

Factor de la reflectancia bi-cónica en especies vegetales contrastantes: modelación de los ángulos cenitales

Factor of bi-conical reflectance in contrasting vegetable species: modeling of zenithal angles

Alejandro Cano González¹, Fernando Paz^{2*}, Ma. Isabel Marin², Eliezer López², José Chávez²,
Martín Bolaños² y José Luis Oropeza²

¹ INIFAP, Campo Experimental Edzná. Nhoxaxé 341. 24000 Campeche, Campeche, México.

² Colegio de Postgraduados, Carretera México- Texcoco km 36.5. 56230 Montecillo; Texcoco, México.

* Autor responsable (ferpazpel@gmail.mx)

RESUMEN

La información multi-angular de las reflectancias de las clases de la vegetación natural ha sido planteada, para su discriminación, bajo diferentes enfoques de caracterización. Aunque en apariencia este enfoque permite definir en forma confiable firmas espectrales multi-angulares típicas, su uso generalizado no ha sido analizado. En este trabajo se presenta un modelo de los efectos del ángulo cenital de visión e iluminación en las reflectancias y se valida en un conjunto de experimentos de ocho especies vegetales con arquetipos contrastantes más suelo desnudo, bajo condiciones de iluminación-visión bi-cónicas. Los resultados muestran que el modelo propuesto es robusto y confiable, por lo que puede usarse en forma operacional. Los análisis realizados para el efecto del suelo y la densidad de plantas muestran que hay importantes zonas de confusión (traslape de información) entre las especies, al considerar efectos combinados para diferentes ángulos acimutales. Estos resultados ponen en duda el uso en forma generalizada de la información espectral multi-angular y solo justifican este enfoque de clasificación si se dejan fijos el fondo de la vegetación y la densidad de plantas (cantidad de follaje).

Palabras clave: clasificación, CCRF, modelación cenital, especies únicas, sensores remotos.

SUMMARY

The multi-angular reflectance information has been proposed for discrimination of classes of natural vegetation under different characterization approaches. Although apparently this method enables reliable definition of typical multi-angular spectral signatures, its widespread use has not been analyzed. This paper presents a model of the effects of viewing and illumination zenith angle and lighting on reflectance and is validated in a set of experiments with eight contrasting plant species plus bare ground, under bi-conical vision lighting conditions. The results show that the proposed model is robust and reliable and can thus be used operationally. Analyses to determine the effect of soil and plant density show that there are important areas of confusion (overlapping information) between species when considering combined effects for different azimuthal angles. These results challenge the widespread use of multi-angular spectral information and justify this approach only if the vegetation background and plant density (amount of foliage) are fixed.

Index words: classification, CCRF, zenithal modeling, unique species, remote sensing.

Cita recomendada:

Cano González, A., F. Paz, M. I. Marin, E. López, J. Chávez, M. Bolaños y J. L. Oropeza. 2018. Factor de la reflectancia bi-cónica en especies vegetales contrastantes: modelación de los ángulos cenitales. *Terra Latinoamericana* 36: 105-119.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.226>

Recibido: abril de 2017. Aceptado: febrero de 2018.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 36: 105-119.

INTRODUCCIÓN

Los sensores remotos a bordo de plataformas espaciales brindan una oportunidad para caracterizar y clasificar la vegetación natural en forma espacialmente continua y con tiempos de visita al mismo sitio, que van de horas hasta menos de un mes. De esta forma, la tecnología satelital ofrece un enorme potencial para obtener productos cartográficos de la vegetación a costos muy bajos y con la ventaja de obtener actualización en periodos cortos. No obstante lo anterior, las clasificaciones de vegetación realizadas con sensores remotos todavía muestran problemas serios de estabilidad temporal y de confusión entre clases. Esta situación es mayormente producto de la utilización de enfoques empíricos de clasificación basados en supuestos, generalmente implícitos, que no son viables: homogeneidad espacial, temporal, angular y espectral; principalmente.

El sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) ha sido ampliamente utilizado con la finalidad de clasificar vegetación, con resolución espacial a nadir de 1.1 km, disponible en diferentes versiones desde 1978. Actualmente, el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), con una resolución a nadir de 250, 500 y 1000 m, en operación desde 2000, es usado intensivamente en el mapeo de la vegetación a escalas locales 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, lo que genera un problema de geometría sol-sensor.

Debido al sistema de barrido de la superficie terrestre, los sensores AVHRR y MODIS introducen un efecto simultáneo de geometría sol-sensor y escala (el tamaño de los píxeles se incrementa con el ángulo de visión; esto es, los píxeles que se alejan de la línea orbital ortogonal a la superficie incrementan sus dimensiones producto de vistas oblicuas del sensor). En el otro extremo, el sensor Multi-Angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) mantiene fijas las dimensiones de los píxeles a través de un muestreo de barrido temporal a lo largo de su línea orbital.

Un enfoque teórico de clasificación de la vegetación, actualmente operacional usando los sensores MODIS y MISR, es el desarrollado por el grupo de la Universidad de Boston (Lotsch *et al.*, 2000; Zhang *et al.*,

2002a y b), cuya base parte de una clasificación de tipos de vegetación usando propiedades radiativas y geométricas típicas de la mezcla suelo-vegetación para seis biomas distintivos en esos términos (Myneni *et al.*, 1997). Los biomas radiativamente definidos son usados para condicionar la estimación de parámetros biofísicos usando información espectral (Knyazikhin *et al.*, 1998a y b). Aunque resulta atractivo, este enfoque usa simplificaciones (biomas tipo y propiedades asociadas con poca variación) que limitan su uso en términos operacionales a escalas locales o regionales.

Se ha argumentado que la información espectral multi-angular mejora la clasificación de la vegetación (Bicheron *et al.*, 1997; Asner, 2000; Diner *et al.*, 1999 y 2005). Barnsley *et al.* (1997) y Hyman y Barnsley (1997) muestran que el utilizar información multi-angular en una sola banda espectral, en la clasificación de la vegetación, da resultados similares a utilizar información de múltiples bandas espectrales con un solo ángulo de visión; aunque estos autores reconocen que la separación de clases de vegetación está fuertemente influenciada por las diferencias a nivel espectral y, en menor medida, a nivel angular. Gerard (2003) plantea que el uso de un ángulo de visión relacionado con la información a obtener, da resultados similares al uso de dos ángulos de visión.

En una perspectiva teórica y estadística, 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 (rojo o R e infrarrojo cercano o IRC, por ejemplo) 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. Con ello se favorece la hipótesis de firmas espectrales multi-angulares únicas para las clases de vegetación (los seis biomas definidos por Myneni *et al.*, 1997).

En este trabajo, se utilizó un modelo de la geometría sol-sensor de un parámetro único para analizar los patrones angulares de diferentes arquetipos de vegetación, contrastantes entre sí y se revisó si la información espectral angular puede diferenciar las clases estudiadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelos Espectrales Multi-Angulares

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. La caracterización de las mezclas suelo-vegetación ha sido estudiada experimentalmente por muchos autores (Kimes, 1983; Ranson *et al.*, 1985; Bolaños *et al.*, 2007) y ha servido de base para plantear que la información espectral multi-angular puede ser usada para una mejor discriminación y caracterización de los cultivos y ecosistemas.

En la actualidad, los modelos de la función de distribución de la reflectancia bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés) más usados, son los basados en kernels (funciones matemáticas) 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; Wanner *et al.*, 1995; Lucht y Roujean, 2000) o no lineales (Staylor y Suttles, 1986; Rahman *et al.*, 1993). Un modelo de la BRDF requiere de, al menos, tres parámetros (Engelsen *et al.*, 1996): uno relacionado con la amplitud de la señal, otro con la dependencia con respecto a los ángulos cenitales solares y de visión y, un último con las variaciones acimutales. Si se requiere modelar en forma más fina los rasgos de la BRDF (pico de retro-iluminación o Hot Spot y el pico especular) es necesario incorporar más parámetros al modelo (Engelsen *et al.*, 1996). En un caso de pixel por pixel de una imagen satelital, los requerimientos de datos de los modelos actuales de la BRDF deben utilizar hipótesis restrictivas (homogeneidad temporal o espacial) para contar con información para caracterizar las BRDF.

