

MODELACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA GEOMETRÍA SOL-SENSOR EN LA REFLECTANCIA DE LA VEGETACIÓN

MODELATION OF THE SUN-SENSOR GEOMETRY EFFECTS IN THE VEGETATION REFLECTANCE

Martín A. Bolaños-González¹, Fernando Paz-Pellat¹, Enrique Palacios-Vélez¹,
Enrique Mejía-Sáenz¹ y Alfredo Huete²

¹Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Carretera México-Texcoco. Km 36.5. Montecillo, Estado de México. (mejiasae@colpos.mx). ²University of Arizona. Department of Soil, Water and Environmental Sciences. 1200 E. South Campus Dr., Rm. 429 Shantz Bldg. #38 Tucson, AZ 85721-0038.

RESUMEN

La reflectancia superficial no es sólo una función de las propiedades espectrales de la radiación incidente y de la anisotropía de la superficie, sino también de la dirección desde la cual dicha superficie es iluminada y vista, es decir, depende de la geometría iluminación-visión (sol-sensor en el caso específico de imágenes de satélite) con la cual es captada. La dependencia de la reflectancia superficial en la geometría sol-sensor se describe por la Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés). Por ello, es necesario minimizar estos efectos como paso inicial para el cálculo de índices de vegetación o cualquier otra estimación realizada con base en reflectancia superficial que pretenda vincularse a características biofísicas de cultivos o vegetación natural. En esta investigación se desarrolló y evaluó un modelo que estima la reflectancia a nadir, en las bandas del Rojo (R) e Infrarrojo Cercano (IRC), con un solo dato de reflectancia obtenido con cualquier combinación de la geometría sol-sensor. El modelo propuesto se validó con datos experimentales tomados en un pastizal natural, obteniéndose resultados adecuados ($R^2=0.967$).

Palabras clave: BRDF, geometría sol-sensor, reflectancia.

INTRODUCCIÓN

La superficie terrestre refleja la luz en cantidades diferentes dependiendo del ángulo de visión con el que se observa o capta esta luz, así como del ángulo de iluminación; es decir, la reflectancia de la superficie terrestre es anisotrópica. La Función Bidireccional de Distribución de la Reflectancia (BRDF, por sus siglas en inglés) describe matemáticamente esta anisotropía, prediciendo la magnitud de la radiación reflejada en una dirección dada (Privette, 1994).

Existen muchas formas para modelar la BRDF, pero requieren al menos cinco datos de reflectancia captados con diferente geometría sol-sensor (Huete y

ABSTRACT

Surface reflectance is not only a function of the spectral properties of incident radiation and surface anisotropy, but also of the direction from which the surface is illuminated and seen; that is, it depends on the illumination-vision geometry (sun-sensor in the specific cases of satellite images) with which it is acquired. The dependence of surface reflectance on sun-sensor geometry is described by the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF). For that reason, it is necessary to minimize these effects as the first step in calculating vegetation indexes or any other estimation based on surface reflectance that intends to link bio-physical characteristics of crops or natural vegetation. In this study, a model that estimates reflectance at nadir of the red (R) and near infrared (IRC) bands with a single datum of reflectance obtained with any combination of sun-sensor geometry is developed and evaluated. The proposed model was validated with experimental data taken in a natural grassland, with which adequate results ($R^2=0.967$) were obtained.

Key words: BRDF, sun-sensor geometry, reflectance.

INTRODUCTION

The earth's surface reflects different quantities of light depending on the angle of vision with which it is observed or acquired, as well as on the angle of illumination, that is, reflectance of the earth's surface is anisotropic. The Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) describes mathematically this anisotropy, predicting the magnitude of the radiation reflected in a given direction (Privette, 1994).

There are many ways to model BRDF, but they require at least five reflectance data obtained with different sun-sensor geometries (Huete and Justice, 1999); and consequently, for a given pixel five satellite images taken over a short time (10 to 16 days) are needed. This approach assumes that atmospheric conditions, vegetation background and growth remain

Recibido: Junio, 2005. Aprobado: Abril, 2007.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 41: 527-537. 2007.

Justice, 1999), lo que implica que para un píxel dado se deberán tener cinco imágenes de satélite en un periodo corto (10 a 16 días). Este enfoque supone que las condiciones atmosféricas, el fondo de la vegetación y el crecimiento de ésta permanecen constantes en el periodo; sin embargo, en una situación real esta hipótesis no se cumple, particularmente en el periodo de crecimiento de la vegetación.

Un método que sólo considere las reflectancias del mismo día en que se tomó una imagen, en una base píxel por píxel, sería la mejor alternativa para evitar suposiciones de invarianza u homogeneidad. El problema de este enfoque de modelación es la dificultad de realizarlo sin establecer hipótesis que pueden o no cumplirse. Debido a esto, la discusión del presente artículo se centra en el método de mínima hipótesis para reducir el efecto de la BRDF; esto es, la modelación de la función geométrica de la reflectancia usando un solo dato. El objetivo es estimar la reflectancia a nadir, para cualquier combinación de la geometría sol-sensor.

La caracterización de la anisotropía de la reflectancia se realiza con la BRDF. La BRDF de una pequeña superficie de área δA se define como la razón de la radianza incremental saliendo de 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 irradiancia incremental de la dirección definida por el vector de iluminación, $\Omega'(\theta_s, \phi_s)$, (Nicodemus *et al.*, 1977):

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

donde dLe es la irradiancia incremental reflejada desde la superficie en la dirección del ángulo de visión Ω ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$); dEi es la irradiancia incremental ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) que llega desde la dirección de iluminación Ω' ; θ_s es el ángulo cenital solar; ϕ_s es el ángulo acimutal solar; θ_v es el ángulo cenital de visión; ϕ_v es el ángulo acimutal de visión (Figura 1).

La función BRDF (Ecuación 1) no puede estimarse en la práctica por la finitud del ángulo de visión, aunque ésta puede ser aproximada razonablemente usando valores finitos de la geometría de observación.

En la definición de la BRDF se supone implícitamente que la geometría (dimensiones y orientación) de los píxeles no cambia con el ángulo de visión. Para los sensores AVHRR y MODIS, entre otros, a partir de nadir se tiene una distorsión del tamaño de los píxeles, los cuales crecen hacia los extremos del ancho de barrido. Por ejemplo, para el sensor AVHRR, con un tamaño de píxel de 1.1 km a nadir, los píxeles en

constant during the period. In a real situation, however, this hypothesis does not occur, especially during the period of vegetation growth.

