

DISEÑO DE ÍNDICES ESPECTRALES DE LA VEGETACIÓN USANDO CURVAS ISO-SUELO

DESIGN OF SPECTRAL VEGETATION INDEXES USING ISO-SOIL CURVES

Fernando Paz-Pellat*, Marisol Reyes, Edgardo Medrano

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

RESUMEN

El diseño de índices espectrales de la vegetación (*IV*) basados en las líneas iso-índice de área foliar (misma cantidad de vegetación y propiedades ópticas diferentes de los suelos debajo de la vegetación) en el ancho de banda del rojo (*R*) e infrarrojo cercano (*IRC*) del espectro electromagnético, resulta complejo por el patrón expo-lineal con cambio de pendiente, entre los parámetros que definen estas líneas. Una alternativa de diseño es considerar los patrones de las curvas iso-suelo (mismo suelo y cantidad variable de vegetación), usando el *IRC* como banda de saturación más lenta posible. El índice *IVIS* (*IV* basado en las curvas iso-suelo) introducido permite este tipo de aproximación, al usar una transformación del espacio de *R* para hacerlo coincidir con la línea del suelo y una estructura matemática similar a índices uni-banda espectral. La validación de *IVIS* usando simulaciones radiativas y de experimentos con cultivos generó resultados aceptables, particularmente con una óptica de minimización del efecto del suelo en escala píxel por píxel. La transformación de *IVIS* permite la parametrización de la curva de crecimiento en formato lineal, simple de implementar en términos algorítmicos.

Palabras clave: *IVIS*, curvas iso-suelo, índices uni-banda, efecto suelo, curva paramétrica del crecimiento.

INTRODUCCIÓN

La estimación de variables biofísicas asociadas a la vegetación (principalmente biomasa aérea o *Bm*, índice de área foliar o *LAI*, cobertura aérea o *f_v*) mediante la tecnología de los sensores remotos en plataformas satelitales se usa extensamente, en particular por el muestreo espacial exhaustivo y, dependiendo del satélite, los tiempos de revisita cortos

ABSTRACT

The design of spectral vegetation indexes (*VI*) based on the lines iso-leaf area index (same amount of vegetation and different optical properties of the soils under the vegetation) in two bands of the electromagnetic spectrum, the red (*R*) and near-infrared (*NIR*), is complicated because of the exponential pattern with change of slope, among the parameters that define these lines. An alternative design is to consider the patterns of iso-soil curves (same soil, and varying amounts of vegetation), using the *NIR* as a saturation band as slow as possible. The introduced index *ISVI* (*VI* based on the iso-soil curves) allows this type of approach, by using a transformation of the space of *R* to make it coincide with the soil line and a mathematical structure similar to uni-band spectral indexes. *ISVI* validation using radiative simulations and crop experiments produced acceptable results, particularly with a perspective of minimizing the soil effect at pixel by pixel scale. The transformation of the *ISVI* allows parameterization of the growth curve in a linear format, simple to implement in algorithmic terms.

Key words: *ISVI*, iso-soil curves, uni-band indexes, soil effect, parametric curve of growth.

INTRODUCTION

The estimation of biophysical variables associated with vegetation (mainly biomass or *Bm*; leaf area index or *LAI*; canopy cover or *f_v*) through remote sensing technology on satellite platforms is widely used, particularly by the exhaustive spatial sampling and, depending on the satellite, the short revisit times at a same pixel. In this perspective, using the high contrast between red (*R*) and near infrared (*NIR*) bands for vegetation (Tucker, 1979), a number of spectral vegetation indexes or *VI* have been developed (Verstraete and Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007).

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Febrero, 2010. Aprobado: Noviembre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 121-134. 2011.

a un mismo píxel. En esta perspectiva, usando el alto contraste entre la banda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación (Tucker, 1979), se han desarrollado numerosos índices espectrales de la vegetación o IV (Verstraete y Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007).

A pesar de los desarrollos en el diseño de los IV hay problemas de saturación (la banda fotosintética del R no cambia de valor al incrementarse el área foliar) y patrones bi-lineales con el IAF (y el fv asociado) (Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), que causan problemas en las aplicaciones operacionales. Los IV actuales tratan de aproximar las curvas iso- IAF (igual cantidad de vegetación, con suelo con propiedades ópticas variables) de los patrones espectrales en el espacio del R - IRC (Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), particularmente sus pendientes que tienden a presentar poca variación al aumentar el IAF . Este esquema de aproximación es intrínsecamente problemático ya que los patrones entre la intersección y la pendiente de las curvas iso- IAF tienen una geometría compleja (expo-lineal y cambio del signo de la pendiente) (Paz *et al.*, 2005 y 2007), que resulta difícil de transformar en forma genérica, aunque Romero *et al.* (2009) usaron un enfoque de dos fases de la etapa vegetativa para obtener un IV global.

Para evitar las dificultades asociadas a las líneas iso- IAF , en este estudio se introduce el diseño de IV basado en las líneas iso-suelo (mismas propiedades ópticas del suelo y cantidad variable de la vegetación) que permite usar IV con problemas de saturación mínimos y modela completamente el patrón expo-lineal del crecimiento (vegetativo-reproductivo) de la vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 1 se muestran simulaciones radiativas asociadas al crecimiento de un cultivo (medio homogéneo o turbio) con dos suelos (seco y húmedo) como fondo. Paz *et al.* (2005) detallan estas simulaciones. En la Figura 1A se observa que las curvas iso- IAF ($IRC = a_0 + b_0R$, donde a_0 y b_0 dependen del IAF) van desde la línea del suelo o $IAF = 0$ ($IRC = a_s + b_sR$, donde a_s y b_s caracterizan al suelo) hasta transformarse en un punto (R^∞ , IRC^∞), saturación de las bandas, lo que constituye un medio ópticamente denso o de reflectancias en el infinito (Ross, 1981). IRC_{R^∞} representa el valor del IRC asociado a R^∞ , que es la reflectancia de saturación del R , que alcanza valores para IAF alrededor

Despite the developments in the design of VI there are problems of saturation (the photosynthetic band of R does not change of value with increasing leaf area) and bi-linear patterns with the LAI (and the fv associated) (Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), which cause problems in operational applications. The current VI s try to approximate the iso- LAI curves (same amount of vegetation, with soil with variable optical properties) of the spectral patterns in the space of R - NIR (Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007; Romero *et al.*, 2009), particularly its slopes that tend to have little variation with increasing LAI . This approximation scheme is inherently problematic because the patterns between the intersection and the slope of the iso- LAI curves have a complex geometry (expo-linear and change of the sign of the slope) (Paz *et al.*, 2005 and 2007), which is difficult to generically transform, although Romero *et al.* (2009) used a two-phased approach of the vegetative stage to obtain a global VI .

To avoid difficulties associated with the iso- LAI lines, in this paper the design of VI is introduced based on the iso-soil lines (same soil optic properties and varying amount of vegetation) allowing the use of VI with minimum saturation problems and this VI models completely the expo-linear pattern of vegetation growth (vegetative-reproductive).

MATERIALS AND METHODS

Figure 1 shows radiative simulations associated with the growth of a crop (medium homogenous or turbid) with two soils (dry and moist) as background. Paz *et al.* (2005) detail these simulations. In Figure 1A it is shown that the iso- LAI curves ($NIR = a_0 + b_0R$, where a_0 and b_0 depend on LAI) go from the soil line or $LAI = 0$ ($NIR = a_s + b_sR$, where a_s and b_s characterize the soil) until to be transformed into a point (R^∞ , NIR^∞), saturation of bands, which constitutes an optically dense medium or infinite reflectance (Ross, 1981). NIR_{R^∞} represents the value of NIR associated with R^∞ that is the reflectance of saturation of R , which reaches values for LAI around 2 (maximum rate of photosynthetic efficiency). When the soil remains fixed (optical properties) an iso-soil line is obtained.

