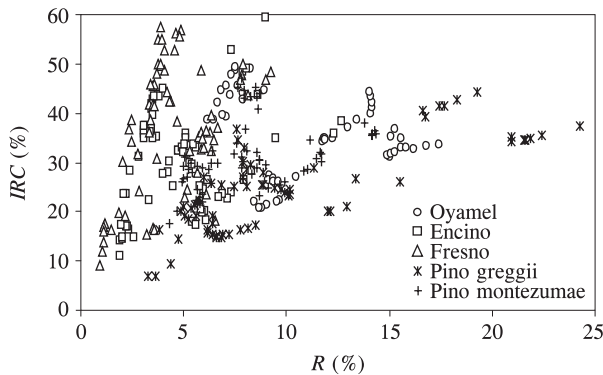


Figura 9. Espacio del R -IRC para las especies arbóreas analizadas.

Figure 9. R -NIR space for the tree species analyzed.

y de iluminación. El modelo ajustado de la BRDF resultó adecuado para todas las bandas del sensor TM (Landsat 5), determinadas por la convolución de las mediciones hiperespectrales a las de este sensor usando sus funciones de respuesta.

La información del modelo de la BRDF fue compactada analizando las pendientes para las bandas del R e IRC , con el ángulo cenital solar implícito, para poder analizar los patrones de esta aproximación en función de la cobertura aérea de las cinco especies forestales. Los resultados mostraron que, dejando el suelo del fondo de la vegetación fijo, las señales espectrales multi-angulares son separables, por lo que la estrategia propuesta podría usarse para clasificar sistemas arbolados. En el caso de que el suelo varíe (sus propiedades ópticas), entonces se presenta confusión en la información espectral multi-angular, para el caso de coberturas aéreas bajas, reduciéndose este problema a medida que la cobertura aérea se incrementa.

Finalmente, es necesario enfatizar que los análisis realizados y conclusiones obtenidas están restringidos al diseño experimental utilizado, por lo que se requiere su revisión con datos de mediciones realizadas sobre sistemas naturales. Este último esquema está en progreso por el grupo de investigación usando un helicóptero de control remoto equipado con un radiómetro y cámara de video digital, controlando el resto de los factores que inciden en los valores de las reflectancias.

LITERATURA CITADA

- Alvarez, R., R. Bonifaz, R. S. Lunetta, C. García, G. Gómez, R. Castro, A. Bernal, and A. L. Cabrera. 2003. Multitemporal landcover classification of Mexico using Landsat MSS imagery. *Int. J. Remote Sensing* 24: 2501-2514.
- Asner, G. P. 2000. Contributions of multi-view angle remote sensing to land-surface and biogeochemical research. *Remote Sensing Rev.* 18: 137-162.

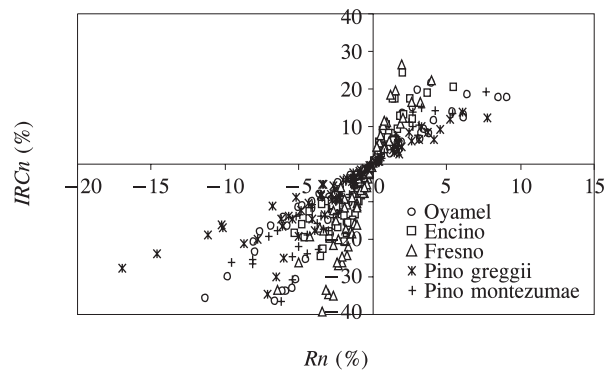


Figura 10. Espacio del Rn - $IRCn$ para las especies arbóreas analizadas.

Figure 10. Rn - $NIRn$ for the tree species analyzed.

of vision and illumination. The adjusted BRDF model had adequate results for all of the bands of the TM sensor (Landsat 5), determined by the convolution of the hyperspectral measurements to those of this sensor using its response functions.

The information from the BRDF model was compacted, analyzing the slopes for the R and NIR bands with the implicit solar zenith angle to enable us to analyze the patterns of this approximation in function of the canopy cover of five forest species. The results showed that, when the soil background of the vegetation is fixed, the multi-angular spectral signals are separable, and therefore the proposed strategy can be used to classify tree systems. In the case of soil variation (in optical properties), there is confusion in the multi-angular spectral information, when canopy covers are sparse, but confusion decreases when canopy cover increases.

Finally, it is necessary to emphasize that the analyses and conclusions of this study are limited to the experimental design used, and thus require reviewing with measurement data taken over natural systems. This work is in progress by the research group using a remote control helicopter equipped with a radiometer and video digital camera and controlling the other factors that influence reflectance values.