A method that considers reflectances on the same day in which an image is taken, on a pixel by pixel basis, would be a better alternative to avoid assumptions of invariance or homogeneity. The problem of this approach to modeling is the difficulty in doing so without establishing hypotheses that may or may not comply. For this reason, the discussion of this paper centers on the method of minimum hypothesis to reduce the BRDF effect; that is, modeling the geometric reflectance function using a single datum. The aim is to estimate nadir reflectance for any combination of sun-sensor geometry.

Characterization of reflectance anisotropy is done with BRDF. BRDF of a small area δA is defined as the ratio of the incremental radiance coming from the surface through a solid infinitesimal angle in the direction defined by the vision vector, $\Omega(\theta_v, \phi_v)$, over the incremental irradiance of the direction defined by the illumination vector $\Omega'(\theta_s, \phi_s)$, (Nicodemus *et al.*, 1977).

$$BRDF(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{dLe(\theta_v, \phi_v)}{dEi(\theta_s, \phi_s)}, \text{ in sr}^{-1} \quad (1)$$

where dLe is the incremental irradiance reflected from the surface in the direction of the angle of vision Ω ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$), dEi is the incremental irradiance ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) that arrives from the direction of illumination Ω' ; θ_s is the sun zenith angle; ϕ_s is the sun azimuth angle of the; θ_v is the vision zenith angle; ϕ_v is the vision azimuth angle (Figure 1).

BRDF (Equation 1) cannot actually be estimated in practice because of the finitude of the angle of vision, although this can be approximated reasonably using finite values of observation geometry.

In the definition of BRDF it is implicitly assumed that the pixel geometry (dimensions and orientation) does not change with the angle of vision. For the AVHRR and MODIS sensors, among others, from nadir there is a distortion the size of the pixels, which grow toward the edge of the scan. For example, for the AVHRR sensor, with a pixel size of 1.1 km at nadir, the pixels on the edge of the field of vision have dimensions of 6.24×2.3 km. In a scene, for a width of 2700 km, the angle of vision varies between ± 55.4 degrees (vision zenith angle $\pm 68.5^\circ$) and the sun zenith angle can vary up to 30 degrees. A similar distortion is observed in the MODIS sensor (Huete and Justice, 1999).

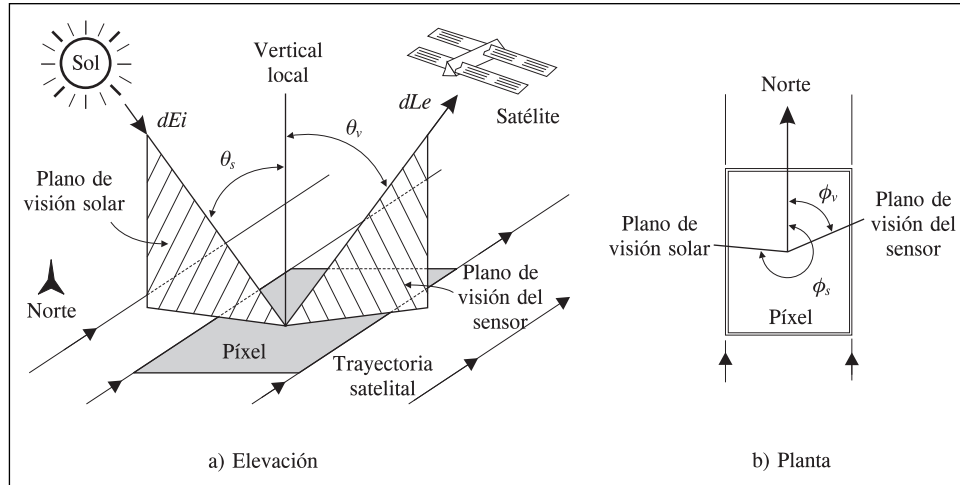


Figura 1. Geometría sol-sensor de iluminación y visión.
Figure 1. Sun-sensor geometry of illumination and vision.

el extremo del campo de visión tienen dimensiones de 6.24×2.3 km. En una escena, para un ancho de barrido de 2700 km, el ángulo de visión varía entre ± 55.4 grados (ángulo cenital de visión $\pm 68.5^\circ$) y el ángulo cenital solar puede variar hasta 30 grados. Una distorsión similar se observa en el sensor MODIS (Huete y Justice, 1999).

Los principales esquemas utilizados para eliminar o reducir el efecto de la BRDF y su impacto en los índices de vegetación son:

a) Normalización de la BRDF. Este método consiste en normalizar las reflectancias a una geometría sol-sensor definida (Gutman, 1994; Wu *et al.*, 1995):

$$R_{\text{norm}}(\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi) = \frac{R_{\text{med}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi) R_{\text{mod}}(\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi)}{R_{\text{mod}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi)} \quad (2)$$

donde $R_{\text{norm}}(\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi)$ es la reflectancia normalizada a una geometría sol-sensor definida ($\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi$); $R_{\text{med}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi)$ es la reflectancia medida en diferentes condiciones de la geometría sol-sensor; $R_{\text{mod}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi)$ es la reflectancia del modelo ajustado en esas condiciones; $R_{\text{mod}}(\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi)$ es la reflectancia del modelo ajustado para la geometría sol-sensor definida para la normalización. Es costumbre usar $\theta_{vo} = 0^\circ$, $\theta_{so} = 45^\circ$ (Duchemin, 1999). El valor por lo general no es importante, ya que muchos modelos de la BRDF no dependen de este valor.

b) Método de compósitos. La técnica más utilizada es la MVC (Maximum Value Compositing) (Holben, 1986), que consiste en seleccionar los valores del índice

The main schemes used to eliminate, or reduce the BRDF effect and its impact on vegetation indexes are:

a) Normalization of BRDF. This method consists in normalizing the reflectances to a defined sun-sensor geometry (Gutman, 1994; Wu *et al.*, 1995):

$$R_{\text{norm}}(\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi) = \frac{R_{\text{med}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi) R_{\text{mod}}(\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi)}{R_{\text{mod}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi)} \quad (2)$$

where, $R_{\text{norm}}(\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi)$ is the reflectance normalized to a defined sun-sensor geometry ($\theta_{so}, \theta_{vo}, \delta\phi$); $R_{\text{med}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi)$ is the reflectance of the fitted model in these conditions; $R_{\text{mod}}(\theta_s, \theta_v, \delta\phi)$ is the fitted model for the sun-sensor geometry defined for normalization. It is customary to use $\theta_{vo} = 0^\circ$, $\theta_{so} = 45^\circ$ (Duchemin, 1999). The value is generally not important since many BRDF models do not depend on it.