The expo-linear pattern and with change of sign of the slope between a_0 and b_0 , the parameters of the iso- LAI lines are shown in Figure 1B. The VI s as the GESAVI (Gilabert *et al.*, 2002) and the $NDVI_{cp}$ (Paz *et al.*, 2007) attempt to approximate the exponential pattern (from $LAI = 0$ to LAI

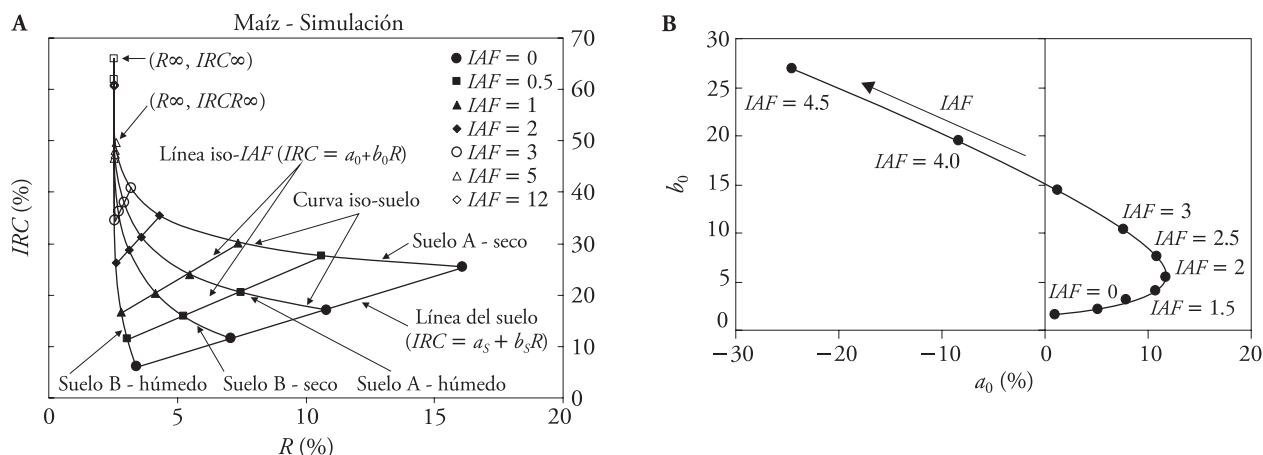


Figura 1. Simulaciones radiativas del crecimiento de un cultivo. A) Patrones espectrales asociados al espacio del R - IRC ; y B) patrones asociados al espacio a_0 - b_0 de las líneas iso- IAF .

Figure 1. Radiative simulations of a crop growth. A) Spectral patterns associated to the space of R - NIR ; B) patterns associated to the space a_0 - b_0 of the iso- LAI lines.

de 2 (tasa máxima de eficiencia fotosintética). Cuando se deja fijo al suelo (propiedades ópticas) se obtiene una línea iso-suelo.

El patrón expo-lineal y con cambio de signo de la pendiente entre a_0 y b_0 , los parámetros de las líneas iso- IAF se muestran en la Figura 1B. Los IV como el GESAVI (Gilabert *et al.*, 2002) y el $NDVI_{cp}$ (Paz *et al.*, 2007) tratan de aproximar el patrón exponencial (desde $IAF = 0$ a IAF un poco mayor de 2 en la Figura 1B) entre a_0 y b_0 . El índice IV_CIMAS (Romero *et al.*, 2009) trata de aproximar el patrón expo-lineal desde la fase lineal y exponencial, convergiendo a un punto común. En la Figura 2 se muestra los resultados obtenidos en la relación del IV_CIMAS con el IAF para un cultivo de maíz (Bausch, 1993) y algodón (Huete *et al.*, 1985), usando charolas deslizantes cubiertas de suelos diferentes debajo de los cultivos

Se observa en la Figura 2 que el IV_CIMAS tiene una relación bi-lineal (etapa vegetativa y reproductiva) con el IAF , producto de que las propiedades ópticas o geométricas de los cultivos cambian durante la etapa reproductiva (Romero *et al.*, 2009). Así, aunque el IV_CIMAS es un índice que minimiza el efecto del suelo y aproxima en forma adecuada el patrón mostrado en la Figura 1B, un cambio en las propiedades ópticas o geométricas de la vegetación produce una relación lineal diferente con el IAF . Además se observa que a medida que este último crece, la sensibilidad a las variaciones en la pendiente de las líneas iso- IAF (en las que esta basado el IV_CIMAS) disminuye.

Un primer paso en el diseño de un IV generalizado fue determinar cual banda o bandas espectrales caracterizan mejor a la vegetación, con el criterio de saturación espectral más lenta. Para este tipo de análisis es posible usar las bandas del sensor ETM+ del satélite LANDSAT 7: azul o A, centrada en 480 nm; verde o V, centrada en 570 nm; R centrada en 660 nm; IRC centrada

slightly more than 2 in the Figure 1B) between a_0 and b_0 . The $KIMO_SAVI$ index (Romero *et al.*, 2009) attempts to approximate the expo-linear pattern from the linear and exponential phase, converging at a common point. Figure 2 shows the results obtained in the relationship of the $KIMO_SAVI$ with the LAI for a crop of maize (Bausch, 1993) and cotton (Huete *et al.*, 1985), using sliding trays covered with different soils under the crops.

In Figure 2 it is shown that the $KIMO_SAVI$ has a bi-linear relationship (vegetative and reproductive stage) with the LAI , as a result of the optical or geometric properties of the crops that change during the reproductive stage (Romero *et al.*, 2009). Thus, although the $KIMO_SAVI$ is an index that minimizes the effect of soil and properly approximates the pattern shown in Figure 1B, a change in the optical or geometric properties of vegetation produces a different linear relationship with the LAI . It is also observed that as the latter increases, the sensitivity to variations in the slope of the iso- LAI (on which $KIMO_SAVI$ is based) decreases.

A first step in designing a generalized VI was to determine which spectral band or bands better characterize the vegetation, with the criterion of slower spectral saturation. For this type of analysis it is possible to use the bands of the ETM+ sensor of the LANDSAT 7 satellite: blue or B, centered at 480 nm; green or G, centered at 570 nm; R centered in 660 nm; NIR centered at 840 nm; infrared medium 1 or $MIR1$ centered at 1650 nm; infrared medium 2 or $MIR2$ centered at 2200 nm. Figure 3 shows radiative simulations similar to those of Figure 1B (Paz *et al.*, 2005) for the bands of the ETM+ sensor for different values of LAI and five soils with different spectral properties ($LAI = 0$, in Figure 3).

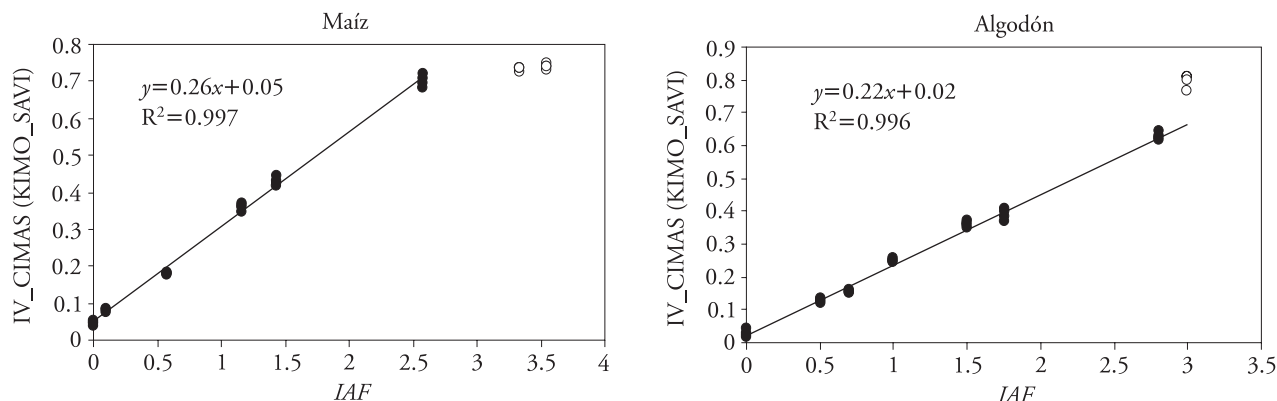


Figura 2. Relación entre el LAI y el IV_CIMAS (en inglés KIMO_SAVI = KInematically MODified and Soil Adjusted Vegetation Index) para un cultivo de maíz y algodón (Romero *et al.*, 2009). Los círculos rellenos representan la etapa vegetativa y los vacíos la reproductiva.

Figure 2. Relationship between LAI and VI_CIMAS (in English KIMO_SAVI = KInematically MODified and Soil Adjusted Vegetation Index) for a crop of maize and cotton (Romero *et al.*, 2009). The filled circles represent the vegetative stage and the empty ones the reproductive stage.

en 840 nm; infrarrojo medio 1 o *IRM1* centrada en 1650 nm; infrarrojo medio 2 o *IRM2* centrada en 2200 nm. En la Figura 3 se muestra simulaciones radiativas similares a las de la Figura 1B (Paz *et al.*, 2005) para las bandas del sensor ETM+ para diferentes valores del LAI y cinco suelos con propiedades espectrales diferentes ($LAI = 0$, en la Figura 3).