La clasificación de la vegetación natural mediante modelos de la BRDF ha sido realizada a través de los parámetros ajustados en dichos modelos. En el caso de los kernels lineales (isotrópicos, volumétricos y geométricos), los coeficientes ajustados han sido utilizados para buscar relaciones con la cobertura aérea y estructura de la vegetación (altura, composición, etc.) para diferentes tipos de vegetación (Gerard y North, 1997; Lovell y Graetz, 2002; Gao *et al.*, 2003). Aunque los resultados muestran relaciones congruentes entre los parámetros de los modelos de kernels lineales

de la BRDF y la estructura de la vegetación, éstos muestran confusión en las clasificaciones y errores de estimación altos en las variables asociadas a las clases de vegetación.

Una alternativa al uso de los coeficientes de los modelos de kernels de la BRDF es el uso de índices espectrales angulares de la vegetación (Sandmeier *et al.*, 1998; Sandmeier y Deering, 1999; Lacaze *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002a y b), que en algunos casos son contruidos a partir de los coeficientes de los kernels (Gao *et al.*, 2003). Este tipo de enfoque presenta los mismos problemas que el caso de los coeficientes directos de los modelos de kernels.

Modelación del Ángulo Cenital de Iluminación y Visión

Recientemente se ha introducido una nueva familia de modelos de la BRDF que simplifica fuertemente el problema de modelación, ya que solo requieren de un parámetro para su caracterización (Bolaños *et al.*, 2007; Bolaños y Paz, 2010). Este tipo de modelación es discutida en lo siguiente y constituye la base del análisis de los experimentos mostrados en este trabajo.

La BRDF de una pequeña superficie de área δA está definida como la razón de la radianza incremental dejando la superficie a través de un ángulo sólido infinitesimal, en la dirección definida por el vector de visión $\Omega(\theta_v, \phi_v)$, sobre la irradianza incremental de la dirección definida por el vector de iluminación, $\Omega'(\theta_s, \phi_s)$, (Nicodemus *et al.*, 1977), tal como se define en la Ecuación 1 y se muestra en la Figura 1.

$$BRDF(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{dL_e(\theta_v, \phi_v)}{dE_i(\theta_s, \phi_s)}, \text{ en sr}^{-1} \quad (1)$$

donde: dL_e es la radianza incremental reflejada desde la superficie en la dirección del ángulo de visión Ω ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$), dE_i es la irradianza incremental que llega desde la dirección de iluminación Ω' ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$), θ_s es el ángulo cenital solar, ϕ_s es el ángulo acimutal solar, θ_v es el ángulo cenital de visión y ϕ_v el ángulo acimutal de visión.

El modelo de Bolaños *et al.* (2007) utiliza un plano de simetría para el IRC, de tal forma que los patrones angulares de la reflectancia se simplifican y pueden modelarse con un solo parámetro. Este modelo no fue aplicable a la banda del R.

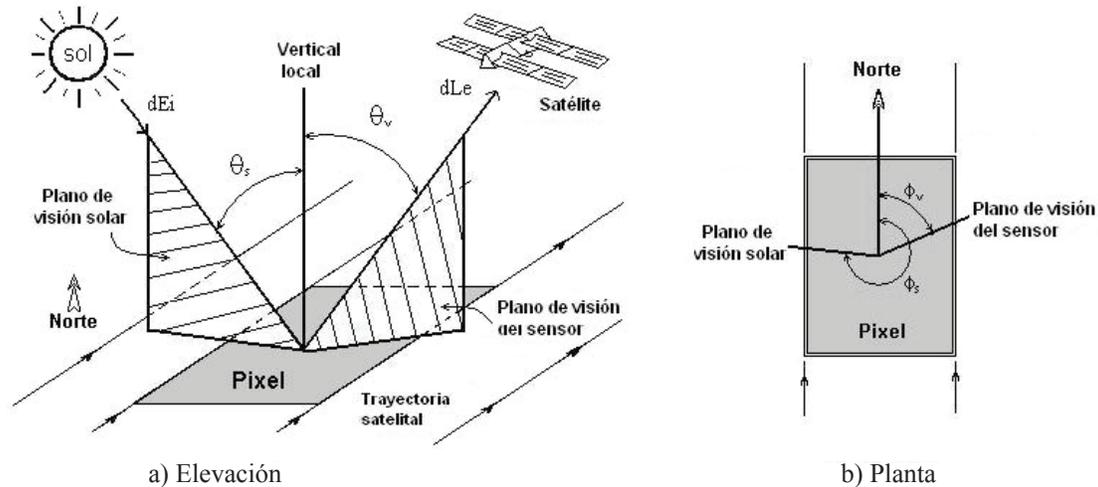


Figura 1. Geometría sol-sensor de iluminación y visión.

Para desarrollar un modelo general de la BRDF aplicable a todas las bandas espectrales, se utilizó un plano de simetría genérico propuesto por Paz y Bolaños (2006¹) y Bolaños y Paz (2010). El plano de simetría seleccionado fue $\chi = 90 - \theta_v + \theta_s$, donde θ_v no tiene signo. Las reflectancias normalizadas están definidas como $R_n = R \cos(\chi)$ (más adelante se utiliza R para referirse a solo la banda del rojo). El modelo propuesto para todas las bandas del espectro electromagnético de onda corta es un modelo lineal simple:

$$X = a + bR_n \quad (2)$$

donde se utiliza un valor de $a = 90$ para obtener un punto adicional y poder estimar b usando un esquema similar al del IRC del modelo de Bolaños *et al.* (2007). El uso de la función $\cos(\chi)$ como factor multiplicativo de R permite definir un punto del espacio $R_n - \chi$, ya que $\cos(90^\circ) = 0$, por lo que $R_n = 0$ en $\chi = 90^\circ$ ($\theta_v = \theta_s$; es decir, el plano del Hot Spot).

Experimentos bajo Condiciones Controladas

La discriminación de clases de vegetación que utiliza información espectral multi-angular fue analizada en un experimento bajo condiciones controladas de laboratorio, donde se simulaban diferentes configuraciones geométricas de especies vegetales con arquetipos contrastantes. Para esto se utilizaron plantas pequeñas de especies arbóreas y

arborescentes y plantas adultas para pastizales, después de podarse. En el Cuadro 1 se muestran las características principales de las plantas usadas en los experimentos, donde están consideradas especies con diferentes tipos de hoja.

Las plantas individuales de cada especie, empacadas en bolsas de plástico abiertas y sin estrés aparente, fueron acomodadas en tres densidades de acuerdo con los arreglos mostrados en la Figura 2. Los arreglos de plantas fueron colocados en un cajón de madera de dimensiones de $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, con un sistema de mallas de $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ para la colocación de las plantas individuales dentro de bolsas de plástico abiertas, de tal manera que no se inclinaran al apoyarse sobre el fondo del cajón y se mantuvieran verticales. Para analizar el efecto del fondo de los arreglos de plantas, arriba de la malla superior del cajón se colocaron tiras de madera a la altura del inicio de los tallos de las plantas y sobre estas tiras, selladas en los tallos, se colocó suelo previamente seleccionado y con una granulometría menor a 2 mm .

Cada círculo relleno representa la posición de una planta y los cuadros perimetrales más claros solo contienen suelo. El círculo que se ubica al centro de los cuadros es el área de visión del sensor hiperespectral con un ángulo de visión a nadir. El cajón de madera conteniendo los arreglos de plantas forma parte del sistema goniométrico (SIGO-CP) de medición de reflectancias multi-angulares diseñado (Cano *et al.*, 2014).

¹ Paz, F. y M. Bolaños. 2006. Modelación de la BRDF en la vegetación: reporte final, GRENASER-COLPOS, Reporte Noviembre para AGROASEMEX, 66 p.

Cuadro 1. Características de las especies vegetales usadas en el experimento.