b) Method of composites. The most used technique is MVC (Maximum Value Compositing) (Holben, 1986), which consists of selecting the maximum vegetation index value (NDVI) in a given temporal window after a filter eliminates clouds (Goward *et al.*, 1991; Eidenshik and Faundee, 1994). The temporal window is generally selected with the criterion that it be at least equal to the sensor cycle time (9 d in the AVHRR sensor and 16 d in MODIS), and less than the time in which the vegetation shows changes in growth. The selection of the maximum values aims to reduce atmospheric effects and errors in residual clouds (smaller than a pixel), as well as to reduce the

de vegetación (NDVI) máximo en una ventana temporal dada, después de un filtrado que elimina las nubes (Goward *et al.*, 1991; Eidenshik y Faundee, 1994). La ventana temporal generalmente se selecciona con el criterio de que sea al menos igual que el tiempo de ciclo del sensor (9 d en el sensor AVHRR y 16 d en el MODIS), y menor que el tiempo en el cual la vegetación muestra cambios en su crecimiento. La selección del valor máximo busca reducir los efectos atmosféricos y de errores en nubes residuales (de tamaño menor a un píxel), así como reducir los efectos de la geometría sol-sensor; sin embargo, esta técnica tiende a seleccionar los píxeles con ángulos de visión grandes y sombreados, los cuales no siempre están libres de nubes o con efectos atmosféricos reducidos (Goward *et al.*, 1991; Moody y Strahler, 1994; Cihlar *et al.*, 1994b y 1997).

La técnica de MVC funciona mejor con datos sin correcciones atmosféricas (Cihlar *et al.*, 1994a), aunque con numerosas inconsistencias (Gutman, 1994; Goward *et al.*, 1991; Cihlar *et al.*, 1994b y 1997). Para datos corregidos atmosféricamente, el comportamiento anisotrópico de las reflectancias de superficie es más marcado (Cihlar *et al.*, 1994b), por lo que resulta poco apropiada en estas condiciones.

En la práctica, la estimación de la BRDF requiere una hipótesis de homogeneidad, la cual puede plantearse en una zona (para una fecha dada) o en el tiempo (para un píxel dado); sin embargo, en una situación real esta hipótesis no se cumple, particularmente en el periodo de crecimiento de la vegetación. Debido a esto, para integrar un modelo general es necesario entender los patrones de la geometría sol-sensor en forma robusta y diseñar estrategias de modelación simple de la BRDF, por lo que el objetivo de la presente investigación fue desarrollar y evaluar un modelo que estime la reflectancia a nadir con un solo dato.

MATERIALES Y MÉTODOS

La geometría de la 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). Los componentes principales de la geometría sol-sensor se muestran en la Figura 1.

El ángulo cenital de visión está definido de acuerdo con la siguiente convención:

$$\begin{aligned} \theta_v &= -\theta_v \text{ si } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 90 \\ 270 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 360 \end{array} \right\} \\ \theta_v &= +\theta_v \text{ si } \{ 90 < \text{abs}(\phi_s - \phi_v) < 270 \} \end{aligned} \quad (3)$$

Dado que el efecto del acimut relativo entre el sol-sensor para un día, y con base píxel por píxel es despreciable, se puede realizar

sun-sensor geometry effects. However, this technique tends to select the shaded pixels with large angles of vision, which are not always free of clouds or which have reduced atmospheric effects (Goward *et al.*, 1991; Moody and Strahler, 1994; Cihlar *et al.*, 1994b and 1997).

The MVC technique works better with data without atmospheric corrections (Cihlar *et al.*, 1994a), although it has numerous inconsistencies (Gutman, 1994; Goward *et al.*, 1991; Cihlar *et al.*, 1994b and 1997). For atmospherically corrected data, anisotropic behavior of the surface reflectancies is marked (Cihlar *et al.*, 1994b), and so it is not very appropriate under these conditions.

In practice, BRDF estimation requires a hypothesis of homogeneity, which can be posed in a zone (for a given date) or in time (for a given pixel). However, in a real situation this hypothesis is not true, particularly in a period of vegetation growth. Because of this, to integrate a general model, it is necessary to understand robust patterns of sun-sensor geometry and to design strategies of simple BRDF modeling. Thus, the objective of this study was to develop and evaluate a model that estimates nadir reflectance with a single datum.

MATERIALS AND METHODS

Illumination geometry is defined by the sun zenith angle (θ_s) and the sun azimuth angle (ϕ_s), while the geometry of vision is defined by the vision zenith angle of (θ_v) and the vision azimuth angle (ϕ_v). The principal components of sun-sensor geometry are shown in Figure 1.

The vision zenith angle is defined by the following convention:

$$\begin{aligned} \theta_v &= -\theta_v \text{ if } \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 90 \\ 270 \leq \text{abs}(\phi_s - \phi_v) \leq 360 \end{array} \right\} \\ \theta_v &= +\theta_v \text{ if } \{ 90 < \text{abs}(\phi_s - \phi_v) < 270 \} \end{aligned} \quad (3)$$

Given that the relative azimuthal effect of the sun-sensor for one day, on a pixel by pixel basis, is negligible, a model that does not consider this factor can be developed. Paz and Bolaños (2004)³ show that for an angle of vision at nadir, reflectance is independent of the relative azimuth, and thus, the above consideration is correct.

To make BRDF symmetrical and reduce its complexity, it is necessary to introduce a new geometry based on a variable of relative position (χ):

$$\begin{aligned} \theta_v < 0, \chi &= (90 + \theta_v) - \theta_s \\ \theta_v > 0, \chi &= (90 + \theta_v) + \theta_s \end{aligned} \quad (4)$$

Figure 2 shows the reflectance pattern in normalized near infrared, $IRCn = IRCx\cos(\chi)$, in function of χ . Use of the function

una modelación que no considere este factor. Paz y Bolaños (2004)³ muestran que para un ángulo de visión a nadir, la reflectancia es independiente del acimut relativo, por lo que la consideración mencionada es correcta.