Para la vegetación densa ($LAI > 3$) se observa en la Figura 3 que la banda del IRC alcanza los mayores valores de reflectancia y tiene un patrón espectral similar al de las hojas (Paz *et al.*, 2005). Según la teoría de la transferencia radiativa, la banda con mayor valor de reflectancia foliar se satura más lentamente (Ross, 1981). Entonces, el diseño de un IV debe basarse sólo en el IRC y no en el R (o A), el cual se satura rápidamente.

Diseño de índices espectrales uni-banda

Para aproximar la modelación analítica de IV mediante el uso de una banda espectral particular, se puede usar el esquema de Kubelka y Munk (1931) para el caso de dos flujos difusos en un medio turbio compuesto por hojas horizontales.

Una solución al problema de transferencia radiativa definido, es parametrizar los flujos de la radiancia en función del albedo foliar ω (reflectancia más transmitancia foliar) (Bonhomme y Varlet-Grancher, 1977; Goudriaan, 1977; Ross, 1981):

$$R_{sv} = \frac{R_{\infty} - R_s R_{\infty}^2 + (R_s - R_{\infty}) e^{(-2Kb \cdot LAI)}}{1 - [1 + e^{(-2Kb \cdot LAI)}] R_s R_{\infty} + R_{\infty}^2 e^{(-2Kb \cdot LAI)}}$$

$$T_{sv} = \frac{(1 + R_{\infty}^2) e^{(-Kb \cdot LAI)}}{1 - [1 + e^{(-2Kb \cdot LAI)}] R_s R_{\infty} + R_{\infty}^2 e^{(-2Kb \cdot LAI)}} \quad (1)$$

For the dense vegetation ($LAI > 3$) Figure 3 shows that the band of the NIR reaches the highest values of reflectance and has a spectral pattern similar to that of the leaves (Paz *et al.*, 2005). According to the theory of radiative transfer, the band with the highest value of leaf reflectance is saturated more slowly (Ross, 1981). Then, the design of a VI should be based only on the NIR and not on the R (or B), which is saturated quickly.

Design of uni-band spectral indexes

To approximate the analytical modeling of VI by the use of a particular spectral band, the Kubelka and Munk scheme (1931) can be used for the case of two diffuse fluxes in a turbid medium composed of horizontal leaves.

A solution for the defined problem of radiative transfer is to parameterize the fluxes of the radiancia in function of the leaf albedo ω (reflectance plus leaf transmittance) (Bonhomme and Varlet-Grancher, 1977; Goudriaan, 1977; Ross, 1981):

$$R_{sv} = \frac{R_{\infty} - R_s R_{\infty}^2 + (R_s - R_{\infty}) e^{(-2Kb \cdot LAI)}}{1 - [1 + e^{(-2Kb \cdot LAI)}] R_s R_{\infty} + R_{\infty}^2 e^{(-2Kb \cdot LAI)}}$$

$$T_{sv} = \frac{(1 + R_{\infty}^2) e^{(-Kb \cdot LAI)}}{1 - [1 + e^{(-2Kb \cdot LAI)}] R_s R_{\infty} + R_{\infty}^2 e^{(-2Kb \cdot LAI)}} \quad (1)$$

where, Kb is the extinction coefficient for horizontal black leaves; the K term is generically used to define an extinction coefficient; the sv term means soil-vegetation system and s soil. R is generically used to denote reflectance of any spectral band.

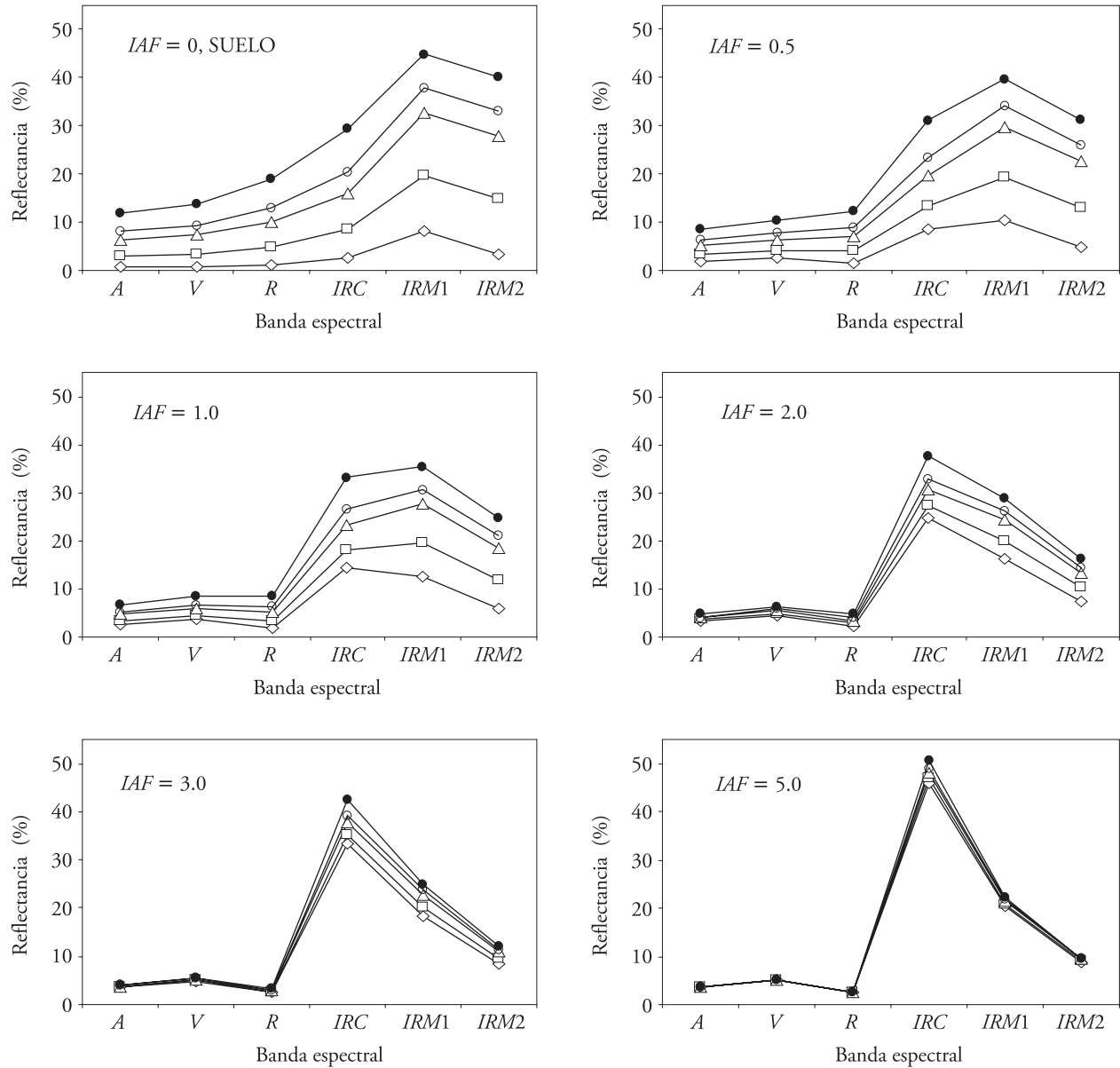


Figura 3. Patrones espectrales de las bandas del sensor ETM+ asociadas con diferentes valores del *LAI* y suelos, donde cada patrón, para un *LAI* fijo, representa un tipo diferente de suelo.

Figure 3. Spectral patterns of the bands of the ETM+ sensor associated with different values of *LAI* and soils, where each pattern, for a fixed *LAI*, represents a different type of soil.

donde, Kb es el coeficiente de extinción para hojas negras horizontales; el término K se usa en forma genérica para definir un coeficiente de extinción, el término sv significa sistema suelo-vegetación y s suelo. R se usa en forma genérica para denotar reflectancia de cualquier banda espectral.

Para la banda del R , $R_s R_\infty$, R_s , R_∞^2 y R_∞^2 son despreciables, por lo que la ecuación (1) se puede simplificar a:

For the band of R , $R_s R_\infty$, R_s , R_∞^2 and R_∞^2 are negligible, so the equation (1) can be simplified to:

$$\begin{aligned} R_{sv} &\approx R_\infty - (R_\infty - R_s)T_R^2 \\ T_{sv} = T_R &\approx e^{(-KbLAI)} \end{aligned} \quad (2)$$

where T is transmittance. The exponential relationship defined by the Beer-Lambert law for transmittance is only valid in the case of black leaves.

$$\begin{aligned} R_{sv} &\approx R_{\infty} - (R_{\infty} - R_s)T_R^2 \\ T_{sv} &= T_R \approx e^{(-KhIAF)} \end{aligned} \quad (2)$$

donde T es la transmitancia. La relación exponencial definida por la ley de Beer-Lambert para la transmitancia sólo es válida para el caso de hojas negras.