Especie	Nombre común	Tipo de hoja	Altura	Diámetro del tallo [†]		Diámetro del dosel [†]	
				----- cm -----			
<i>Abies religiosa</i>	Oyamel	Aciculada	34.34 (5.33)	0.70 (0.14)	24.26 (6.44)		
<i>Acacia retinodes</i>	Mimosa	Latifoliada	38.88 (7.80)	0.64 (0.15)	26.09 (6.17)		
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	Aciculada	36.67 (3.85)	0.64 (0.17)	23.87 (5.97)		
<i>Quercus rugosa</i>	Encino	Latifoliada	33.83 (6.45)	0.60 (0.27)	20.17 (5.05)		
<i>Fraxinus uhdei</i>	Fresno	Latifoliada	31.08 (5.11)	0.60 (0.14)	20.74 (4.30)		
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Palo dulce	Microlatifoliada	25.29 (10.7)	1.99 (1.42)	15.90 (5.17)		
<i>Pinus greggii</i>	Pino	Aciculada	33.49 (4.35)	0.60 (0.09)	14.13 (2.29)		
<i>Bouteloua gracilis</i>	Navajita	Lineal	18.31 (3.20)	2.55 (1.17)	14.02 (4.73)		

[†] Los datos entre paréntesis son las desviaciones estándar.

A nadir, el radiómetro hiperspectral (350 a 2500 nm) usado (modelo FR Jr de ASD^{MR}) observó un área circular de diámetro 0.41 m. El radiómetro tiene un campo instantáneo de visión de 25° ($\alpha = 12.5^\circ$, ver Figura 3). Adicionalmente al radiómetro, se montó en el SIGO-CP una cámara fotográfica digital (Cybershot DSC-V1 de Sony^{MR}) y un termómetro radiativo (modelo ITRS de Apogee^{MR}). Estos instrumentos fueron usados para realizar mediciones cenitales a intervalos de 10°, desde 0° a 60°, y en las direcciones acimutales de 0° a 360°, con intervalos de 10°. La dirección acimutal de 0/360° de medición coincide con el acimut de la fuente de iluminación, por lo que las direcciones acimutales representan en realidad diferencias acimutales en la convención de 0-360°. La fuente de iluminación utilizada fue un reflector de aluminio de cuerpo negro de la marca Tecno Lite^{MR} equipado con una lámpara de halógeno de cuarzo de 500 watts de la marca Osram^{MR} (modelo 64706). Los filamentos de estas lámparas son

de tungsteno y el vidrio que recubre el filamento está hecho de cuarzo, siendo el halógeno el gas que rellena el tubo o bombilla. La lámpara se montó en una base telescópica elevada a 3 m y su ángulo cenital (θ_s) fue de 38°. Estas condiciones de iluminación se mantuvieron constantes para todas las mediciones de las especies analizadas.

Las propiedades ópticas de los fondos de los arreglos de plantas contribuyen a la BRDF del sistema suelo-vegetación. Por ejemplo, en los bosques, el fondo varía estacionalmente (Miller *et al.*, 1997) y tiene su propia función BRDF (Peltoniemi *et al.*, 2005). Así, en cada arreglo de plantas por especie vegetal se consideró el uso de dos fondos: suelo claro (franco arenoso) y oscuro (franco arcilloso). Los suelos fueron colocados sobre las tiras de madera a la altura del inicio de los tallos de las plantas, con un espesor de 1 cm. En cada suelo se consideraron dos condiciones de humedad: suelo secado a la intemperie y suelo húmedo producto

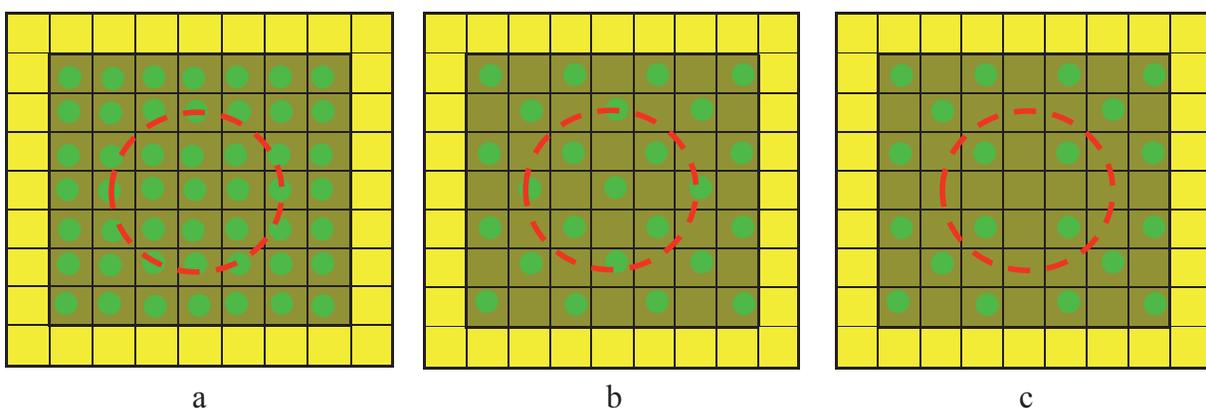


Figura 2. Densidades usadas: a) alta (49 plantas), b) media (25 plantas) y c) baja (12 plantas).

de un evento de precipitación. Para este último caso se utilizó un simulador de lluvia (Morin *et al.*, 1967), donde el cajón del SIGO-CP con el arreglo de plantas se transportó a la base del simulador, en la misma área experimental, y se sometió a un evento de precipitación con un disco de 75 mm durante 5 min con la llave del simulador abierta al máximo, lo cual aporta una lámina de precipitación de 8.3 mm. El evento de precipitación fue utilizado para analizar el efecto de la lluvia en el suelo del fondo de la vegetación, inmediatamente después del evento. La reflectancia del suelo después del evento de precipitación se incrementó en proporción a la energía de las gotas de lluvia (Goldshleger *et al.*, 2002). El agua residual en las hojas de las plantas introduce errores en las mediciones del sistema suelo-vegetación, por lo cual los patrones de su BRDF resultan más erráticos que los de suelo seco.

En la Figura 3 se muestra la geometría de medición para el radiómetro montado en el arco cenital del SIGO-CP (Cano *et al.*, 2014), donde el área de visión para ángulos cenitales oblicuos forma una elipse, cuyo centro está desplazado del centro del cajón una distancia $d_{pc} = d_c - d_v$.

En el Cuadro 2 se muestran las configuraciones geométricas asociadas a las mediciones cenitales de visión del arreglo de plantas.

Debido a que el SIGO-CP tiene un grado de libertad adicional al acimutal y cenital, relacionado con el desplazamiento radial del sensor del radiómetro, se diseñó una estrategia de adquisición de datos dentro del área global de medición de 41.2×41.2 cm ($2a \times 2b$ del Cuadro 2). En el caso de $\theta_v = 60^\circ$, el sensor quedó

muy cerca de la vegetación, produciendo errores de medición, por lo cual este ángulo no fue considerado en la modelación de la función BRDF asociada a cada arreglo de plantas y fondo usado.

El área del experimento fue aislada con paños de tela negra y el techo pintado de negro, para evitar contribuciones de radiación difusa y aproximar una fuente de iluminación con un ángulo cónico de solo radiación directa.

El procedimiento general de determinación de los factores de reflectancia para cada especie en particular consistió de los siguientes pasos: a) colocación del arreglo de densidad alta de plantas en el cajón de madera del SIGO-CP; b) colocación del suelo (oscuro o claro) del fondo de los arreglos de plantas; c) optimizar el radiómetro con el panel de referencia colocado a nadir (ASD, 1999); d) realizar el conjunto de mediciones acimutales y cenitales; e) aplicar evento de precipitación al suelo usando el simulador de lluvia; f) optimizar el radiómetro con el panel de referencia colocado a nadir; g) realizar el conjunto de mediciones acimutales y cenitales; h) retirar el suelo mojado y colocar el otro suelo; i) repetir todo el proceso para el nuevo suelo; j) retirar el nuevo suelo; k) retirar plantas de acuerdo con la Figura 2 para establecer la densidad media; l) colocar el suelo inicial y repetir todo el proceso; m) retirar plantas para establecer la densidad baja; y n) repetir todo el proceso. Adicionalmente, se realizaron conjuntos completos de mediciones para el caso de suelo desnudo (suelos claro y oscuro, en condiciones secas y mojadas, al aplicar un evento de precipitación con el simulador de lluvias).