—End of the English version—



- Bicheron, P., M. Leroy, and F. M. Breon. 1997. Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of earth reflectances (POLDER) instrument, *J. Geophysics Res.* 102: 29517-29531.
- Bolaños, M., F. Paz, E. Palacios, E. Mejía, y A. Huete. 2007. Modelación de los efectos de la geometría sol-sensor en la reflectancia de la vegetación. *Agrociencia* 41: 527-537.
- Carpenter, G. A., S. Gomal, S. Macomber, S. Martens, C. E. Woodlock, and J. Franklin. 1979. A neural network method for efficient vegetation mapping. *Remote Sensing Environ.* 70: 326-338.
- Cayuela, L., J. D. Golicher, J. Salas Rey, and J. M. Rey Benayas. 2006. Classification of a complex landscape using Dempster-Schafer theory of evidence. *Int. J. Remote Sensing* 27: 1951-1971.
- Daniels, A. E. 2006. Incorporating domain knowledge and spatial relationships into land cover classifications: a rule-based approach. *Int. J. Remote Sensing* 27: 2949-2975.
- Diner, D. J., G. P. Asner, R. Davies, Y. Knyazhikin, J. P. Muller, A. W. Nolin, B. Pinty, C. B. Schaaf, and J. Stroeve. 1999. New directions in earth observing: scientific applications of multiangle remote sensing. *Bull. Meteorol. Soc.* 80: 2209-2228.
- Foody, G. M. 1996. Approaches for the production and evaluation of fuzzy land cover classification from remotely-sensed data. *Int. J. Remote Sensing* 17: 1317-1340.
- Friedl, M., and C. Brodley. 1997. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environ.* 1: 399-409.
- Gobron, N., B. Pinty, M. M. Verstraete, J. L. Widlowski, and D. J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements-Part II: joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40: 1574-1592.
- Hapke, B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory. *J. Geophysics Res.* 86: 3039-3054.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend, B. N. Holben, and C. J. Tucker. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing* 6: 1271-1381.
- Kimes, D. S. 1983. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics* 22: 1364-1372.
- Knyazikhin, Y., J. V. Martonchik, R. B. Myneni, D. J. Diner, and S. W. Running. 1998a. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Theory J. Geophysics Res.* 103: 32257-32275.
- Knyazikhin, Y., J. V. Martonchik, D. J. Diner, R. B. Myneni, M. Verstraete, B. Pinty, and N. Gobron. 1998b. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-correct MISR data. *Theory. J. Geophysics Res.* 103: 32239-32256.
- Li, X., and A. H. Strahler. 1985. Geometrical-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 23: 705-721.
- Li, X., and A. H. Strahler. 1992. Geometrical-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30: 276-292.
- Lucht, W., and J. L. Roujean. 2000. Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multiangle satellite sensor observations. *Remote Sensing Rev.* 18: 343-380.
- Miller, J. R., H. P. White, J. M. Chen, D. R. Peddle, G. McDermid, R. A. Fournier, P. Shepherd, I. Rubinstein, J. Freemanle, R. Soffer, and E. LeDrew. 1997. Seasonal change in understory reflectance of boreal forests and influence on canopy vegetation indices. *J. Geophysics Res.* 102: 29475-29482.
- Minnaert, M. 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysics J.* 93: 403-410.
- Myneni, R. B., and D. L. Williams. 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI, *Remote Sensing Environ.* 49: 200-211.
- Nemani, R., and S. W. Running. 1997. Land cover characterization using multitemporal red, near-ir and thermal-ir data from NOAA/AVHRR. *Ecol. Applications* 7: 79-90.
- Nicodemus, F. E., J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis. 1977. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. NBS Monogr. No. 160, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce. 52 p.
- Nolin, A. W. 2004. Towards retrieval of forest cover density over snow from the multi-angle imaging spectroradiometer (MISR). *Hydrological Processes* 18: 3623-3636.
- Paz, F., E. Palacios, M. Bolaños, L. A. Palacios, M. Martínez, E. Mejía y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Peltonieri, J. I., S. Kaasalainen, J. Näränen, M. Rautiainen, P. Stenberg, H. Smolander, S. Smolander, and P. Voipio. 2005. BRDF measurement of understory vegetation in pine forests. Dwarf shrubs, lichen, and moss. *Remote Sensing Environ.* 94: 343-354.
- Pinty, B., J. L. Widlowski, N. Gobron, M. M. Verstraete, and D. J. Diner. 2002. Uniqueness of multiangular measurements - Part I: an indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40: 1560-1573.
- Rahman H., B. Pinty, and M. M. Verstraete. 1993. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2. Semiempirical surfaces model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. *J. Geophysics Res.* 98: 20791-20801.
- Ranson, K. J., C. S. T. Daughtry, L. L. Biehl, and M. E. Bauer. 1985. Sun-view effects on reflectance factors of corn canopies. *Remote Sensing Environ.* 18: 147-161.
- Ross, J. K. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dr. W. Junk Publishers, Norwell, Mass. 392 p.
- Roujeau, J. L., M. Leroy, and P. Y. Deschamps. 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophysics Res.* 97: 20455-20468.
- Running, S. W., T. R. Loveland, L. L. Pierce, R. R. Nemani, and E. R. Hunt. 1995. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. *Remote Sensing Environ.* 51: 39-48.
- Seto, K. C., and R. K. Kaufmann. 2005. Using logit models to classify land cover and land-cover change from Landsat Thematic Mapper. *Int. J. Remote Sensing* 26: 563-577.
- Staylor, W. F., and J. T. Suttles. 1986. Reflection and emission models for deserts derived from NIMBUS 7 ERB scanner measurements. *J.0 Climate Application Meteorol.* 25: 196-202.
- Strahler, A. H., and D. L. B. Jupp. 1991. Modeling bidirectional reflectance of forests and woodlands using Boolean models and geometric optics. *Remote Sensing Environ.* 34: 153-166.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- Walthall, C. L., J. M. Norman, J. M. Welles, G. Campbell, and B. Blad. 1985. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetation canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics* 24: 383-387.
- Wanner W., X. Li, and A. H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *J. Geophysics Res.* 100: 21077-21089.
- Yun, O., and M. Jianwen. 2006. Land cover classification based on tolerant rough set. *Inter. J. Remote Sensing* 27: 3041-3047.

Zhang, Y., Y. Tian, R. B. Myneni, and Y. Knyazikhin. 2002a. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. I: empirical arguments. *Remote Sensing Environ.* 80: 418-434.

Zhang, Y., N. Shabanov, Y. Knyazikhin, and R. B. Myneni. 2002b. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. II: theoretical arguments. *Remote Sensing Environ.* 80: 435-446.