En el caso de la banda del IRC , la simplificación es más complicada y puede aproximarse como:

$$\begin{aligned} IRC_{sv} &\approx IRC_{\infty} - (IRC_{\infty} - IRC_s)T_{IRC}^p \\ T_{sv} &= T_{IRC} \approx e^{(-Kh'IAF)} \end{aligned} \quad (3)$$

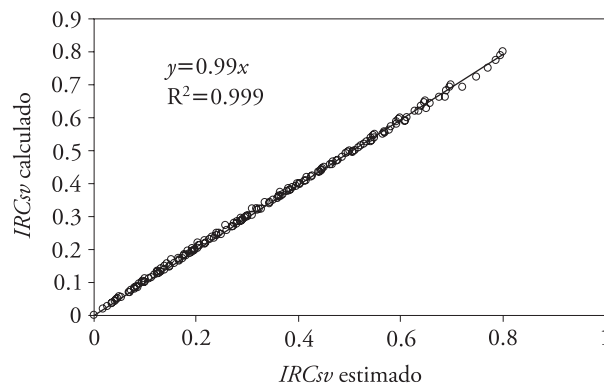
donde Kh' es función de Kh y ω ($pKh' < 2Kh$). El exponente p (< 2) está definido por la transmitancia foliar en el IRC . Para el caso general, hojas no negras y no horizontales, usando simulaciones radiativas del modelo SAIL (Verhoef, 1984) y de evidencia experimental (Rodskjer, 1972; Huete, 1988), una aproximación aceptable es usar $p = 1$ ($K_{IRC} = 0.5 K_R$), que considera en forma implícita las propiedades de hojas no negras.

La aproximación de la relación (3) puede analizarse considerando el caso de suelo negro ($IRC_s = 0$):

$$IRC_{sv} = \frac{IRC_{\infty}(1 - T_{IRC}^2)}{1 + IRC_{\infty}^2 T_{IRC}^2} \approx IRC_{\infty} - IRC_{\infty} T_{IRC}^p \quad (4)$$

esta relación se muestra en la Figura 4 para la variación del exponente p con los valores de IRC_{∞} . Esta última variable es una función no lineal del albedo foliar (Ross, 1981).

Aun cuando los desarrollos de las aproximaciones de radianza difusa y hojas horizontales negras sólo son aplicables a este



In the case of the band of NIR , the simplification is more complicated and can be approached as:

$$\begin{aligned} NIR_{sv} &\approx NIR_{\infty} - (NIR_{\infty} - NIR_s)T_{NIR}^p \\ T_{sv} &= T_{NIR} \approx e^{(-Kh'IAF)} \end{aligned} \quad (3)$$

where Kh' is function of Kh and ω ($pKh' < 2Kh$). The p (< 2) exponent is defined by the leaf transmittance in NIR . For the general case, leaves no black and no horizontal, using radiative simulations of the SAIL model (Verhoef, 1984) and of experimental evidence (Rodskjer, 1972; Huete, 1988), an acceptable approximation is to use $p = 1$ ($K_{NIR} = 0.5 K_R$), which implicitly considers the properties of non-black leaves.

The approximation of the relationship (3) can be analyzed considering the case of black soil ($NIR_s = 0$):

$$NIR_{sv} = \frac{NIR_{\infty}(1 - T_{NIR}^2)}{1 + NIR_{\infty}^2 T_{NIR}^2} \approx NIR_{\infty} - NIR_{\infty} T_{NIR}^p \quad (4)$$

this relationship is shown in Figure 4 for the variation of the p exponent with the values of NIR_{∞} . The latter variable is a nonlinear function of the leaf albedo (Ross, 1981).

Even though the developments of the approximations of diffuse radiance and black horizontal leaves are only applicable to this case, the mathematical structure defined in the equations (1), (2) and (3) is valid for the case of total radiance, and leaves not horizontal and no black, as the total radiance is a linear relationship of the diffuse and direct radiance, weighted by the fractions of these in the illumination (Ross, 1981).

Of the equations (2) and (3), LAI can be estimated as:

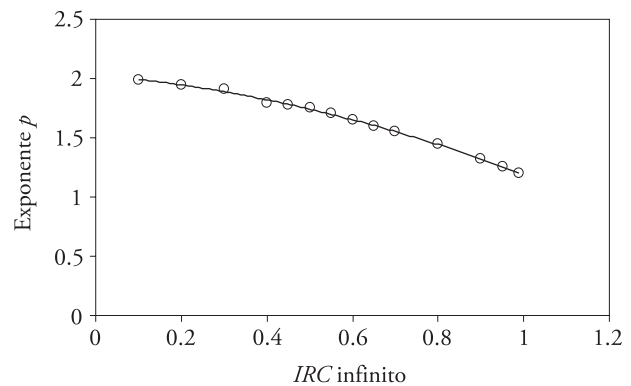


Figura 4. Análisis de la aproximación de la relación (4) y la dependencia entre el exponente p y los valores de IRC_{∞} .
Figure 4. Analysis of the approximation of the relationship (4) and the dependence between exponent p and values of NIR_{∞} .

caso, la estructura matemática definida en las ecuaciones (1), (2) y (3) es válida para el caso de radianza total, y de hojas no horizontales y no negras, ya que la radianza total es una relación lineal de la radianza difusa y directa, ponderadas por las fracciones de éstas en la iluminación (Ross, 1981).

De las ecuaciones (2) y (3), el LAI puede estimarse como:

$$LAI = -\frac{1}{2Kb} \ln \left(\frac{R_{\infty} - R_{sv}}{R_{\infty} - R_s} \right)$$

$$LAI = -\frac{1}{pKb'} \ln \left(\frac{IRC_{\infty} - IRC_{sv}}{IRC_{\infty} - IRC_s} \right) \quad (5)$$

Así, para el caso del IRC se puede establecer una relación lineal con el LAI usando:

$$LAI = n \cdot IVIRC$$

$$IVIRC = -\ln \left(\frac{IRC_{\infty} - IRC_{sv}}{IRC_{\infty} - IRC_s} \right) \quad (6)$$

donde $IVIRC$ es un IV basado en el IRC y n es una constante empírica.

El problema de la relación (6) es que se requiere conocer el valor del IRC asociado al suelo (IRC_s) debajo de la vegetación, parámetro no accesible en forma directa en las imágenes satelitales. Paz *et al.* (2009) mostraron un método operacional para estimar todos los parámetros requeridos para parametrizar las relaciones (5), pero con el uso de información multi-temporal o muestreos de campo uni-temporales, con cobertura variable del sistema suelo-vegetación. En este caso interesa el diseño de un IV que no requiera calibrarse.

Diseño de un índice espectral de la vegetación para iso-suelos

Para evitar la dependencia del $IVIRC$ de valores particulares de IRC_s , se puede modificar el origen de IRC al rotar y trasladar el eje del R para que coincida con la línea del suelo. Para realizar esta tarea es posible definir los siguientes índices (Paz *et al.*, 2007), Figura 5, omitiendo sv :

$$dIRC = IRC - (a_s + b_s R) \quad (7)$$

$$dR = \left(\frac{IRC - a_s}{b_s} \right) - R \quad (8)$$

que están relacionados por:

$$LAI = -\frac{1}{2Kb} \ln \left(\frac{R_{\infty} - R_{sv}}{R_{\infty} - R_s} \right)$$

$$LAI = -\frac{1}{pKb'} \ln \left(\frac{NIR_{\infty} - NIR_{sv}}{NIR_{\infty} - NIR_s} \right) \quad (5)$$

Thus, for the case of NIR a linear relation can be established with the LAI using:

$$LAI = n \cdot NIRIV$$

$$NIRIV = -\ln \left(\frac{NIR_{\infty} - NIR_{sv}}{NIR_{\infty} - NIR_s} \right) \quad (6)$$

where $NIRIV$ is a VI based on the NIR and n is an empirical constant.

The problem of the relationship (6) is that it is required to know the value of the NIR associated to soil (NIR_s) under the vegetation, parameter not accessible in direct form in the satellite images. Paz *et al.* (2009) showed an operational method to estimate all the parameters required to parameterize the relationships (5), but with the use of multi-temporal information or uni-temporal samples of field, with variable coverage of the soil-vegetation system. In this case, it concerns the design of a VI which does not require calibration.