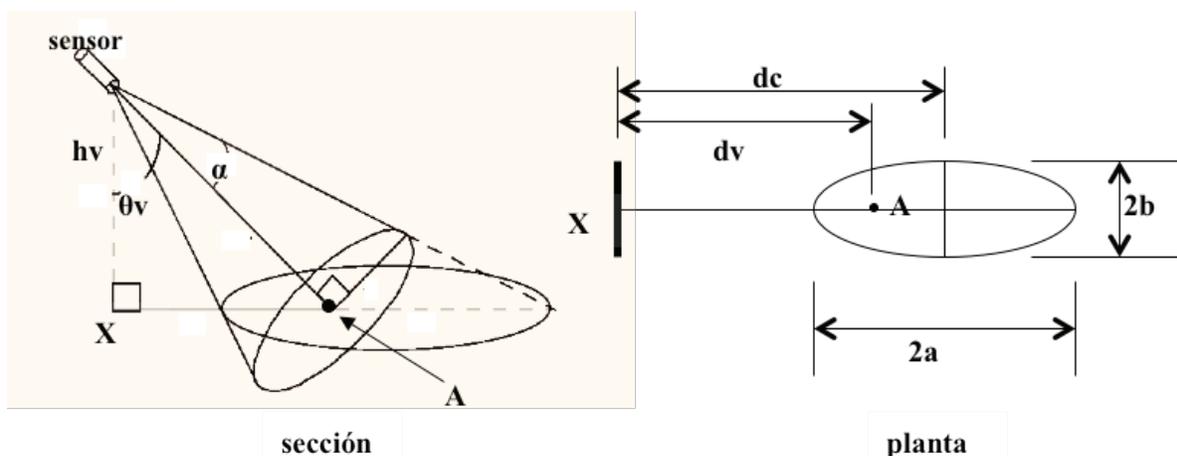


Figura 3. Geometría de medición del radiómetro montado en el arco cenital de SIGO-CP.

Cuadro 2. Configuraciones geométricas asociadas a los ángulos cenitales de visión (ver Figura 3 para la definición de las variables).

θ_v nominal	θ_v real	hv	dv	dc	2a	2b	dpc	Área
°		cm						
0.0	0.0	93.0	0.0	0.0	41.2	41.2	0.0	1335.5
10.0	10.0	87.7	15.4	16.2	40.1	39.5	0.8	1245.7
20.0	19.2	80.3	27.9	29.5	40.1	37.9	1.5	1195.5
30.0	28.1	69.2	37.0	39.4	40.0	35.3	2.4	1110.2
40.0	37.6	53.1	40.9	44.2	38.6	30.6	3.3	928.6
50.0	46.5	36.8	38.8	43.1	36.5	25.1	4.3	719.6
60.0	55.7	19.2	28.1	33.0	29.9	16.9	4.9	397.3

En cada conjunto de medición del arreglo de plantas de las especies se tomaron fotografías digitales para estimar la cobertura aérea (COB) usando un proceso de clasificación supervisada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En términos de la definición de la BRDF (Nicodemus *et al.*, 1977), ésta implica ángulos sólidos infinitesimales, por lo que no puede ser medida en la práctica. El arreglo de medición de reflectancias en condiciones de laboratorio discutido anteriormente implica la caracterización de los factores de reflectancia bi-cónicos o cónico-cónico (CCRF, por sus siglas en inglés) (Nicodemus *et al.*, 1977; Schaepman-Strub *et al.*, 2006), donde el término cónico es usado para el ángulo sólido (iluminación y visión), similar al mostrado en la Figura 3. Las mediciones de reflectancia del radiómetro hiperspectral se refieren en realidad a factores de reflectancia, los cuales son calculados en función de las propiedades ópticas de un panel de referencia (ASD, 1999).

En la Figura 3 y el Cuadro 2, la CCRF medida incorpora factores de escala (áreas de medición diferentes en función del ángulo cenital de visión), por lo que debe usarse una definición generalizada que considere la parte espacial del área de medición (Di Girolamo, 2003). Los cambios en las dimensiones de los píxeles con los ángulos de visión se presentan en los sensores AVHRR y MODIS, por lo que es importante considerar en forma explícita esta situación. En este caso, usaron la relación exponencial entre las reflectancias y los índices de área foliar (Ross, 1981),

como elementos de escala, se utilizó en una nueva definición de reflectancias normalizadas: $R_n = \ln(R) \cos(\chi)$, dejando igual el modelo de la BRDF (CCRF).

Las mediciones de reflectancia generadas (archivo de 350 a 2500 nm, muestreado a intervalos de 2 nm) fueron convertidas a las reflectancias de las bandas del sensor Landsat 5 utilizando las funciones de respuesta correspondientes. Por problemas relacionados con efectos de la atmósfera del área del experimento (vapor de agua) y de estabilidad del radiómetro, las bandas del azul y del infrarrojo medio no fueron analizadas y solo los resultados de las bandas del verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) son presentados en el presente trabajo. Los datos generados en el experimento fueron guardados en archivos etiquetados con 4 dígitos: primer dígito = especie vegetal, segundo dígito = densidad del arreglo de plantas; tercer dígito = color del suelo y cuarto dígito = humedad del suelo. El Cuadro 3 muestra la codificación usada, donde, por ejemplo, un código 2121 significa planta Mimosa, densidad alta de plantas, color oscuro del suelo y estado de humedad seco.

Patrones Angulares de la CCRF de los Experimentos

Con fines de visualización se construyeron diagramas de reflectancias en función de los ángulos cenitales y acimutales de observación. En el caso de los ángulos cenitales se utilizó la convención de que los ángulos son negativos en la dirección de iluminación y positivos en la contraria (ángulos acimutales de visión positivos en el sentido contrario a las manecillas del reloj):

Cuadro 3. Codificación de los archivos del experimento.

Nombre común	Código	Densidad de plantas	Código	Color del suelo	Código	Humedad del suelo	Código
Suelo	0	Nula	0	Claro	1	Seco	1
Oyamel	1	Alta	1	Oscuro	2	Mojado	2
Mimosa	2	Media	2				
Casuarina	3	Baja	3				
Encino	4						
Fresno	5						
Palo dulce	6						
Pino	7						
Navajita	8						

$$\theta_v = -\theta_v, \text{ si } \begin{cases} 0 \leq \text{abs}(d\phi) \leq 90 \\ 270 \leq \text{abs}(d\phi) \leq 360 \end{cases}$$

$$\theta_v = +\theta_v, \text{ si } \{90 < \text{abs}(d\phi) < 270\}$$

$$d\phi = (\phi_v - \phi_s) \quad (3)$$

Para el caso del acimut relativo el signo positivo es para los cuadrantes a la derecha acimutal (diferencia de 0° a 180°) y el negativo para la dirección contraria, en una convención de diferencias de 0° a 90°

$$d\phi = d\phi, \text{ si } d\phi < 90$$

$$d\phi = 180 - d\phi, \text{ si } 90 \leq d\phi \leq 270$$

$$d\phi = d\phi - 360, \text{ si } 270 < d\phi \leq 360 \quad (4)$$

La Figura 4 muestra el efecto del tipo de suelo (claro y oscuro) y su condición de humedad (seco y mojado) para las reflectancias de la banda del R e IRC para las plantas de Acacia. Se observa que las propiedades ópticas del suelo de fondo de la vegetación generan algunos cambios en los patrones multi-angulares de las reflectancias. En la Figura 5 se muestra el efecto en la reflectancia del R del cambio en la humedad del suelo para el caso de un suelo claro y la cobertura aérea (densidad de plantas) para el pasto Navajita, donde resulta claro que la CCRF es dependiente de estos factores. Finalmente, en la Figura 6 se muestra la CCRF de la reflectancia de la banda del R para todas las especies analizadas, dentro de un rango de cobertura aérea local a nadir de 18 al 28%. Los gráficos muestran diferencias entre las especies (mismo suelo: claro y seco), que permiten clasificarlas *a priori*.

