

CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE ESTRÉS USANDO ÍNDICES ESPECTRALES DE LA VEGETACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES RELACIONADAS CON LA BIOMASA AÉREA

CHARACTERIZATION OF STRESS EFFECT USING SPECTRAL VEGETATION INDEXES FOR THE ESTIMATE OF VARIABLES RELATED TO AERIAL BIOMASS

Marisol Reyes, Fernando Paz*, Marcos Casiano, Fermín Pascual, M. Isabel Márin, Enrique Rubiños

Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México.

RESUMEN

El uso de índices espectrales o *IV* de la vegetación, basados en las líneas iso-*IAF* en el espacio espectral del rojo (R) e infrarrojo cercano (*IRC*), plantea relaciones diferentes en las etapas vegetativas y de senescencia con variables biofísicas como la biomasa aérea o *Bm*, el índice de área foliar o *IAF* o la cobertura aérea de la vegetación o *fv*. Con el índice *IVIS* basado en las líneas iso-suelo del espacio *R-IRC*, los patrones temporales pueden identificarse mediante un modelo expo-lineal y exponencial. Así, las pendientes para la etapa vegetativa y de senescencia pueden usarse para cuantificar el nivel de estrés utilizando el concepto de equivalencia ambiental. Este esquema de caracterización fue analizado con mediciones radiométricas y de *fv* en cultivos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), garbanzo (*Cicer arietinum* L.), cártamo (*Carthamus tinctorius*, L.), sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench) y trigo (*Triticum spec.* L.), del Valle del Yaqui, estado de Sonora, México. Los resultados obtenidos soportan la aproximación de caracterización planteada para el nivel de estrés.

Palabras clave: cobertura aérea, equivalencia ambiental, *IVIS*, modelo expo-lineal, nivel de estrés.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la biomasa aérea (*Bm*), fresca o seca, asociada al crecimiento de los cultivos agrícolas puede ser aproximada usando modelos biofísicos (Stockle *et al.*, 2003). El problema de esta aproximación son los requerimientos de información necesarios para parametrizar los modelos, particularmente en aplicaciones en tiempo real

ABSTRACT

The use of spectral indexes or vegetation *VI*, based on iso-*LAI* lines in the spectral space of red (R) and near infrared (*NIR*), presents different relations in vegetative and senescence periods with biophysical variables such as aerial biomass or *Bm*, the index of foliar area or *LAI*, or aerial vegetation cover or *fv*. With the *ISVI* index based on iso-soil lines of the *R-NIR* space, the temporal patterns may be identified by an expo-linear and exponential model. Thus, the slopes for the vegetative phase and for senescence can be used to quantify the stress level utilizing the concept of environmental equivalence. This scheme of characterization was analyzed with radiometric and *fv* measurements in crops of bean (*Phaseolus vulgaris* L.), chickpea (*Cicer arietinum* L.), safflower (*Carthamus tinctorius* L.), sorghum (*Sorghum bicolor*, L.Moench), and wheat (*Triticum spec.* L.) of the Valle del Yaqui, State of Sonora, México. The obtained results support the approximation of the characterization proposed for the stress level.

Key words: aerial cover, environmental equivalence, *ISVI*, expolinear model, stress level.

INTRODUCTION

The estimate of fresh or dry aerial biomass (*Bm*), associated to the growth of agricultural crops may be approximated using biophysical models (Stockle *et al.*, 2003). The problem of this approximation is caused by the requirements of information needed to parameterize the models, particularly in applications at real time or at operational predictive levels. The use of remote sensing technology on spatial platforms is an alternative for *Bm* estimation, which acquires data on different spectral bands associated to vegetation.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Enero, 2010. Aprobado: Noviembre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 221-233. 2011.

o a niveles predictivos operacionales. Una alternativa para la estimación de la Bm es el uso de la tecnología de los sensores remotos en plataformas espaciales, que adquiere datos en diferente bandas espectrales asociadas a la vegetación. Las bandas del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC) se usan para discriminar el crecimiento de la vegetación, dado su alto contraste entre la banda fotosintética del R y la no fotosintética del IRC (Tucker, 1979). A partir de este par de bandas se han desarrollado numerosos índices espectrales de la vegetación o *IV* (Verstraete and Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007). Los *IV* se han relacionado empíricamente con la Bm, obteniendo correlaciones estadísticas (Tucker *et al.*, 1981; Calera *et al.*, 2004) que presumen una relación fija y el supuesto de medios física y radiativamente homogéneos.