Design of a spectral index of the vegetation for iso-soils

To avoid the dependence of the $NIRIV$ on particular values of NIR_s , NIR origin can be modified when rotating and translating the R axis to coincide with the soil line. To perform this task it is possible to define the following indexes (Paz *et al.*, 2007), Figure 5, omitting sv :

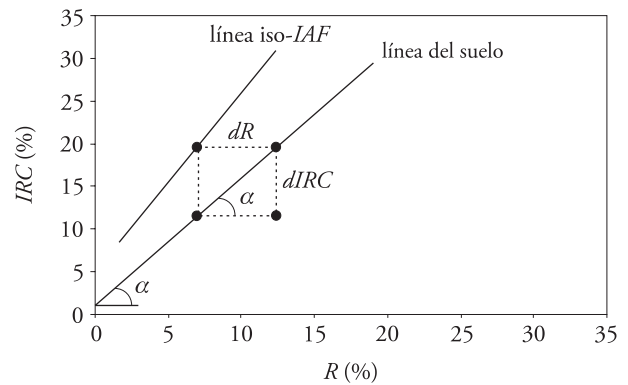


Figura 5. Definición de los índices $dIRC$ y dR (Paz *et al.*, 2007).

Figure 5. Definition of indexes $dNIR$ and dR (Paz *et al.*, 2007).

$$dIRC = (\tan \alpha) dR = b_S dR \quad (9)$$

El uso del índice $dIRC$ evita el problema de conocer IRC_s y lo plantea en términos de los parámetros a_S y b_S de la línea del suelo. Así, de la relación definida en (6) se define el IV con base en iso-suelo ($IVIS$):

$$\begin{aligned} IVIS &= -\ln\left(\frac{dIRC_{\infty} - dIRC}{dIRC_{\infty} - dIRC_s}\right) \\ dIRC_{\infty} &= IRC_{\infty} - (a_S + b_S R_{\infty}) \\ dIRC_s &= IRC_s - (a_S + b_S R_s) \end{aligned} \quad (10)$$

Al conocer los parámetros de la línea del suelo $dIRC_s = 0$, la relación del $IVIS$ se simplifica a:

$$IVIS = -\ln\left(\frac{dIRC_{\infty} - dIRC}{dIRC_{\infty}}\right) \quad (11)$$

Conocidos los parámetros de la línea del suelo (o supuestos como asociados a una línea del suelo virtual), es posible estimar el $IVIS$ al usar un valor de $dIRC_{\infty}$ estimado de los datos o definido con un valor fijo grande.

A partir de las simulaciones radiativas de la Figura 1A, la Figura 6 muestra la relación entre el $IVIS$ y el IAF para el caso de un suelo oscuro (suelo B en la Figura 1A) y uno claro (suelo A), ambos con efectos simulados de cambios de humedad de un estado seco a uno húmedo. Se observa que las variaciones en los cambios de las propiedades ópticas de los suelos (humedad) tienen un efecto relativamente pequeño en los patrones de la relación, por lo que a nivel de análisis de píxel $\times$ píxel, se puede usar el $IVIS$ en forma confiable con efectos mínimos del suelo debajo de la vegetación.

En la Figura 6 el término estimado implica el uso de los parámetros (a_S , b_S y $dIRC_{\infty}$) estimados directamente de los datos, y el término virtual significa el uso de parámetros virtuales ($a_S = 0$, $b_S = 1$, $dIRC_{\infty}$ = valor arbitrario, pero mayor de 50 %). En la Figura 6 se observa que el uso de parámetros estimados o virtuales genera patrones similares, por lo que la estrategia de uso de parámetros virtuales puede hacerse en términos confiables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los datos del experimento de algodón de Huete *et al.* (1985) y de maíz de Bausch (1993), discutidos ampliamente en Paz *et al.* (2005 y 2007), a continuación se analizan los patrones del $IVIS$ en relación al IAF .

$$dNIR = NIR - (a_S + b_S R) \quad (7)$$

$$dR = \left(\frac{NIR - a_S}{b_S}\right) - R \quad (8)$$

that are related by

$$dNIR = (\tan \alpha) dR = b_S dR \quad (9)$$

The use of the $dNIR$ index avoids the problem of knowing NIR_s and poses it in terms of the parameters a_S and b_S of the line of soil. Thus, from the relation defined in (6) the VI is defined based on iso-soil ($ISVI$):

$$\begin{aligned} ISVI &= -\ln\left(\frac{dNIR_{\infty} - dNIR}{dNIR_{\infty} - dNIR_s}\right) \\ dNIR_{\infty} &= NIR_{\infty} - (a_S + b_S R_{\infty}) \\ dNIR_s &= NIR_s - (a_S + b_S R_s) \end{aligned} \quad (10)$$

By knowing the parameters of the soil line $dNIR_s = 0$, $ISVI$ relationship simplifies to:

$$ISVI = -\ln\left(\frac{dNIR_{\infty} - dNIR}{dNIR_{\infty}}\right) \quad (11)$$

Knowing the parameters of the soil line (or assumed as associated with a virtual soil line), it is possible to estimate the $ISVI$ using a value of $dNIR_{\infty}$ estimated from data or defined with a large fixed value.

From the radiative simulations of Figure 1A, Figure 6 shows the relationship between the $ISVI$ and LAI in the case of dark soil (soil B in Figure 1A) and a light one (soil A), both with simulated effects of moisture changes from a dry to a moist state. It is noted that variations in the changes of the optical properties of the soil (moisture) have a relatively little effect on the patterns of the relationship, so that at level of analysis of pixel $\times$ pixel, $ISVI$ can be reliably used with minimal effects of soil under the vegetation.

In Figure 6 the term estimated implies the use of the parameters (a_S , b_S and $dNIR_{\infty}$) estimated directly from data, and the term virtual means the use of virtual parameters ($a_S = 0$, $b_S = 1$, $dNIR_{\infty}$ = arbitrary value, but greater than 50 %). In Figure 6 is observed that the use of estimated or virtual parameters generates similar patterns, so the strategy of use of virtual parameters can be done in reliable terms.

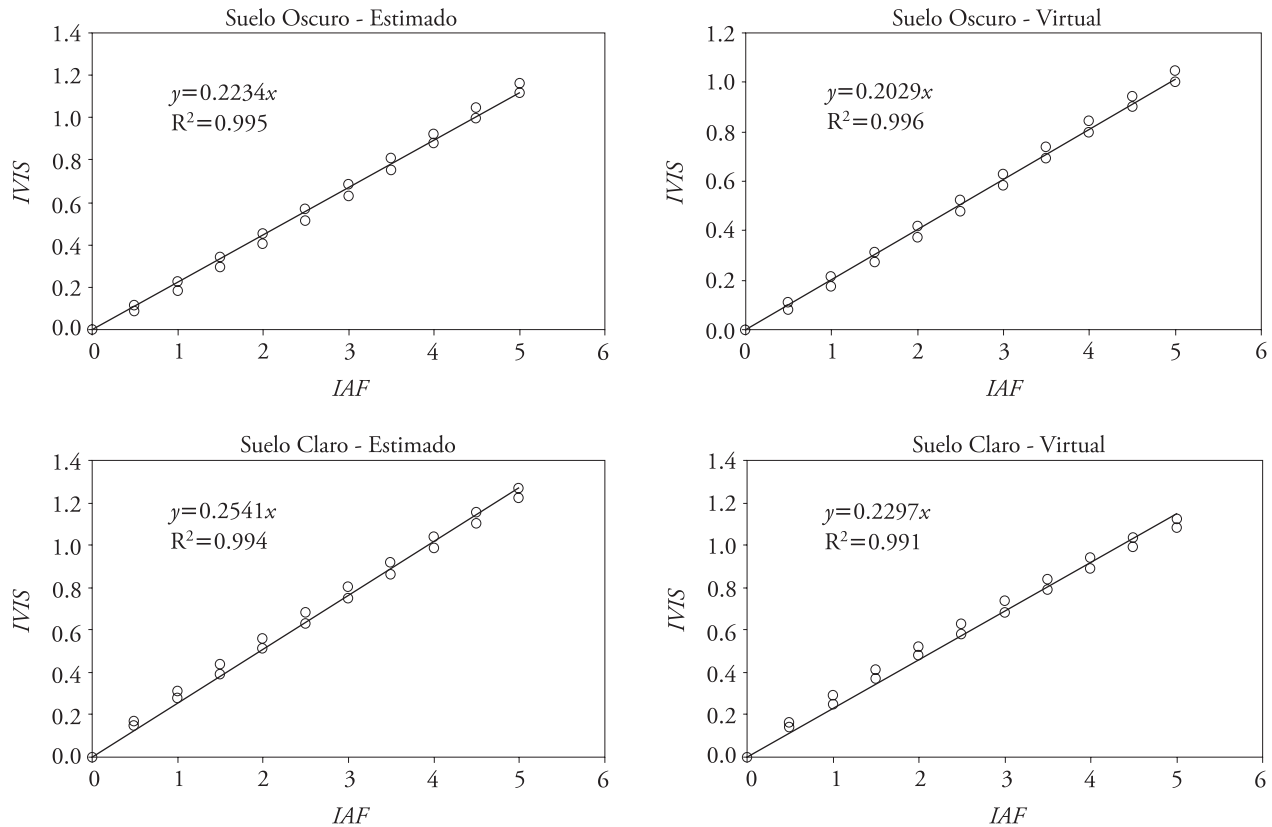


Figura 6. Relación entre el IVIS y el IAF para un suelo claro y uno oscuro, usando simulaciones radiativas.
Figure 6. Relationship between IVIS and LAI for a light soil and a dark one, using radiative simulations.