Para hacer simétrica y reducir la complejidad de la BRDF es necesario introducir una nueva geometría basada en una variable de posición relativa (χ):

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, \chi &= (90 + \theta_v) - \theta_s \\ \theta_v > 0, \chi &= (90 + \theta_v) + \theta_s\end{aligned}\quad (4)$$

En la Figura 2 se muestra el patrón de reflectancia en el infrarrojo cercano normalizado, $IRCn = IRCx\cos(\chi)$, en función de χ . El uso de la función $\cos(\chi)$ como factor multiplicativo de IRC permite definir un punto del patrón $IRCn-\chi$, ya que $\cos(90^\circ) = 0$, por lo que $IRCn = 0$ en $\chi = 90^\circ$. Para el caso de la reflectancia normalizada a nadir ($\theta_v = 0$), $IRCn,n$, existe una simetría definida por $\cos(90 - \theta_s) = -\cos(90 + \theta_s)$ (Figura 2) que permite usar los casos $\theta_v < 0$ y $\theta_v > 0$ en forma independiente.

En la Figura 2 se observa que para el caso $\theta_v < 0$, el patrón es lineal con intersección del eje χ en 90° . Para $\theta_v > 0$ el patrón es exponencial con intersección también en 90° . Así, los dos patrones dependientes del signo de θ_v coinciden en $\chi = 90^\circ$ y ambos patrones intersectan el valor de la reflectancia normalizada a nadir (Figura 2). Para la reflectancia de la banda del rojo (R), este patrón de simetría no es válido y requiere otro tipo de aproximación.

Las funciones de la BRDF para los casos mostrados en la Figura 2, están definidas por:

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, \chi &= 90 + bIRCn \\ \theta_v > 0, \chi &= 90 \exp(bIRCn)\end{aligned}\quad (5)$$

Puesto que las funciones mostradas dependen sólo del parámetro b (pendiente), con un sólo dato es posible estimarlo. Así, la pendiente de los patrones entre el $IRCn$ y χ puede ser estimada de:

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, b &= \frac{\chi - 90}{IRCn} \\ \theta_v > 0, b &= \frac{\ln\left\{\frac{\chi}{90}\right\}}{IRCn}\end{aligned}\quad (6)$$

Conocido el valor de la pendiente b , se puede estimar el valor de la reflectancia $IRCn$ a nadir ($\theta_v = 0$) de:

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, IRCn, n &= \frac{-\theta_s}{b} \\ \theta_v > 0, IRCn, n &= \frac{\ln\left\{\frac{90 + \theta_s}{90}\right\}}{b}\end{aligned}\quad (7)$$

$\cos(\chi)$ as a multiplicative factor of IRC enables the definition of a point of the pattern $IRCn-\chi$, since $\cos(90^\circ) = 0$; thus, $IRCn = 0$ in $\chi = 90^\circ$. For the case of normalized reflectance at nadir ($\theta_v = 0$), $IRCn,n$, there is an established symmetry given by $\cos(90 - \theta_s) = -\cos(90 + \theta_s)$ (Figure 2) that permits the independent use of cases $\theta_v < 0$ and $\theta_v > 0$.

In Figure 2 it can be observed that for the case $\theta_v < 0$, the pattern is linear intersecting at the χ axis at 90° . For $\theta_v > 0$, the pattern is exponential also intersecting at 90° . Thus, the two patterns depending on the sign of θ_v coincide at $\chi = 90^\circ$, and both patterns intersect the normalized reflectance value at nadir (Figure 2). For red (R) band reflectance, this pattern of symmetry is not valid and requires another type of approximation.

The BRDF functions for the cases shown in Figure 2 are defined by

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, \chi &= 90 + bIRCn \\ \theta_v > 0, \chi &= 90 \exp(bIRCn)\end{aligned}\quad (5)$$

Since the functions shown depended only on parameter b (slope), it is possible to estimate it with a single datum. The slope of the patterns between $IRCn$ and χ can be estimated from:

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, b &= \frac{\chi - 90}{IRCn} \\ \theta_v > 0, b &= \frac{\ln\left\{\frac{\chi}{90}\right\}}{IRCn}\end{aligned}\quad (6)$$

Knowing the value of slope b , the $IRCn$ reflectance value at nadir ($\theta_v = 0$) can be estimated:

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, IRCn, n &= \frac{-\theta_s}{b} \\ \theta_v > 0, IRCn, n &= \frac{\ln\left\{\frac{90 + \theta_s}{90}\right\}}{b}\end{aligned}\quad (7)$$

The non-normalized reflectance value in IRC at nadir can be obtained from

$$\begin{aligned}\theta_v < 0, IRCnadir &= \frac{IRCn, n}{\cos(90 - \theta_s)} \\ \theta_v > 0, IRCnadir &= \frac{IRCn, n}{\cos(90 + \theta_s)}\end{aligned}\quad (8)$$

To estimate the reflectance value in the R band, a change in BRDF geometry is necessary.

³ Paz, F. y M. Bolaños. 2004. Bases para el diseño de un índice de vegetación generalizado, Reporte Octubre-Noviembre para AGROASE-MEX. 155 p.

El valor de la reflectancia en el IRC a nadir, no normalizada, puede obtenerse de:

$$\begin{aligned} \theta_v < 0, IRC_{nadir} &= \frac{IRC_{n,n}}{\cos(90 - \theta_s)} \\ \theta_v > 0, IRC_{nadir} &= \frac{IRC_{n,n}}{\cos(90 + \theta_s)} \end{aligned} \quad (8)$$

Para estimar el valor de la reflectancia en la banda del R, es necesario un cambio en la geometría de la función BRDF.

Dado que el patrón combinado del R y del IRC tienen una simetría común, se puede introducir un nuevo patrón de simetría basado en $\chi' = \theta_s + \theta_v$. En la Figura 3 se muestra el patrón entre estas bandas para diferentes ángulos de visión, dejando el ángulo cenital solar fijo (caso de un píxel individual en una imagen). Las reflectancias normalizadas están definidas como $R'n = R \times \cos(\chi')$ e $IRC'n = IRC \times \cos(\chi')$. En la Figura 3 se muestra, para el caso de la banda del R, que para valores del ángulo de visión mayores o menores que cero, ambos patrones intersectan el origen. Para $\theta_v > 0$, el patrón es de tipo exponencial, por lo que no está definido para valores negativos de las reflectancias.