En el caso de las coberturas aéreas, el Cuadro 4 muestra las estimaciones realizadas en las fotografías digitales, donde COB (cobertura aérea) global se refiere a la cobertura de todo el cuadro de medición (sin los cuadros del borde) del cajón del SIGO-CP y COB local nadir es la cobertura del área del círculo de medición del radiómetro a nadir (41.2 × 41.2 cm).

De las Figuras 4 a 6 resulta claro que para discriminar las especies es necesario definir una diferencia acimutal particular, así como un fondo específico y una cobertura aérea o índice de área foliar. Para poder compactar la información multi-angular de las reflectancias, se ajustó el modelo de la Ecuación (2) con $\alpha = 90$ y la transformación logarítmica para el efecto de escala.

La Figura 7 muestra los resultados obtenidos para las bandas del V, R e IRC. El error relativo medio (ERM), en %, está definido por:

$$ERM = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{R_{med} - R_{est}}{R_{med}} \right] \right\} \times 100 \quad (5)$$

donde: med se refiere a medida, est a estimada y R a reflectancia de la banda del V, R e IRC.

Los resultados de la Figura 7 muestran que el modelo multi-angular de la reflectancia por efecto de los ángulos cenitales de iluminación y visión resulta en ajustes buenos para las 8 especies y suelos analizados, con errores relativos menores al 8%.

Los ajustes del modelo multi-angular fueron hechos sin considerar el ángulo de visión a 60°, por problemas de representatividad y de cercanía a los arreglos de plantas.

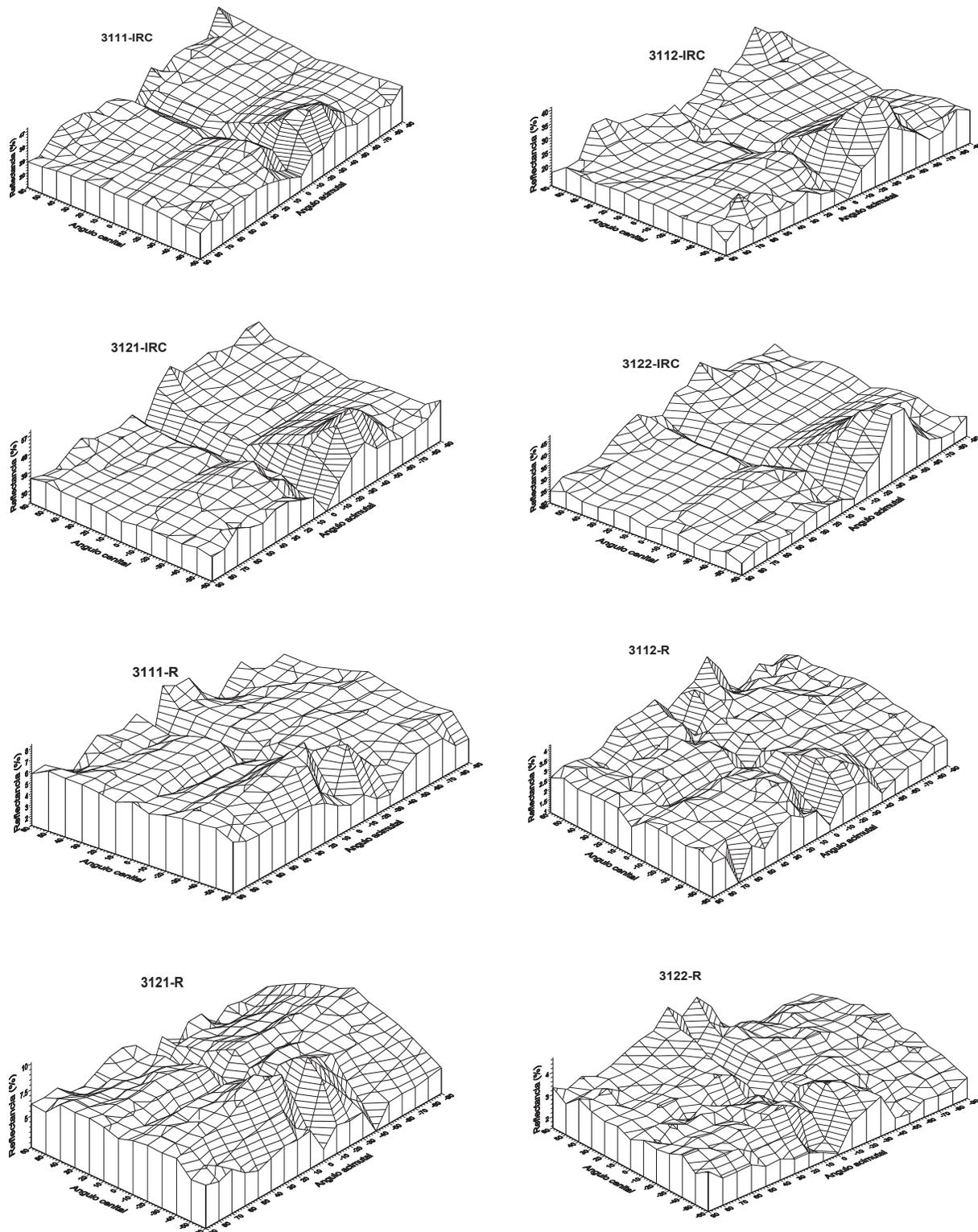


Figura 4. CCRF para las reflectancias de las bandas del R e IRC para diferentes propiedades ópticas del suelo de *Acacia retinodes*.