En la Figura 7 se muestran los patrones espectrales del experimento de maíz en el espacio del $R-IRC$ para un suelo claro (suelo C) y uno oscuro (suelo O), bajo la condición de suelo seco y húmedo.

La misma información de la Figura 7 se muestra en la Figura 8, pero para el experimento de algodón con tres suelos secos.

La relación entre el IAF y el IVIS se muestra en la Figura 9 para el caso del experimento de maíz y, en la Figura 10, para el experimento de algodón.

La relación entre el IAF y el IVIS es de tipo lineal (Figuras 9 y 10), aún en una porción de la etapa reproductiva del crecimiento, donde las propiedades ópticas o geométricas del follaje cambian. Además, los efectos del suelo (cambio de humedad) y de varios tipos de suelos (simulando cambios drásticos en la humedad u otra propiedad asociada a las reflectancias), son bajos en los patrones lineales discutidos. Las variaciones de las reflectancias de los suelos, independientemente de las causas, están asimiladas en la línea del suelo, la cual muestra ser muy estable (Baret *et al.*, 1983),

RESULTS AND DISCUSSION

Based on the data of two field experiments with cotton (Huete *et al.*, 1985) and maize (Bausch, 1993), discussed extensively in Paz *et al.* (2005 and 2007), the VIIS patterns are then analyzed in relation to the LAI.

Figure 7 shows the spectral patterns of the maize experiment in the space of $R-NIR$ for a light soil (soil L) and a dark one (soil D), under the condition of dry and wet soil.

The same information of Figure 7 is shown in Figure 8, but for the experiment of cotton with three dry soils.

The relationship between LAI and IVIS is shown in Figure 9 for the case of the maize experiment and, in Figure 10, for the cotton experiment.

The relationship between LAI and IVIS is linear (Figures 9 and 10), even in a part of the reproductive stage of growth, where the optical or geometric properties of foliage change. Besides, the effects of soil (moisture change) and several types of

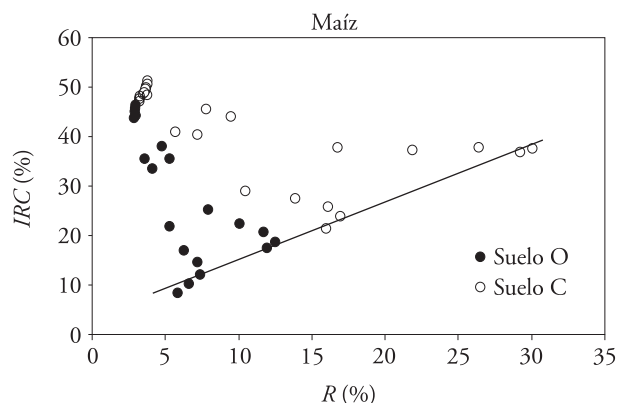


Figura 7. Patrones espectrales del crecimiento del maíz para un suelo oscuro (O) y uno claro (C), con dos condiciones de humedad (seco y húmedo).

Figure 7. Spectral patterns of maize growth for a dark (O) soil and a light (C) one, with two moisture conditions (dry and moist).

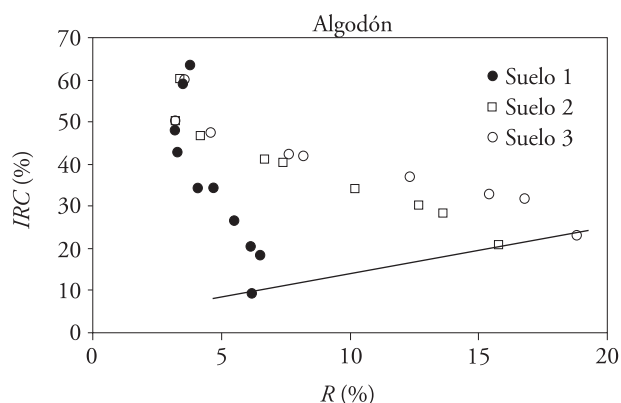


Figura 8. Patrones espectrales del crecimiento del algodón para tres suelos secos.

Figure 8. Spectral patterns of cotton growth for three dry soils.

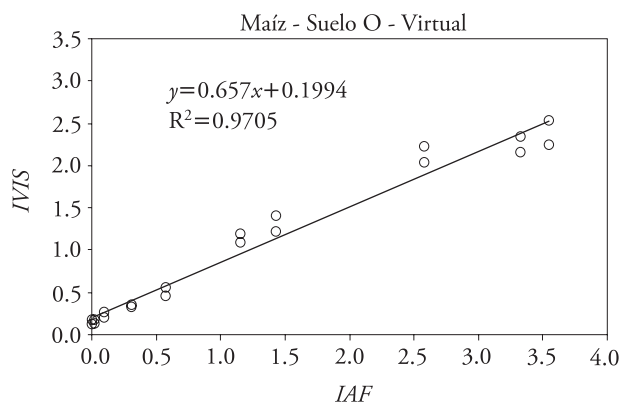
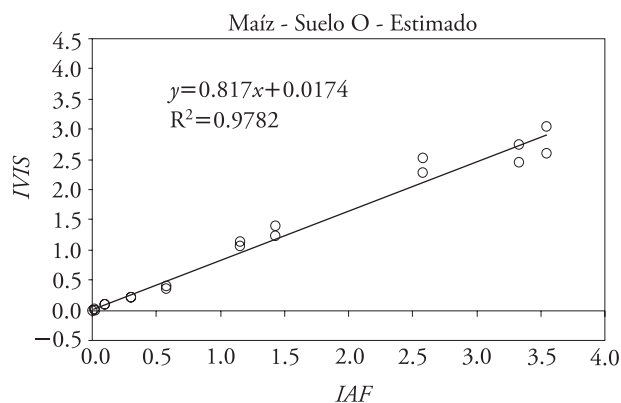
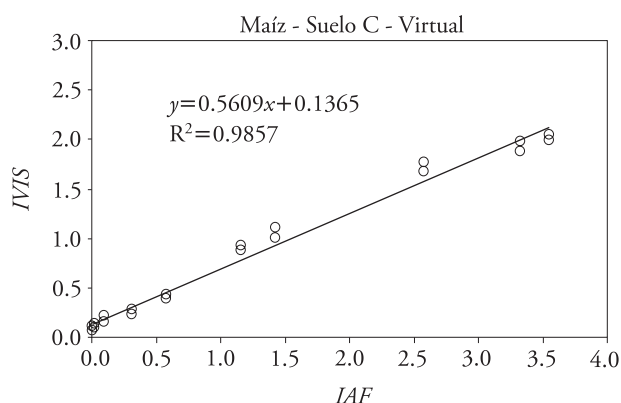
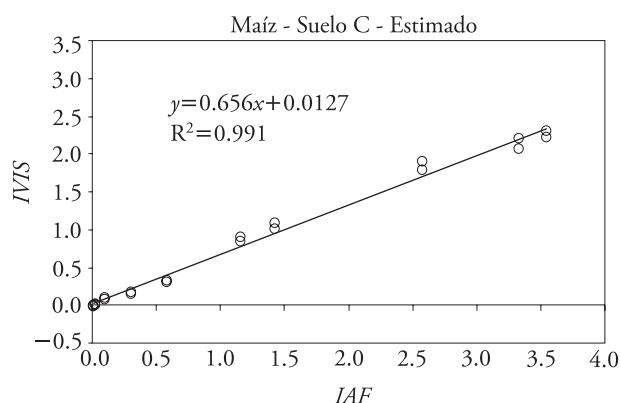


Figura 9. Relación entre el LAI y el ISVI para el experimento del maíz.