Para no tener valores negativos, se pueden agregar constantes a las reflectancias (c y d):

$$\begin{aligned} IRC'n, c &= IRC'n + c \\ R'n, d &= R'n + d \end{aligned} \quad (9)$$

En la Figura 4 se muestra, nuevamente, el comportamiento de la banda del R con respecto al ángulo de visión, usando valores de $c=50$ y $d=10$.

Al agregar las constantes c y d a las reflectancias, los patrones mostrados en la Figura 4 quedan definidos por:

$$\begin{aligned} \theta_v < 0, R'n, d &= a + b IRC'n, c \\ \theta_v > 0, R'n, d &= a \exp(b IRC'n, c) \end{aligned} \quad (10)$$

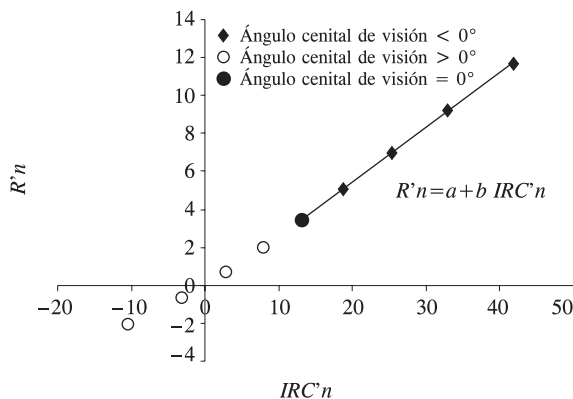


Figura 3. Patrón típico de las reflectancias normalizadas R e IRC.

Figure 3. Typical pattern of normalized R and IRC reflectances.

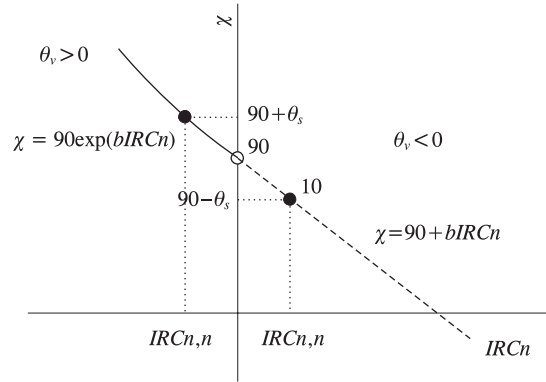


Figura 2. Patrón típico de IRCn en función de χ .

Figure 2. Typical IRCn pattern in function of χ .

Given that the combined patterns of R and IRC have a common symmetry, a new pattern of symmetry can be introduced based on $\chi' = \theta_s + \theta_v$. Figure 3 shows the pattern between these bands for different angles of vision, leaving the sun zenith angle fixed (case of an individual pixel in an image). The normalized reflectances are defined as $R'n = R \times \cos(\chi')$ and $IRC'n = IRC \times \cos(\chi')$. Figure 3 shows that, for the case of the R band, for angles of vision greater or less than zero, both patterns intersect the origin. For $\theta_v > 0$, the pattern is of the exponential type, and thus it is not defined for negative reflectance values.

In order not to have negative values, constants (c and d) can be added to the reflectances:

$$\begin{aligned} IRC'n, c &= IRC'n + c \\ R'n, d &= R'n + d \end{aligned} \quad (9)$$

Figure 4 shows, again, the behavior of the R band relative to the angle of vision using values of $c=50$ and $d=10$.

When the constants c and d are added to the reflectances, the patterns shown in Figure 4 are defined by:

$$\begin{aligned} \theta_v < 0, R'n, d &= a + b IRC'n, c \\ \theta_v > 0, R'n, d &= a \exp(b IRC'n, c) \end{aligned} \quad (10)$$

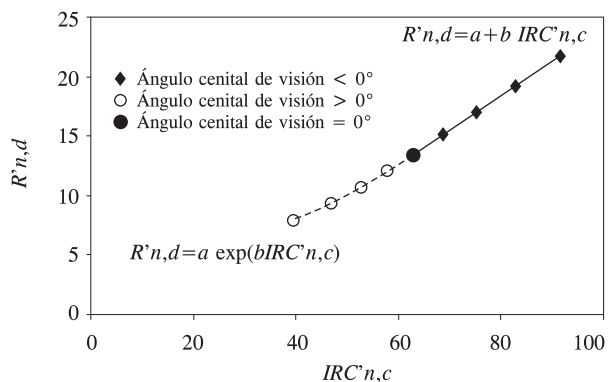


Figura 4. Patrón típico entre $IRC'n, c$ y $R'n, d$.

Figure 4. Typical pattern between $IRC'n, c$ and $R'n, d$.

En forma similar al caso del patrón del $IRCn$ mostrado en la Figura 2, es posible estimar los parámetros de la Ecuación (10) usando dos pares de datos, que se simplifica a uno solo si se considera el par (c, d) :

$$\theta_v < 0 \begin{cases} b = \frac{R'n, d - d}{IRC'n, c - c} \\ a = R'n, d - bIRC'n, c \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta_v > 0 \begin{cases} b = \frac{\ln(R'n, d) - \ln(d)}{IRC'n, c - c} \\ a = \frac{R'n, d}{\exp(bIRC'n, c)} \end{cases}$$

Con los valores de a y b se puede estimar el valor de $R'n, d$ que corresponde a un ángulo de visión usando el valor de IRC en este ángulo de visión estimado previamente.

El valor de R a nadir, no normalizado, se calcula de:

$$R_{nadir} = (R'n, d, nadir - d) / \cos(\theta_s) \quad (12)$$

Para validar el modelo propuesto se utilizaron los datos de la BRDF de un pastizal natural (*Bouteloua* spp), sobre una pendiente menor de 5%, en la cuenca de Walnut Gulch, Arizona, EE.UU., con coordenadas geográficas 31.7° N, 110° O. Las reflectancias se midieron con un espectroradiómetro Spectron SE 590 con un ángulo de visión de 15°, en un rango espectral de 400 a 900 nm con anchura de banda efectiva de 10nm. Para este estudio los datos de reflectancia de alta resolución fueron remuestreados para aproximar los datos a las anchuras correspondientes a las bandas R e IRC del sensor LANDSAT TM (bandas 3 y 4). Las mediciones en tierra se hicieron con diferentes ángulos solares y de visión usando una estructura diseñada por el Laboratorio de Conservación del Agua en Phoenix, Arizona, perteneciente al Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). Este equipo consistió de una base y un brazo giratorio sobre el cual se montó el sensor. Los ángulos cenitales de visión variaron de -40° a $+40^\circ$, con incrementos de 10° . El experimento se realizó en 1990 (Huete *et al.*, 1992; Chehbouni *et al.*, 1994; Qi *et al.*, 1994).