El efecto del estrés (hídrico o nutrimental, principalmente) en la relación de los *IV* y la biomasa ha sido poco estudiado. Para realizar un análisis del efecto del estrés en la biomasa usando sensores remotos es necesario considerar que las reflectancias están relacionadas principalmente con el índice de área foliar (*IAF*), la cobertura aérea (*fv*) y las propiedades ópticas de los fitoelementos y el suelo (Ross, 1981). Las reflectancias no miden biomasa y sólo se pueden estimar en forma indirecta mediante el *IAF* y *fv*. En cultivos sin estrés se puede usar la hipótesis de una relación lineal entre la Bm y el *IAF* para realizar estimaciones de la primera (Goudriaan y Monteith, 1990). Cuando los cultivos pasan más allá de cierto nivel de estrés, la relación entre el *IAF* y la Bm se desacopla (las plantas aumentan sus reservas de fotosintatos en la parte subterránea), relajando la relación entre biomasa aérea y producción foliar (Stockle *et al.*, 2003).

El presente estudio presenta un enfoque genérico de caracterización de la relación entre la biomasa y los *IV*, basado en el concepto de equivalencia ambiental (Solorio *et al.*, 2008; Paz *et al.*, 2009a). Asimismo, se analiza la relación entre los *IV* y la *fv* que permite su aproximación en términos acoplados a los niveles de estrés de los cultivos. El experimento Yaqui 2008 se usa para mostrar los desarrollos de este trabajo.

Modelos temporales de los *IV* espectrales

En la Figura 1a se muestra la evolución de los patrones iso-*IAF* usando simulaciones radiativas (Paz *et al.*, 2005), donde el caso de *IAF* = 0 (suelo desnudo)

Bands of red (R) and near infrared (*NIR*) are used to differentiate vegetation growth, given its high contrast between the photosynthetic band of R and the nonphotosynthetic band of *NIR* (Tucker, 1979). From this pair of bands, numerous spectral indexes of vegetation or *VI* have been developed (Verstraete and Pinty, 1996; Gilabert *et al.*, 2002; Paz *et al.*, 2007). The *VI* have empirically been related to Bm, obtaining statistical correlations (Tucker *et al.*, 1981; Calera *et al.*, 2004), which they suppose a fixed relation and assuming of physical and radiatively homogeneous media.

Stress effect (mainly hydric or nutrimental) related to *VI* and biomass has scarcely been studied. In order to conduct an analysis of stress effect on biomass using remote sensing, it is necessary to consider that reflectance is mainly related to the leaf area index (*LAI*), aerial cover (*fv*), and optical characteristics of phytoelements and soil (Ross, 1981). Reflectances do not gauge biomass and can only be estimated indirectly by means of *LAI* and *fv*. In crops not subjected to stress, the hypothesis of a linear relationship between Bm and *LAI* can be used to make estimates of the former (Goudriaan and Monteith, 1990). When the crops surpass certain stress level, the relation between *LAI* and Bm is uncoupled (plants increase their underground reserves of photosyntates) relaxing the relation between aerial biomass and leaf production (Stockle *et al.*, 2003).

The present study presents a generic approach of the characterization of the relationship between biomass and *VI* based on the concept of environmental equivalence (Solorio *et al.*, 2008; Paz *et al.*, 2009a). Likewise, we analyze the relationship between *VI* and *fv* allowing its approximation coupled to crop stress levels. The Yaqui 2008 experiment is used to show the development of this work.

Temporal models of spectral *VI*'s

In Figure 1a, evolution of iso-*LAI* patterns is shown, using radiative simulations (Paz *et al.*, 2005), where the case of *LAI* = 0 (bare soil) is represented by soil line $NIR = a_s + b_s R$ and iso-*LAI* lines represented by $NIR = a_o + b_o R$, where parameters a_o and b_o are dependent on *LAI* (and *fv* for heterogeneous media). The case of Figure 1A can be applied to an individual pixel level of a satellite image, where soil reflectances vary according to humidity (from dry to humid soil