Figure 9. Relationship between LAI and ISVI for the maize experiment.

particularmente en espacios geográficos relativamente grandes. La evidencia experimental soporta el uso del IVIS como un índice espectral de la

soil (simulating drastic changes in moisture or other property associated with reflectances) are low in the linear patterns discussed. Variations in reflectances

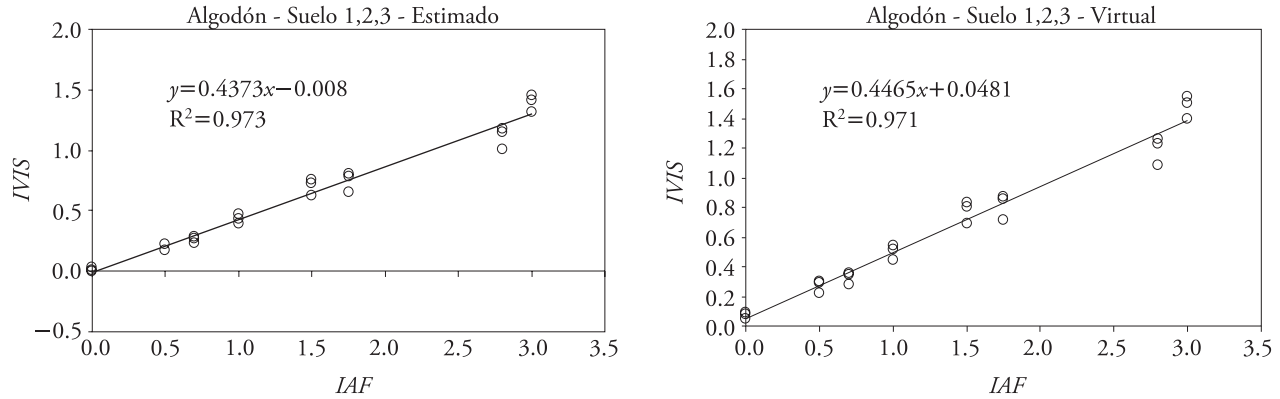


Figura 10. Relación entre el IAF y el IVIS para el experimento del algodón.
Figure 10. Relationship between LAI and ISVI for the cotton experiment.

vegetación con la propiedad de tener una relación lineal con el IAF (y la biomasa Bm , suponiendo una relación lineal entre el IAF y Bm ; Goudriaan y van Laar, 1994). Esto es válido para los cultivos analizados, así como para otros tipos de vegetación, dado que los patrones iso- IAF e iso-suelo son similares a los discutidos en el presente estudio (Yoshiaka *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2000).

De acuerdo con la evidencia experimental, el $IVIS$ no muestra problemas de saturación de la banda de R y llega al punto de saturación cuando el IRC alcanza el IRC_{∞} , que define el límite de uso de los sensores remotos en el monitoreo y caracterización de la vegetación. Las reflectancias en el infinito están asociadas al caso donde la vegetación es muy densa, de tal forma que el efecto del suelo es despreciable (Ross, 1981).

Patrones temporales del $IVIS$ y su transformación

Si se considera que la información espectral de los sensores remotos en un esquema paramétrico no está calibrada, es necesario desarrollar un modelo de la curva de crecimiento basado en el $IVIS$. Para simplificar la modelación paramétrica el $IVIS$ fue transformado ($IVIS_t$) no linealmente para que sus patrones temporales aproximen un formato lineal:

$$IVIS_t = \frac{1}{e^{IVIS}} \quad (12)$$

En la Figura 11 se muestran los patrones temporales del $IVIS$ e $IVIS_t$ para el experimento de maíz,

of soils, regardless the causes, are assimilated into the soil line, which shows to be very stable (Baret *et al.*, 1983), particularly in relatively large geographic spaces. Experimental evidence supports the use of $ISVI$ as a spectral vegetation index with the property of having a linear relationship with LAI (and biomass Bm , assuming a linear relationship between LAI and Bm ; Goudriaan and van Laar, 1994). This is valid for the analyzed crops, as well as for other types of vegetation, given that the iso- LAI and iso-soil patterns are similar to those discussed in this study (Yoshiaka *et al.*, 2000; Gao *et al.*, 2000).

According to experimental evidence, the $ISVI$ shows no saturation problems of the band of R and reaches the saturation point when the NIR reaches NIR_{∞} , which defines the limit of use of remote sensing in monitoring and characterization of vegetation. Reflectances in the infinite are associated with the case where vegetation is very dense, so the effect of soil is negligible (Ross, 1981).

Temporal patterns of the $ISVI$ and their transformation

Assuming that the spectral information of remote sensing in a parametric scheme is not calibrated, it is necessary to develop a model of the growth curve based on the $ISVI$. To simplify the $ISVI$ parametric modeling it was non-linearly transformed ($ISVI_t$) so that its temporal patterns approach a linear format:

$$ISVI_t = \frac{1}{e^{ISVI}} \quad (12)$$

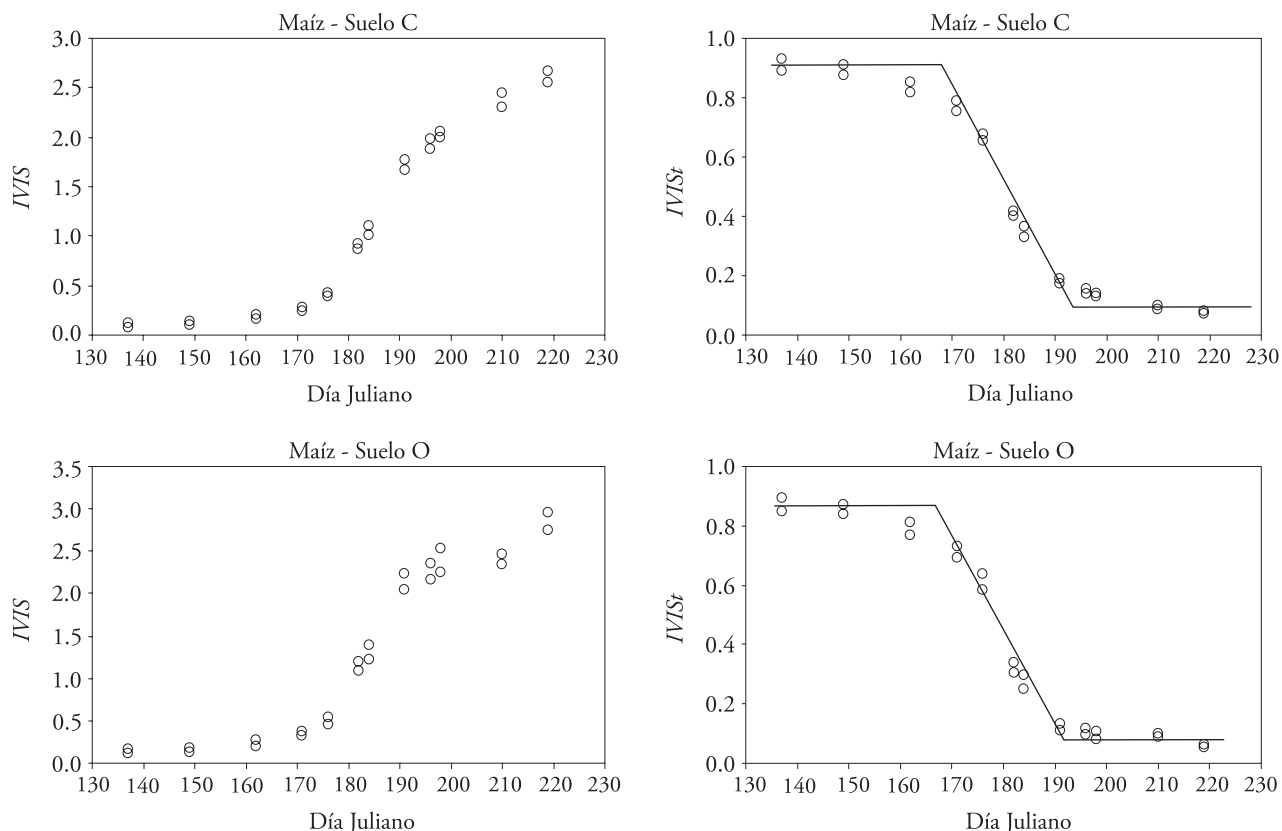


Figura 11. Patrones temporales del $IVIS$ e $IVISst$ del experimento de maíz, suelo claro (C) y oscuro (O), dos humedades.
Figure 11. Temporal patterns of $IVIS$ and $IVISst$ of the maize experiment, light (C) and dark (O) soil, two moistures.

donde para el caso del último índice, los patrones lineales resultan razonablemente adecuados, con una transición no lineal entre segmentos lineales.

Los patrones temporales del $IVIS$ e $IVISst$ para el experimento de algodón se muestran en la Figura 12, donde para el caso del último índice los patrones lineales resultan adecuados.