Qi *et al.* (1994) han mostrado que las mediciones terrestres de la base de datos analizada no muestran efectos de escala importantes. Esto es crítico, ya que buena parte de la complejidad observada en los patrones de la BRDF de los cultivos se debe a efectos de escala. En la Figura 5 se muestra el patrón temporal de la biomasa del pastizal analizado, donde se observa un patrón típico del crecimiento de un cultivo en una estación. Para este caso, las etapas iniciales están caracterizadas por vegetación verde (pasto vivo) y vegetación seca (en estado de latencia).

En el Cuadro 1 se muestran las fechas de muestreo del pastizal, con los ángulos cenitales solares estimados en cada medición.

Las mediciones de la BRDF consideran esencialmente todas las fases y etapas del crecimiento del pasto, por lo que representan el patrón estacional de este tipo de vegetación. Poco antes del día

As in the case of the $IRCn$ pattern shown in Figure 2, using two pairs of data, it is possible to estimate the parameters of Equation (10), which is simplified to a single one if the pair (c, d) are considered:

$$\theta_v < 0 \begin{cases} b = \frac{R'n, d - d}{IRC'n, c - c} \\ a = R'n, d - bIRC'n, c \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta_v > 0 \begin{cases} b = \frac{\ln(R'n, d) - \ln(d)}{IRC'n, c - c} \\ a = \frac{R'n, d}{\exp(bIRC'n, c)} \end{cases}$$

With the values of a and b , the $R'n, d$ value can be estimated, corresponding to an angle of vision using the IRC value in this angle of vision estimated previously.

R at nadir, not normalized, can be calculated from:

$$R_{nadir} = (R'n, d, nadir - d) / \cos(\theta_s) \quad (12)$$

To validate the proposed model, BRDF data from a natural grassland (*Bouteloua* spp) were used on a slope of less than 5%, in the watershed of Walnut Gulch, Arizona, USA, whose geographic coordinates are 31.7° N, 110° W. Reflectances were measured with a Spectron SE 590 spectroradiometer with a 15° angle of vision, within a spectral range of 400 to 900 nm and an effective band width of 10 nm. For this study, the high resolution reflectance data were re-sampled to approximate the data of the corresponding R and IRC band widths of the LANDSAT TM sensor (bands 3 and 4). Land measurements were taken with different angles of the sun and vision using a structure designed by the Laboratory of Water Conservation in Phoenix, Arizona, of the US Department of Agriculture (USDA). This equipment comprised a base and a rotating arm on which the sensor was mounted. The vision zenith angles varied from -40° to $+40^\circ$, with increments of 10° . The experiment was conducted in 1990 (Huete *et al.*, 1992; Chehbouni *et al.*, 1994; Qi *et al.*, 1994).

Qi *et al.* (1994) have shown that the land measurements of the analyzed database do not show major scale effects. This is critical since a large part of the complexity observed in the BRDF patterns of crops are due to scale effects. Figure 5 shows the temporal pattern of the analyzed grassland biomass, where a typical growth pattern of a crop in a season is observed. For this case, the initial stages are characterized by green vegetation (live grass) and dry vegetation (in dormant state).

Table 1 shows the sampling dates of the grassland with sun zenith angles estimated at each measurement.

BRDF measurements essentially consider all of the phases and stages of grass growth, and represent a seasonal pattern for this vegetation. Just before day 220 of the year, the grassland reached its maximum growth in biomass and cover was 40%, representing a typical situation of a crop that does not totally cover the ground.

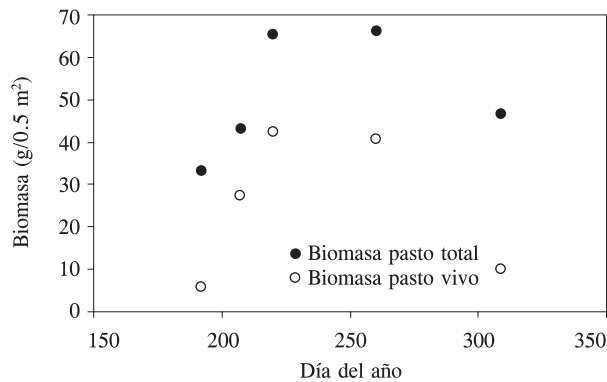


Figura 5. Patrón estacional del crecimiento de la biomasa en el pastizal analizado.

Figure 5. Pattern of seasonal biomass growth of the analyzed grassland.

220 del año, el pastizal alcanzó su máximo crecimiento de biomasa y cobertura, donde la cobertura fue 40 % y representó la situación típica de un cultivo sin cobertura total del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con un esquema similar al usado para analizar los modelos convencionales de la BRDF, en el espacio normalizado del *R-IRC*, en las Figuras 6, 7 y 8 se muestra el ajuste del modelo propuesto (reflectancia modelada) con respecto a la reflectancia real. Estas figuras se construyeron usando todos los datos de reflectancia disponibles (nueve datos de reflectancia correspondientes a nueve ángulos de visión por cada ángulo acimutal solar) para calcular los parámetros del modelo, y tienen la finalidad de mostrar la validez del modelo propuesto.

La Figura 6 corresponde al día 156, que representa la condición de vegetación seca (en estado de latencia). En la Figura 7 se muestra el ajuste del modelo para el día 192, representando la fase exponencial de la etapa vegetativa, mientras que en la Figura 8 se muestra el caso del final de la fase exponencial de la etapa vegetativa (índice de área foliar máximo), que se presentó cercano al día 220.

Para el día 156, que asemeja un patrón similar a la línea del suelo, el patrón de las reflectancias para valores positivos y negativos del ángulo cenital de visión es simétrico, por lo que pudiera usarse un patrón lineal en ambos casos. No obstante, la utilización de un patrón lineal y uno exponencial produce errores muy pequeños. Esto muestra que el modelo propuesto es válido para todo el ciclo de crecimiento de la vegetación.

Se observa en las Figuras 6, 7 y 8 que la ordenada al origen es despreciable, considerando que los valores están en porcentajes de reflectancia.

Cuadro 1. Fechas de muestreo y ángulos de iluminación.
Table 1. Sampling dates and illumination angles.