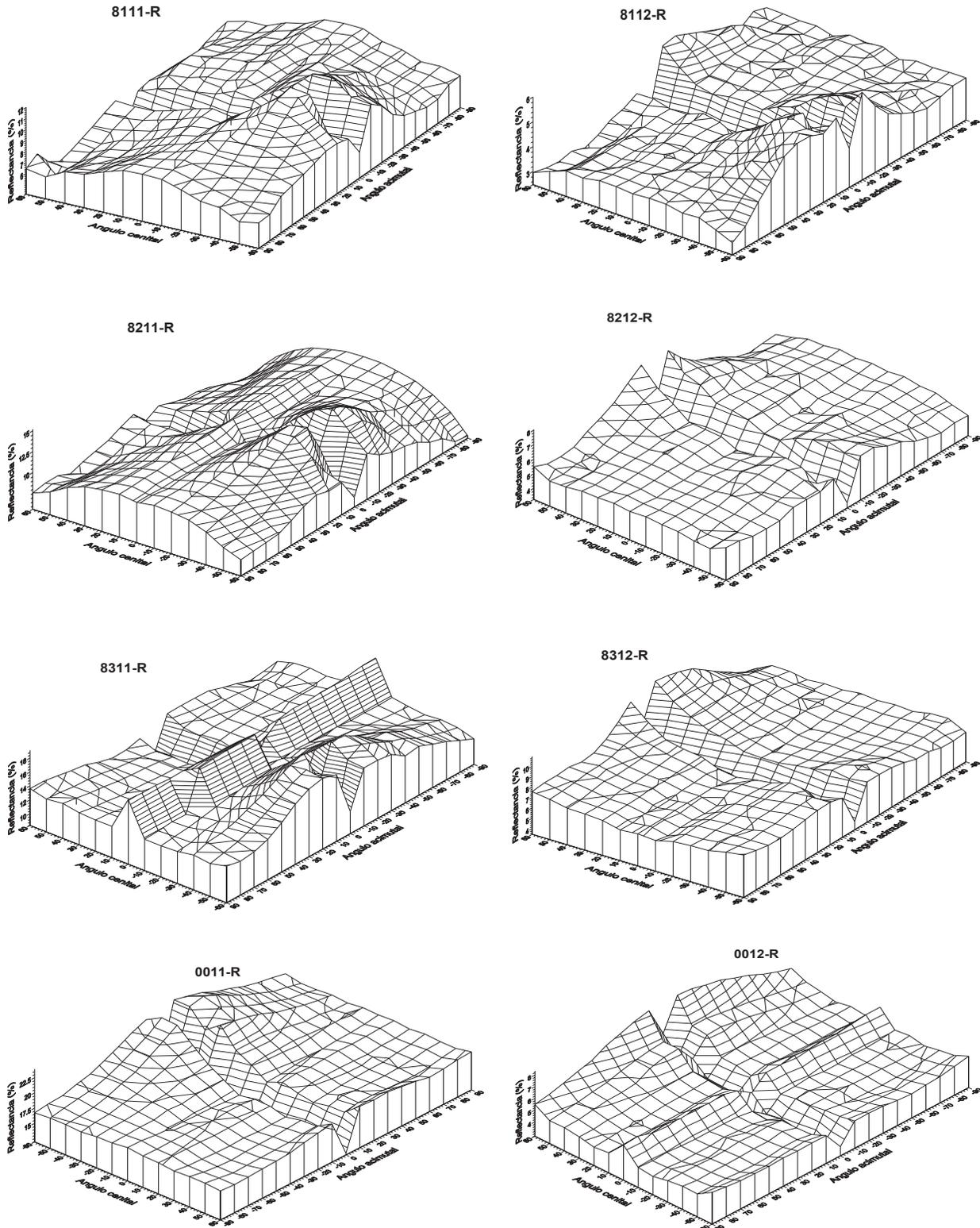


Figura 5. CCRF para las reflectancias del R para un suelo claro seco y mojado, para diferentes coberturas aéreas (densidad de plantas) para el pasto Navajita.

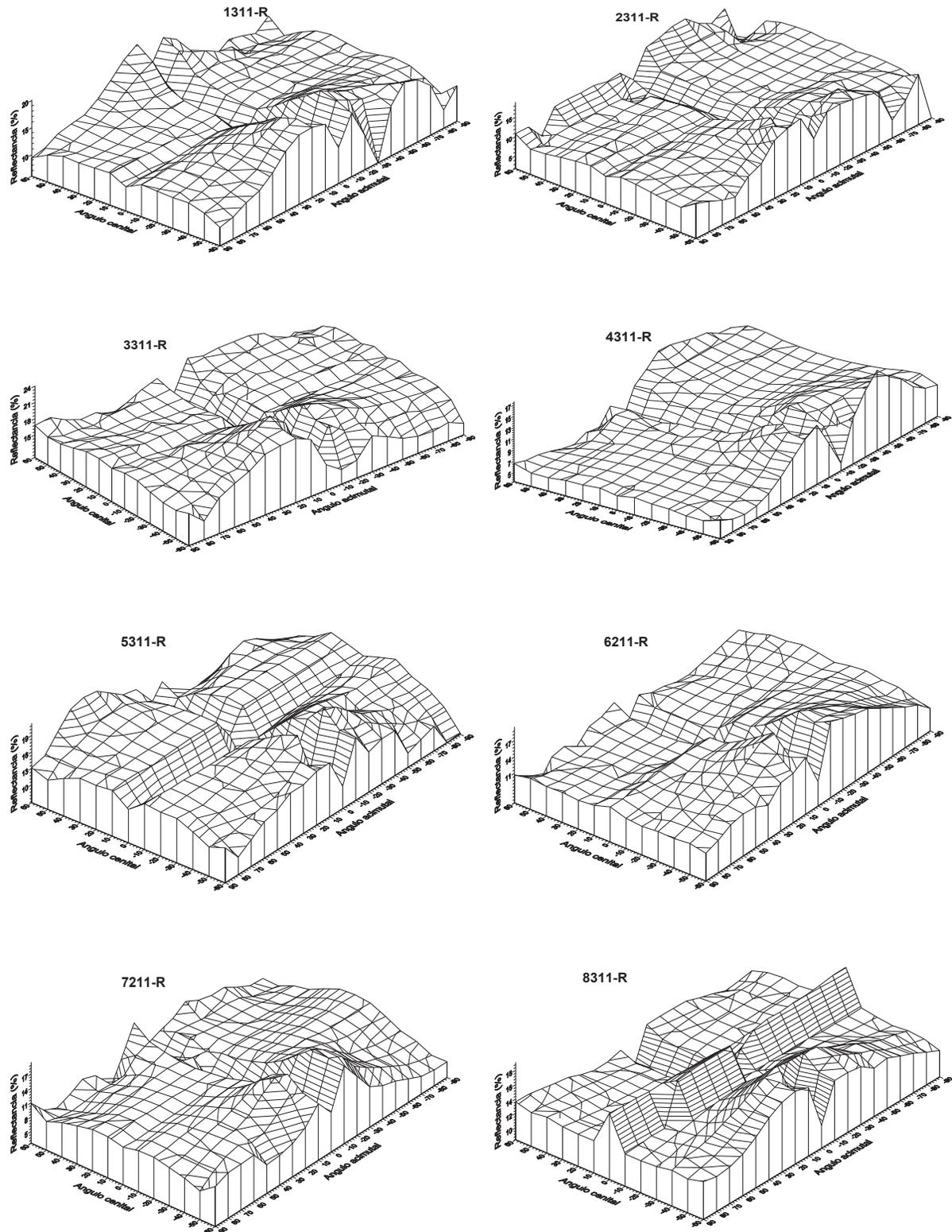


Figura 6. CCRF para las reflectancias del R para un suelo claro seco para todas las especies analizadas, dentro de una cobertura aérea del 18 al 28%.

Cuadro 4. Coberturas aéreas asociadas a las densidades de plantas.

Código	Nombre común de la especie	Densidad	COB Global	COB Local
----- % -----				
11	Oyamel	Alta	60.9	71.2
12	Oyamel	Media	37.1	56.3
13	Oyamel	Baja	25.0	28.2
21	Mimosa	Alta	56.2	65.5
22	Mimosa	Media	36.6	38.0
23	Mimosa	Baja	25.7	24.1
31	Casuarina	Alta	71.3	50.1
32	Casuarina	Media	30.6	33.5
33	Casuarina	Baja	25.5	18.0
41	Encino	Alta	74.0	68.8
42	Encino	Media	43.0	45.2
43	Encino	Baja	31.2	27.7
51	Fresno	Alta	60.8	61.3
52	Fresno	Media	37.3	40.4
53	Fresno	Baja	21.7	25.3
61	Palo dulce	Alta	45.7	41.3
62	Palo dulce	Media	28.6	21.0
63	Palo dulce	Baja	20.7	11.0
71	Pino	Alta	53.1	55.6
72	Pino	Media	23.3	26.9
73	Pino	Baja	12.2	11.4
81	Navajita	Alta	26.6	44.3
82	Navajita	Media	30.5	30.2
83	Navajita	Baja	18.0	18.4
00	Suelo	Nula	0.0	0.0

La Figura 8 muestra un gráfico polar para el parámetro b de la reflectancia del rojo para las especies con arquetipos contrastantes de plantas de Encino y Pino, con fondos de suelos claro y oscuro, cada uno en condición seca y húmeda, para tres densidades de arreglos de plantas.

Una forma de visualizar el efecto del fondo de la vegetación para especies contrastantes es el uso de un gráfico acimutal de b . La Figura 9 muestra esta situación para un suelo claro en condición seca y