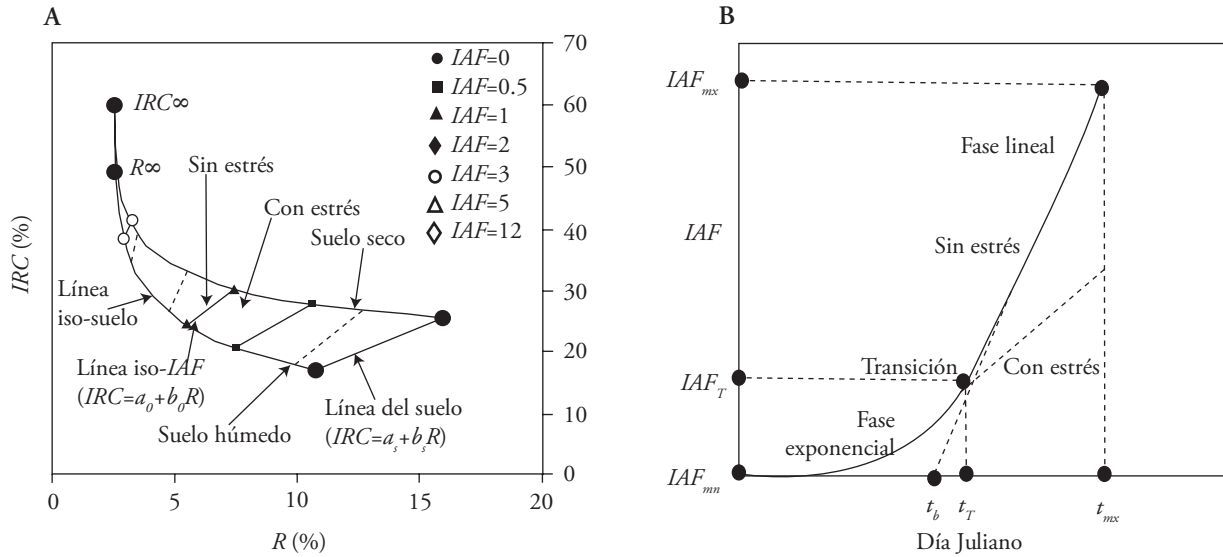


Figura 1. (A) Patrones espectrales del crecimiento de un cultivo en el espacio del R -IRC. (B) Patrón temporal del LAI.
Figure 1. (A) Spectral patterns of crop growth in the space of R -NIR. (B) Temporal pattern of LAI.

está representado por la línea del suelo $IRC = a_s + b_s R$ y líneas iso-LAI representadas por $IRC = a_0 + b_0 R$, donde los parámetros a_0 y b_0 son dependientes del LAI (y fv para medios heterogéneos). El caso de la Figura 1A es aplicable a nivel de un píxel individual de una imagen satelital, donde las reflectancias del suelo varían en función de la humedad (desde suelo seco a húmedo y viceversa). La curva de igual contenido de humedad (suelo seco o húmedo en la Figura 1A) se denomina iso-suelo y representa propiedades ópticas constantes del suelo debajo de un cultivo.

Paz *et al.* (2007) plantean el diseño de índices espectrales de la vegetación usando la relación entre los parámetros de las líneas iso-LAI de los patrones espectrales en el espacio del R -IRC (Paz *et al.*, 2005). En esta perspectiva, Romero *et al.* (2009) desarrollaron el índice IV_CIMAS para modelar la fase exponencial y lineal del crecimiento de la vegetación (Figura 1B). El problema de este enfoque es que requiere la calibración de constantes empíricas asociadas a los cultivos, y además los índices muestran poca variación al aumentar el LAI a valores cercanos al punto de saturación de la banda del R (R_∞ o reflectancia de medio denso o infinito), lo que se muestra en la Figura 1A. La banda del IRC alcanza su punto de saturación (IRC_∞ , Figura 1A) para valores más altos del LAI (Ross, 1981).

Para evitar la poca sensibilidad del IV_CIMAS (o cualquier índice de vegetación basado en los parámetros de las líneas iso-LAI), Paz *et al.* (2010) proponen

and *vice versa*). The curve of equal humidity content (dry or humid soil in Figure 1A) is called iso-soil and represents constant optical soil properties under a crop.