Día del año	Angulo cenital solar
156	50, 43, 16
192	33
207	52, 34, 32, 17
216	47, 37, 24
220	65, 55, 43, 24, 15
237	54 , 27
252	37, 28
285	58, 45, 39

Todas las mediciones se realizaron con suelo seco, excepto los valores en negritas que representan las mediciones que se realizaron con suelo seco y húmedo.

RESULTS AND DISCUSSION

With a scheme similar to that used for analysis of conventional BRDF models, in the normalized *R-IRC* space, Figures 6, 7 and 8 show the proposed model (modeled reflectance) fitted to real reflectance. These figures were constructed using all of the available reflectance data (nine reflectance data corresponding to nine angles of vision for each sun azimuth angle) to calculate the model parameters and have the purpose of showing the validity of the proposed model.

Figure 6 corresponds to day 156, with dry vegetation (in dormant state). Figure 7 shows the model fitted for day 192, representing the exponential phase of the vegetative stage (maximum leaf area index), which occurred around day 220.

For day 156, which approaches a pattern similar to the soil line, the reflectance pattern for positive and negative values of the vision zenith angle is symmetrical; thus, a linear pattern could be used in both cases. Nevertheless, the use of a linear and an exponential pattern produces very small errors. This shows that the proposed model is valid for the entire vegetation growth cycle.

In Figures 6, 7 and 8 it is observed that the intercept is negligible considering that the values are in percentages of reflectance.

In a manner of evaluation of the precision of the methodology used to estimate reflectance at nadir (using a single reflectance value acquired with any sun-sensor geometry) for all of the days and conditions analyzed (262 measurements), Table 2 shows the percentage error, relative error = $\text{abs}[(R_{\text{measured}} - R_{\text{modeled}}) / R_{\text{measured}}] \times 100$, for the IRC value calculated in the first phase of the algorithm. In this table it can be observed that 98% of the measurements had an error of less than 20% and that almost 97% had a modeling error of

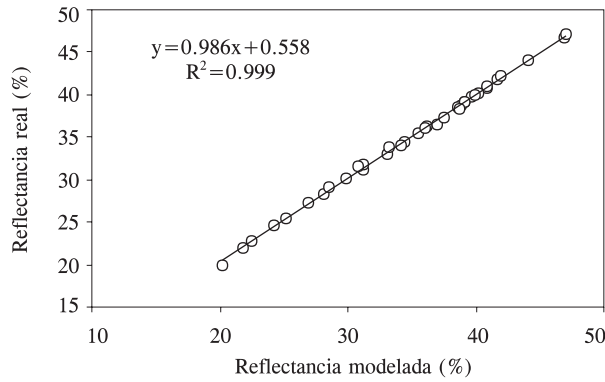


Figura 6. Reflectancia modelada vs reflectancia medida en el día 156.

Figure 6. Modeled reflectance vs measured reflectance on day 156.

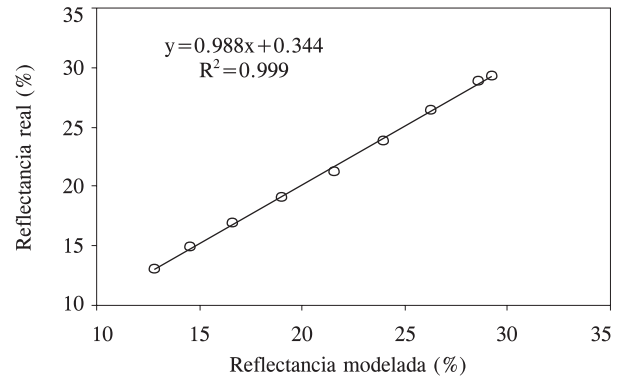


Figura 7. Reflectancia modelada vs reflectancia medida en el día 192.

Figure 7. Modeled reflectance vs measured reflectance on day 192.

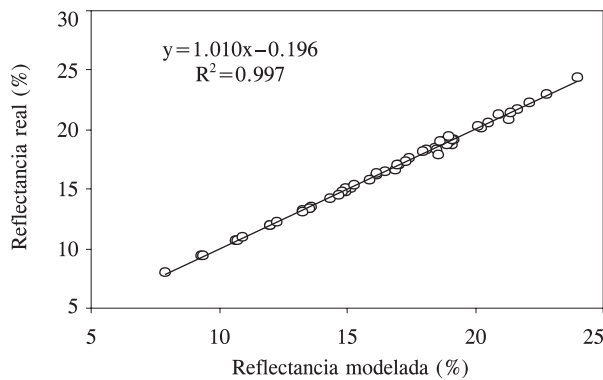


Figura 8. Reflectancia modelada vs reflectancia medida en el día 220.

Figure 8. Modeled reflectance vs measured reflectance on day 220.

A manera de evaluación de la precisión de la metodología utilizada para estimar la reflectancia a nadir (utilizando un solo valor de reflectancia adquirido con cualquier geometría sol-sensor), para todos los días y condiciones analizadas (262 mediciones), en el Cuadro 2 se muestra el error en porcentaje, error relativo = $\text{abs}[(R_{\text{medida}} - R_{\text{modelada}}) / R_{\text{medida}}] \times 100$, para el valor del *IRC* calculado en la primera fase del algoritmo, en el cual se observa que 98% de las mediciones tuvieron un error menor a 20% y que casi 87% de ellas tuvo un error de modelación menor a 10%; lo que implica que el modelo propuesto es aceptable, principalmente si se considera que se usó un solo dato de reflectancia en el proceso de modelación.

Usando la relación normalizada entre el *R* e *IRC*, en el Cuadro 3 se muestra el error de estimación de la reflectancia en la banda del *R*; se observa que 75% de las estimaciones tienen un error menor o igual a 10% y que 96% de ellas tienen un error menor o igual a 20%; produciendo resultados de estimación adecuados.

less than 10%; this indicates that the proposed model is acceptable, mainly if it is considered that only one reflectance datum was used in the modeling process.

Using the normalized relationship between *R* and *IRC*, Table 3 shows the error in reflectance estimation in the *R* band; it can be observed that 75% of the estimations have an error less than or equal to 10% and that 96% have an error lower than or equal to 20%, and thus, produce adequate estimation results.

To analyze the error associated with the estimations, the Mean Squared Error (*MSE*) can be used:

$$MSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{\text{modeled}} - R_{\text{measured}})^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

Table 4 shows the *MSE* calculated for the estimations of the *R* and *IRC* spectral bands.