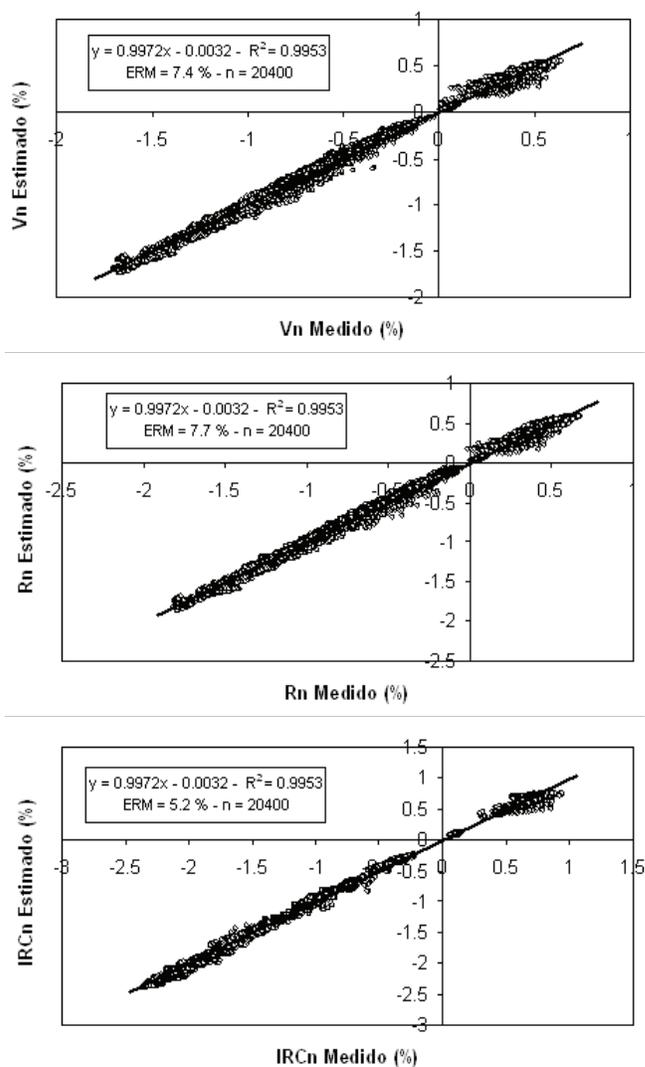


Figura 7. Ajuste del modelo multi-angular para los efectos de los ángulos cenitales de visión e iluminación para todas las especies analizadas, incluyendo los suelos.

mojada para las especies Encino-Pino y Palo Dulce-Navajita. En esta figura se omitieron el acimut de 0° y 180° , dado que el radiómetro sombrea el área de visión. Del análisis de la Figura 9, es claro que los cambios en las propiedades ópticas (humedad, en este caso) del fondo de la vegetación pueden resultar en confusión en la discriminación de especies tan contrastantes como las mostradas, dejando en claro que la información multi-angular, sin una referencia común, no es suficiente para clasificar la vegetación natural.

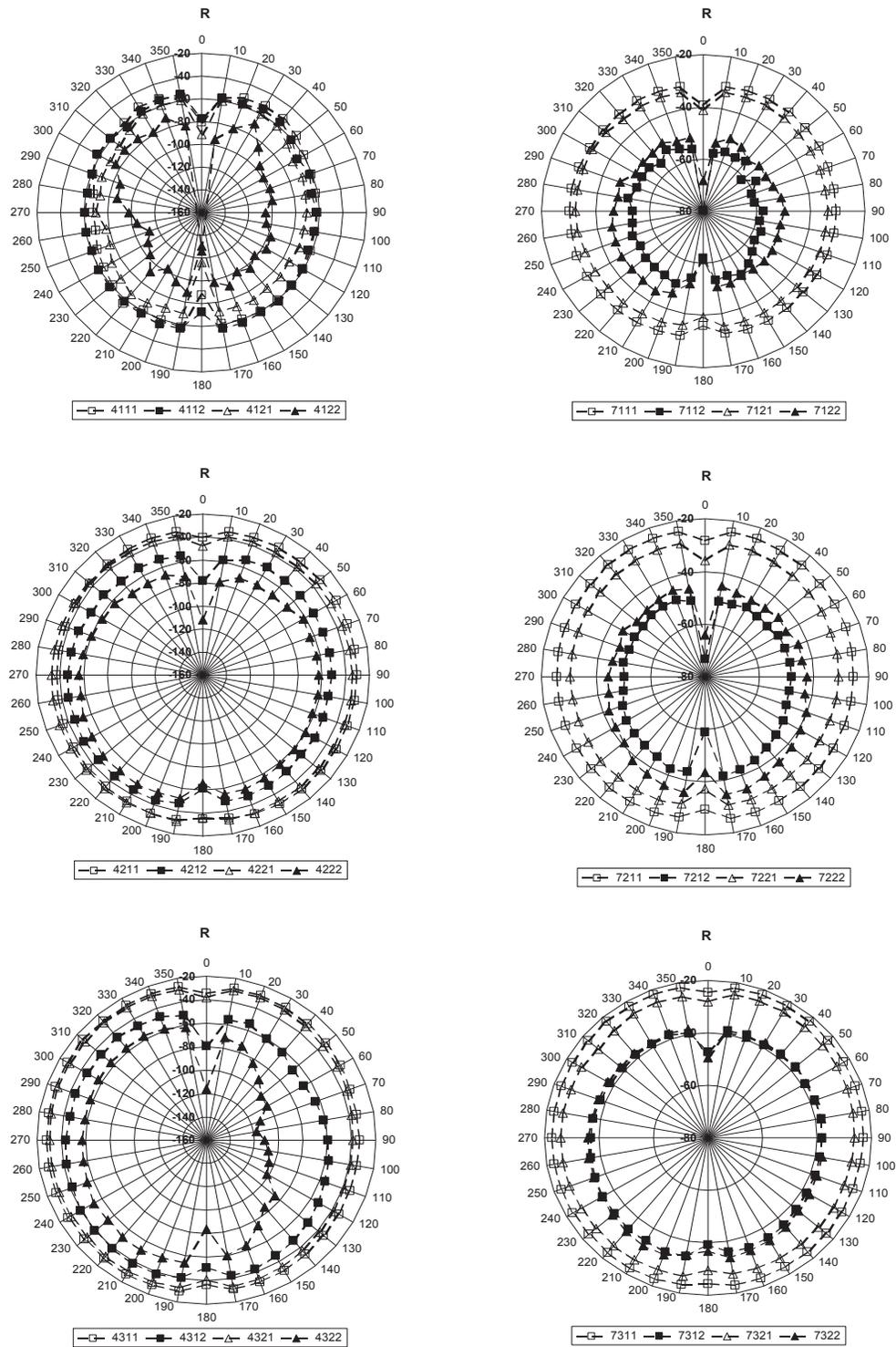


Figura 8. Gráficos polares para el parámetro b de del rojo para el caso de plantas de Encino-Pino.

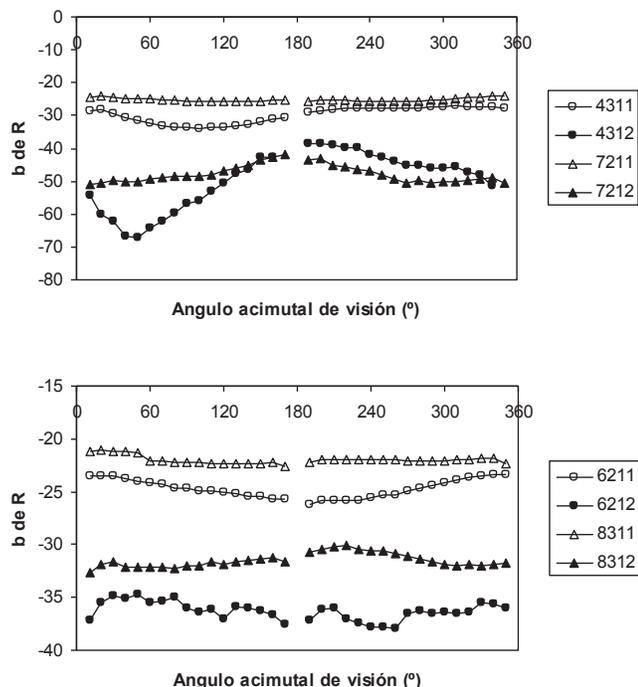


Figura 9. Gráfico acimutal de b para la reflectancia de la banda del rojo para las especies con arquetipos contrastantes de plantas de Encino-Pino y Palo Dulce-Navajita.

CONCLUSIONES

- El enfoque de utilizar biomás con propiedades geométricas tipo, incluyendo los fondos de la vegetación (Myneni *et al.*, 1997), parte de que se pueden obtener firmas espectrales multi-angulares características de éstos (Zhang *et al.*, 2002a y b), para discriminarlos. Los resultados de este trabajo muestran que los cambios en las propiedades ópticas de los suelos de fondo pueden producir confusiones en las clasificaciones basadas en la información espectral multi-angular.