Paz *et al.* (2007) propose the design of spectral vegetation indexes using the relation between the parameters of iso-LAI lines of spectral patterns in R -NIR space (Paz *et al.*, 2005). From this perspective, Romero *et al.* (2009) developed the $KIMO_SAVI$ index, in order to model the exponential and linear phase of vegetation growth (Figure 1B). This approach has the problem of requiring the calibration of empirical constants associated to the crops, and furthermore, the indexes show little variation at increasing the LAI to values close to the saturation point of band R (R_∞ or dense medium or infinite reflectance) which is shown in Figure 1A. The band of NIR reaches its saturation point (NIR_∞ , Figure 1A) for higher values of LAI (Ross, 1981).

In order to avoid the low sensitivity of VI_CIMAS (or any vegetation index based on the parameters of the iso-LAI lines), Paz *et al.* (2011) propose using a VI based on iso-soil curves ($ISVI$), which is defined by:

$$\begin{aligned}
 IVIS &= \ln \left\{ \frac{dIRC_\infty - dIRC}{dIRC_\infty} \right\} \\
 dIRC &= IRC - (a_s + b_s R) \\
 dIRC_\infty &= IRC_\infty - (a_s + b_s R)
 \end{aligned} \quad (1)$$

usar un IV basado en las curvas iso-suelo ($IVIS$), el cual está definido por:

$$\begin{aligned} IVIS &= \ln\left\{\frac{dIRC_{\infty}-dIRC}{dIRC_{\infty}}\right\} \\ dIRC &= IRC - (a_s + b_s R) \\ dIRC_{\infty} &= IRC_{\infty} - (a_s + b_s R) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $dIRC_{\infty}$ requiere determinarse de las reflectancias en el infinito (Figura 1A). Sin pérdida de generalidad, al no contar con este dato, se puede suponer como igual a 70 para el caso de reflectancias en porcentaje.

El $IVIS$ tiene una relación lineal con el IAF ($IAF=nIVIS$ donde n es una constante empírica relacionada con el coeficiente de extinción y el albedo foliar y minimiza los efectos del suelo (Paz *et al.*, 2010)). El $IVIS$ se desarrolló al rotar y trasladar el eje R de la Figura 1A para que coincida con la línea del suelo y así evitar las reflectancias particulares del suelo de fondo en una mezcla suelo-vegetación.

En la Figura 1B se muestra un modelo temporal del crecimiento del IAF , representado por dos fases en la etapa vegetativa: crecimiento exponencial y lineal.

$$\begin{aligned} \frac{dIAF}{dt} &= rIAF \\ IAF(t) &= IAF(0)\exp(rt) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dIAF}{dt} &= C \\ IAF(t) &= Ct - Ct_b \end{aligned} \quad (3)$$

Fernandino (1989) desarrolló el modelo expo-lineal, haciendo una transición suave entre la fase exponencial y la lineal ($rIAF = C$):

$$IAF(t) = \frac{C}{r} \ln\{1 + \exp r(t - t_b)\} \quad (4)$$

con las siguientes características:

where $dNIR_{\infty}$ requires being determined by the infinite reflectances (Figure 1A). Without losing generality, not having this data, it may be assumed as equal to 70 for the case of reflectances in percentage.

$ISVI$ has a linear relation to LAI ($LAI=nISVI$), where n is an empirical constant related to the coefficient of extinction and the foliar albedo and minimizes soil effects Paz *et al.*, 2010). $ISVI$ was developed rotating and moving axis R of Figure 1A in order to coincide with the soil line and thus avoid the particular reflectances of the below soil in a soil-vegetation mixture.

Figure 1B shows a temporal growth model of LAI represented by two phases in the vegetative period: exponential and linear growth.

$$\begin{aligned} \frac{dIAF}{dt} &= rIAF \\ IAF(t) &= IAF(0)\exp(rt) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dIAF}{dt} &= C \\ IAF(t) &= Ct - Ct_b \end{aligned} \quad (3)$$

Fernandino (1989) developed an expo-linear model producing a smooth transition between exponential and linear phase ($rLAI = C$):

$$IAF(t) = \frac{C}{r} \ln\{1 + \exp r(t - t_b)\} \quad (4)$$

with the following characteristics:

$$\begin{aligned} IAF(t = t_T) &= \frac{C}{r} \\ t_T &= t_L + \frac{0.541}{r} \end{aligned} \quad (5)$$

where r is the relative growth rate; C is the maximum growth rate; t_L is the time of LAI at intersecting axis t in the linear phase, and t_T is the time where $rLAI = C$.