In Figure 9, reflectances (*R* and *IRC*) estimated in relation to the means are compared: it is observed that although the dispersion of the points is relatively large, the estimation error is acceptable, especially if it is considered that only one datum was used to model the BRDF function.

Cuadro 2. Error en la estimación de *IRC*.

Table 2. Error in *IRC* estimation.

Error (%)	Frecuencia acumulada
5	64.81
10	86.57
15	95.37
20	97.69
25	100.00

Para analizar el error asociado con las estimaciones, se puede utilizar el Error Cuadrático Medio (*ECM*):

$$ECM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{\text{modelo}} - R_{\text{medida}})^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

En el Cuadro 4 se muestra el *ECM* calculado para las estimaciones de las bandas espectrales del *R* e *IRC*.

En la Figura 9 se comparan las reflectancias (*R* e *IRC*) estimadas en relación a las medidas, se observa que aunque la dispersión de los puntos es relativamente grande, el error de estimación es aceptable; en particular si se considera que sólo se utilizó un dato para modelar la función BRDF.

CONCLUSIONES

El modelo propuesto para estimar la reflectancia a nadir (modelación de la geometría sol-sensor), fue validado con datos experimentales de un pastizal natural (*Bouteloa* spp), obteniéndose resultados adecuados. La ventaja de éste es requerir un solo dato para aproximar la reflectancia a nadir, dado cualquier ángulo de visión diferente a éste.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo del CONACyT, convenio CONACyT-2002-C01-41792, del proyecto "Agricultura asistida por sensores remotos", y de AGROASEMEX, S.A., contrato "Desarrollo de un seguro ganadero con base en sensores remotos"

LITERATURA CITADA

- Chehbouni, A., Y. H. Kerr, J. Qi, A. R. Huete, and S. Sorooshian. 1994. Toward the development of a multidirectional vegetation index, *Water Resources Res.* 30: 1281-1286.
- Cihlar, J., D. Manak, and M. D'lorio. 1994a. Evaluation of compositing algorithms for AVHRR data over land. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 32: 427-437.
- Cihlar, J., D. Manak, and N. Voisin. 1994b. AVHRR bidirectional reflectance effects and compositing. *Remote Sensing Environ.* 48: 77-88.
- Cihlar, J. C., H. Ly, Z. Li, J. Chen, H. Pokrant, and F. Huang. 1997. Multi temporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies - artifacts and corrections. *Remote Sensing Environ.* 60: 35-57.

Cuadro 4. Error Cuadrático Medio (*ECM*) de estimación.
Table 4. Mean squared error (*MSE*) of estimation.

Banda	<i>ECM</i>
<i>R</i>	1.0212
<i>IRC</i>	1.6630

Cuadro 3. Error en la estimación de *R*.
Table 3. Error in *R* estimation

Error (%)	Frecuencia Acumulada
5	39.81
10	75.00
15	90.74
20	96.30
25	99.07
30	99.54
35	100.00

CONCLUSIONS

The model proposed for estimating nadir reflectance (modeling sun-sensor geometry) was validated with experimental data from a natural grassland (*Bouteloa* spp), and adequate results were obtained. The advantage of this is that it requires a single datum to approximate nadir reflectance, given any angle of vision different from this.

—End of the English version—



- Duchemin, B. 1999. NOAA/AVHRR bidirectional reflectance: modeling and application for the monitoring of a temperate forest. *Remote Sensing Environ.* 67: 51-67.
- Eidenshik, J. C., and J. L. Faundee. 1994. The 1km AVHRR global land data set: first stages in implementation. *Int. Remote Sensing.* 15: 3443-3462.
- Goward, S. N., B. Markham, D. G. Dye, W. Dulaney, and J. Yang. 1991. Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing Environ.* 35: 257-277.
- Gutman, G. G. 1994. Normalization of multi-annual global AVHRR reflectance data over land surfaces to common sun-target-sensor geometry. *Adv. Space Res.* 14: 121-124.
- Holben, B. N. 1986. Characterization of maximum value composites from temporal AVHRR data. *Int. Journal of Remote Sensing.* 7: 1417-1434.

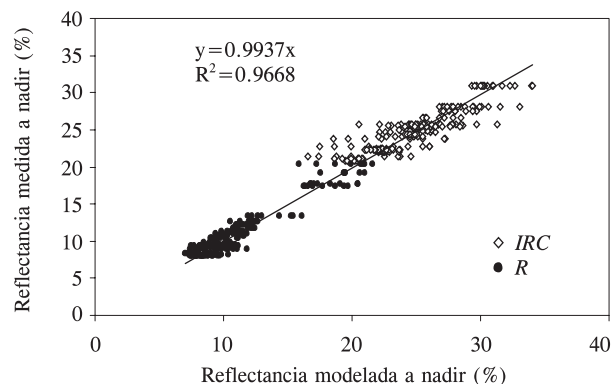


Figura 9. Reflectancias modeladas vs reflectancias medidas.
Figure 9. Modeled reflectances vs measured reflectances.

- Huete, A., and C. Justice. 1999. MODIS vegetation index (MOD 13). Algorithm theoretical basis document, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt. 129 p.
- Huete, A. R., G. Hua, J. Qi, and A. Chehbouni. 1992. Normalization of multidirectional red and nir reflectances with SAVI. *Remote Sensing Environ.* 41: 143-154.
- Moody, A. and A. H. Strahler. 1994. Characteristics of composited AVHRR data and problems in their classification. *Int. Remote Sensing.* 15: 3473-3491.
- Nicodemus, F. E., J. C. Richmond, J. J. Hsia, E. J. Ginsberg, and T. Limperis. 1977. Geometric considerations and nomenclature for reflectance. *Natural Bureau of Standards Monograph* 160, Institute for Basic Standards, Washington, D.C. 161 p.
- Privette, J. 1994. An efficient strategy for the inversion for bidirectional reflectance models with satellite remote sensing data. Ph.D. thesis, University of Colorado. 200 p.
- Qi, J., A. R. Huete, F. Cabot, and A. Chehbouni. 1994. Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed. *Water Resources Res.* 30: 1271-1279.
- Wu, A., Z. Li, and J. Cihlar. 1995. Effects of land cover type and greenness on advanced very high resolution radiometric bidirectional reflectance: analysis and removal. *J. Geophys. Res.* 100: 9179-9192.