- Aunque la modelación presentada permite compactar en forma paramétrica los efectos del ángulo cenital de visión e iluminación, los efectos del ángulo acimutal relativo, además de los fondos y densidades de plantas, hacen difícil una discusión de la factibilidad de clasificar la vegetación natural usando información espectral multi-angular. Si se deja fijo el fondo y la cantidad de follaje de la vegetación, la discriminación de especies es factible. No obstante, esto, en condiciones operacionales la variación de los fondos de la vegetación, así como del follaje de la vegetación está garantizada, por lo que la utilización de hipótesis de invarianza (propiedades típicas) puede conducir a grandes errores.

LITERATURA CITADA

- ASD (Analytical Spectral Devices, Inc). 1999. Technical guide. Third Edition. Analytical Spectral Devices, Inc. Boulder, CO, USA.
- Asner, G. P. 2000. Contributions of multi-view angle remote sensing to land-surface and biogeochemical research. *Remote Sens. Rev.* 18: 137-162. doi: 10.1080/02757250009532388.
- Barnsley, M. J., D. Allison, and P. Lewis. 1997. On the information content of multiple view angle (MVA) images. *Int. J. Remote Sens.* 18: 1937-1960. doi: 10.1080/014311697217963.
- Bicheron, P., M. Leroy, O. Hauteceur, and F. M. Bréon. 1997. Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of earth reflectances (POLDER) instrument. *J. Geophys. Res.* 102: 29517-29528. doi: 10.1029/97JD01330.
- Bolaños G., 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.
- Bolaños, M. y F. Paz. 2010. Modelación general de los efectos de la geometría iluminación-visión en la reflectancia de pastizales. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 1: 349-361.
- Cano, A., F. Paz, A. Zarco, M. I. Marín, E. López, J. Chávez, M. Bolaños y J. L. Oropeza. 2014. Diseño de un sistema goniométrico con tres grados de libertad para medir reflectancias en el sistema suelo-vegetación. *Terra Latinoamericana* 32: 59-68.
- Di Girolamo, L. 2003. Generalizing the definition of the bi-directional reflectance distribution function. *Remote Sens. Environ.* 88: 479-482. doi: 10.1016/j.rse.2003.07.004.
- Diner, D. J., G. P. Asner, R. Davies, Y. Knyazhiki, 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. Metereol. Soc.* 80: 2209-2228. doi: 10.1175/1520-0477(1999)080<2209:NDIEOS>2.0.CO;2.
- Diner, D. J., B. H. Braswell, R. Davies, N. Gobron, J. Hu, Y. Jin, R. A. Khan, Y. Knyazikhin, N. Loeb, J. P. Muller, A. W. Nolin, B. Pinty, C. B. Schaaf, G. Seiz, and J. Stroeve. 2005. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sens. Environ.* 97: 495-518. doi: 10.1016/j.rse.2005.06.006.
- Engelsen, O., B. Pinty, M. M. Verstraete, and J. V. Martonchik. 1996. Parametric bidirectional reflectance factor models: Evaluation, improvements and applications. Joint Research Centre, European Commission. Ispra, Italy.
- Gao, F., C. B. Schaaf, A. H. Strahler, Y. Jin, and X. Li. 2003. Detecting vegetation structure using kernel-based BRDF model. *Remote Sens. Environ.* 86: 198-205. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00100-7.
- Gerard, F. 2003. Single angle, dual angle and multi-temporal viewing: Assessing through modeling the implications for forest structure variable extraction. *Int. J. Remote Sens.* 24: 1317-1334. doi: 10.1080/01431160110040044.
- Gerard, F. F. and P. R. J. North. 1997. Analyzing the effect of structural variability and canopy gaps on forest BRDF using a geometric-optical model. *Remote Sens. Environ.* 62: 46-62. doi: 10.1016/S0034-4257(97)00070-9.

- Goldshleger, N., E. Ben-Dor, Y. Benyamini, D. Blumberg, and M. Agassi. 2002. Spectral properties and hydraulic conductance of soil crusts formed by raindrop impact. *Int. J. Remote Sens.* 23: 3909-3920. doi: 10.1080/01431160110115942.
- Hyman, A. H. and M. J. Barnsley. 1997. On the potential for land cover mapping from multiple-view-angle (MVA) remotely-sensed images. *Int. J. Remote Sens.* 18: 2471-2475. doi: 10.1080/014311697217747.
- Kimes, D. S. 1983. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Appl. Opt.* 22: 1364-1372. doi: 10.1364/AO.22.001364.
- 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-corrected MISR data. *Theory J. Geophys. Res.* 103: 32239-32256.
- 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. Geophys. Res.* 103: 32257-32275. doi: 10.1029/98JD02462.
- Lacaze, R., J. M. Chen, J. L. Roujean, and S. G. Leblanc. 2002. Retrieval of vegetation clumping index using hot spot signatures measured by POLDER instrument. *Remote Sens. Environ.* 79: 84-95. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00241-3.
- Lotsch, A., Y. Tian, M. A. Friedl, and R. B. Myneni. 2000. Land cover mapping in support of LAI and FPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: Classification methods and sensitivities to errors. *Int. J. Remote Sens.* 24: 1997-2016. doi: 10.1080/01431160210154858.
- Lovell, J. L. and R. D. Graetz. 2002. Analysis of POLDER-ADEOS data for the Australian continent: The relationship between BRDF and vegetation structure. *Int. J. Remote Sens.* 23: 2767-2796. doi: 10.1080/01431160110106131.
- Lucht, W. and J. L. Roujean. 2000. Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multiangular satellite sensor observations. *Remote Sens. Rev.* 18: 343-379. doi: 10.1080/02757250009532395.
- Miller, J. R., H. P. White, J. M. Chen, D. R. Peddle, G. McDermid, R. A. Fournier, P. Shepherd, I. Rubinstein, J. Freemantle., R. Soffer, and E. LeDrew. 1997. Seasonal change in understory reflectance of boreal forests and influence on canopy vegetation indices. *J. Geophys. Res.* 102: 29475-29482. doi: 10.1029/97JD02558.
- Morin, J., D. Goldberg, and I. Seginer. 1967. A rainfall simulator with a rotating disk. *Transactions ASAE* 10: 74-77. doi: 10.13031/2013.39599.
- Myneni, R. B., R. Ramakrishna, R. R. Nemani, and S. W. Running. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35: 1380-1393. doi: 10.1109/36.649788.
- 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. Washington, DC, USA.
- Peltoniemi, 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 Sens. Environ.* 94: 343-354. doi: 10.1016/j.rse.2004.10.009.
- 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. Geophys. Res.* 98: 20791-20801. doi: 10.1029/93JD02072.
- 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 Sens. Environ.* 18: 147-161. doi: 10.1016/0034-4257(85)90045-8.
- Ross, J. K. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk. Norwell, MA, USA.
- Roujean, 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. Geophys. Res.* 97: 20455-20468. doi: 10.1029/92JD01411.
- Sandmeier, St., Ch. Müller, B. Hosgood, and G. Andreoli. 1998. Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress. *Remote Sens. Environ.* 66: 222-233. doi: 10.1016/S0034-4257(98)00060-1.
- Sandmeier, St. and D. W. Deering. 1999. Structure analysis and classification of Boreal forests using airborne hyperspectral BRDF data from ASAS. *Remote Sens. Environ.* 69: 281-295. doi: /10.1016/S0034-4257(99)00032-2.
- Schaepman-Strub, G., M. E. Schaepman, T. H. Painter, S. Dangel, and J. V. Martonchik. 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. *Remote Sens. Environ.* 103: 27-42.
- Staylor, W. F. and J. T. Suttles. 1986. Reflection and emission models for deserts derived from NIMBUS 7 ERB scanner measurements. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 25: 196-202. doi: 10.1175/1520-0450(1986)025<0196:RAEMFD>2.0.CO;2.
- Wanner, W., X. Li, and A. H. Strahler. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *J. Geophys. Res.* 100: 21077-21089. doi: 10.1029/95JD02371.
- Zhang, Y., Y. Tian, R. B. Myneni, Y. Knyazikhin, and C. E. Woodcock. 2002a. Required consistency between biome definitions and signatures with the physics of remote sensing. I: empirical arguments. *Remote Sens. 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 Sens. Environ.* 80: 435-446.