Figure 11 shows the temporal patterns of $IVIS$ and $IVISst$ for the maize experiment, where for the case of the last index, the linear patterns are reasonably adequate, with a nonlinear transition between linear segments.

The temporal patterns of $IVIS$ and $IVISst$ for the experiment of cotton are shown in Figure 12, where

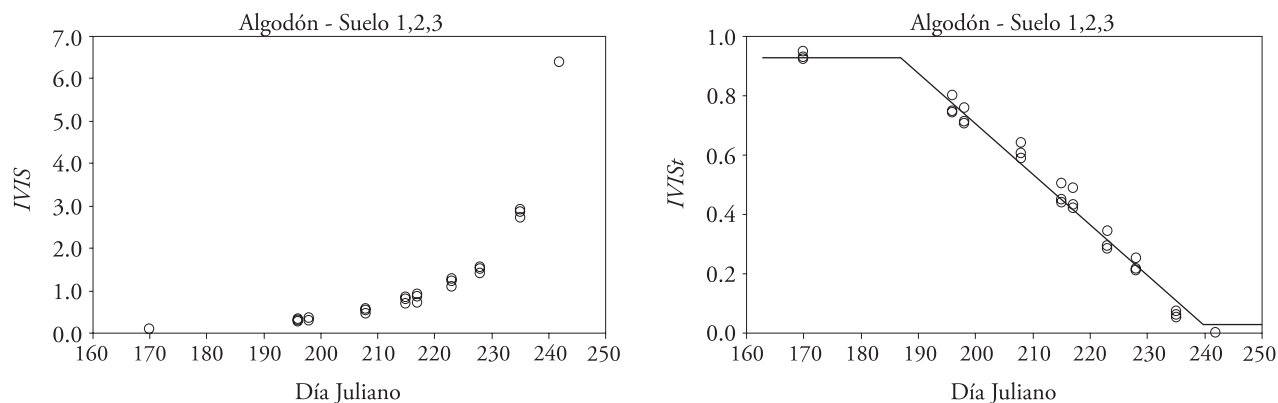


Figura 12. Patrones temporales del $IVIS$ e $IVISst$ del experimento de algodón, para tres suelos secos.
Figure 12. Temporal patterns of $IVIS$ and $IVISst$ of the cotton experiment, for three dry soils.

Los patrones temporales lineales del $IVIS_t$ asociados a la etapa previa al inicio del crecimiento (meseta inicial) y al crecimiento (etapa vegetativa y reproductiva) de las Figuras 11 y 12 pueden generalizarse para la etapa de decrecimiento (senescencia) y meseta final (dormancia o cosecha). Entre la etapa de crecimiento y decrecimiento puede presentarse una etapa de meseta intermedia (la producción y muerte del follaje está en equilibrio) (Figura 13).

La aproximación de la evolución temporal del $IVIS$ de la relación (12) permite caracterizar el crecimiento (y decrecimiento) de la vegetación en forma simple, ya que en términos algorítmicos los patrones lineales pueden ser fácilmente parametrizados de series de tiempo del $IVIS_t$ a nivel de píxel. Este procedimiento ha sido aplicado por los autores a series temporales del $IVIS_t$ del sensor MODIS, con buenos resultados.

CONCLUSIONES

El diseño de índices espectrales de la vegetación o IV usando los patrones de los parámetros de las líneas iso-índice de área foliar en el espacio del rojo-infrarrojo cercano, plantea retos importantes que requieren enfoques complejos y dependientes de constantes empíricas para su calibración. Una alternativa es el uso de IV basados en las líneas iso-suelo, particularmente usando la banda espectral del IRC , con la tasa más lenta de saturación de todas las bandas del espectro electromagnético de onda corta.

El índice $IVIS$ introducido en este estudio resuelve en forma aproximada el problema de minimización del efecto del suelo de fondo y de saturación de la banda del rojo. Su transformación a un formato

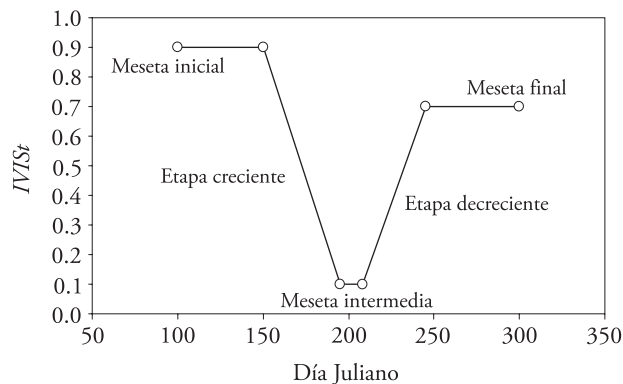


Figura 13. Modelo lineal de la evolución temporal del $IVIS_t$.
Figure 13. Linear model of the temporal evolution of $IVIS_t$.

for the case of the last index the linear patterns are adequate.

The linear temporal patterns of $ISVI_t$ associated to the initial growth (initial plateau) and to growth stage (vegetative and reproductive) of Figures 11 and 12 can be generalized for the stage of decline (senescence) and final plateau (dormant or harvest). Between the stage of growth and decline can be present an intermediate plateau phase (production and death of foliage is in equilibrium) (Figure 13).

The approximation of the temporal evolution of relationship $ISVI$ (12) allows characterizing the growth (and decline) of vegetation in simple form, as in algorithmic terms linear patterns can be easily parameterized of time series of $ISVI_t$ at pixel level. This procedure has been applied by the authors to temporal series of $ISVI_t$ of *MODIS* sensor, with good results

CONCLUSIONS

The design of spectral vegetation indexes or VI using the patterns of parameters of the lines iso-leaf area index in the red and near-infrared space, poses significant challenges that require complex and dependent approaches of empiric constants for their calibration. An alternative is the use of VI based on the iso-soil lines, particularly using the spectral band of NIR , with the slowest rate of saturation of all bands of the shortwave electromagnetic spectrum.

The $ISVI$ index introduced in this study approximately resolves the problem of minimizing the effect of soil and saturation of the red band. Its transformation into a linear format allows the parameterization of spectral growth curves ($ISVI$) of vegetation in the form of simple algorithms.

—End of the English version—



lineal permite la parametrización de las curvas de crecimiento espectrales ($IVIS$) de la vegetación en forma algorítmicamente simple.

LITERATURA CITADA

Baret, F., S. Jacquemoud, and J. F. Hanocq. 1983. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Rev.* 7: 65-82.

- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing Environ.* 46: 213-222.
- Bonhomme, R., and C. Varlet-Grancher. 1977. Application aus couverts vegetaux de lois rayonnement en milieu diffusant I Etablissement des lois et verifications experimentales. *Annales Agron.* 28: 567-582.
- Gao, X., A. R. Huete, W. Ni, and T. Miura. 2000. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing Environ.* 74: 609-620.
- Gilabert, M. A., J. González-Piqueras, F. J. García-Haro, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing Environ.* 82: 303-310.
- Goudriaan, J. 1977. *Crop Micrometereology. A Simulation Study. Simulation Monographs.* PUDOC. Wageningen, The Netherlands 259 p.
- Goudriaan, J., and H. M. van Laar. 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises. Current Issues in Production Ecology.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 238 p.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environ.* 25: 295-309.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing Environ.* 17: 35-53.
- Kubelka, P., and F. Munk. 1931. Ein beitrage zur optik der farbanstriche. *Ann. Techn. Phys.* 11: 593-601.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez, y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- 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.
- Paz, F., A. Zarco, A. Cano, M. A. Bolaños, y M. Odi. 2009. Un método simple para estimar las propiedades geométricas y ópticas de las hojas de la vegetación. *Agrociencia* 43: 417-425.
- Rodskjer, N. 1972. Measurements of solar radiation in barley and oats. *Swed. J. Agric. Res.* 2: 71-81.
- Romero, E., F. Paz, E. Palacios, M. Bolaños, R. Valdez, y A. Aldrete. 2009. Diseño de un índice espectral de la vegetación desde una perspectiva conjunta de los patrones exponenciales y lineales del crecimiento. *Agrociencia* 43: 291-307.
- Ross, J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands.* W. Junk, Norwell, MA. 391 p.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographs infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing Environ.* 8: 127-150.
- Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing Environ.* 16: 125-141.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Trans. in Geosci. and Remote Sensing* 34: 1254-1265.
- Yoshioka, H., T. Miura, A. R. Huete, and B. D. Ganapol. 2000. Analysis of vegetation isolines in red-NIR reflectance space. *Remote Sensing Environ.* 74: 313-326.