The expo-linear model has biophysical bases for modeling LAI (approximation of homogeneous medium on physical terms and of turbid medium on

$$IAF(t = t_T) = \frac{C}{r}$$

$$t_T = t_L + \frac{0.541}{r} \quad (5)$$

donde, r es la tasa relativa de crecimiento; C es la tasa máxima de crecimiento; t_L es el tiempo cuando IAF intersecta al eje t en la fase lineal; y t_T es el tiempo donde $rIAF = C$.

El modelo expo-lineal tiene bases biofísicas para modelar el IAF (aproximación de medio homogéneo en términos físicos y de medio turbio en términos radiativos). Al usar una relación lineal entre el IAF y la Bm , la ecuación se ha extendido para el caso de la Bm (Goudriaan y Monteith, 1990).

En la Figura 2 se muestra el caso de la evolución del $IVIS$ (relación lineal con el IAF , pero del tipo $IAF = m + nIVIS$), cuando se usa una línea de suelo diferente a la real. Se observa una relación expo-lineal en la etapa vegetativa hasta el valor máximo del $IVIS$ (en t_{mx} , Figura 1B); después se presenta una meseta que va de la fase reproductiva al inicio de la etapa de senescencia y, finalmente, una etapa de senescencia representada por un modelo exponencial. Así, el modelo temporal general del $IVIS$ estará dado por:

Etapas Vegetativa:

$$IVIS(t) = IVIS(0) + \frac{C}{r} \ln\{1 + \exp r(t - t_b)\} \quad (6)$$

Etapas Meseta:

$$IVIS(t) = IVIS(t_{mx}) \quad (7)$$

Etapas Senescencia:

$$IVIS(t) = p + \exp(-qt) \quad (8)$$

Para un cultivo sujeto a estrés, en la Figura 1A se muestra en forma punteada las líneas iso- IAF en el espacio del $R-IRC$. El patrón temporal del IAF asociado a un nivel de estrés no demasiado crítico se presenta en forma de un cambio de pendiente en la fase lineal (línea punteada en la Figura 1B). Así, un cultivo sembrado en la misma fecha (ambiente fijo), sujeto a diferentes niveles de estrés, presenta cambios

radiative terms). At using a linear relation between LAI and Bm , the equation has been extended for the case of Bm (Goudraan and Monteith, 1990).

Figure 2 presents the case of $ISVI$ evolution (linear relation with LAI , but of the type $LAI = m + nISVI$), when a soil line other than the real one is used. An expo-linear relation is observed in the vegetative period up to the highest value of $ISVI$ (in t_{mx} , Figure 1B); afterwards a plateau is shown, which goes from the reproductive phase to the beginning of the senescence period, and finally, a phase of senescence represented by an exponential model. Thus, the general temporal model of $ISVI$ will be given by:

Vegetative stage:

$$IVIS(t) = IVIS(0) + \frac{C}{r} \ln\{1 + \exp r(t - t_b)\} \quad (6)$$

Plateau stage:

$$IVIS(t) = IVIS(t_{mx}) \quad (7)$$

Senescence stage:

$$IVIS(t) = p + \exp(-qt) \quad (8)$$

For a crop subjected to stress, in Figure 1A iso- LAI are shown in form of dotted lines in the space of $R-NIR$. The temporal pattern of LAI associated to a not

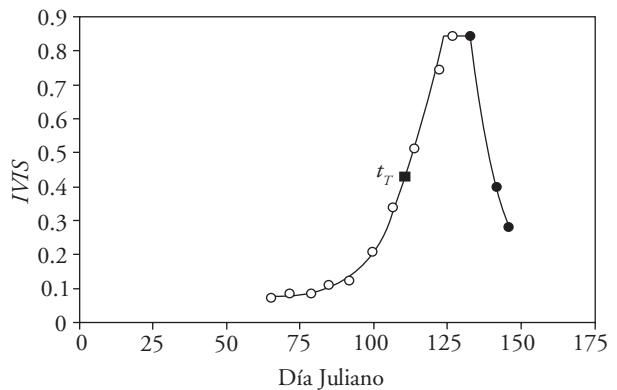


Figura 2. Patrón temporal general del $IVIS$ para la parcela de frijol (L1, P3) del experimento Yaqui 2008.

Figure 2. General temporal pattern of $ISVI$ for bean plot (L1, P3) of experiment Yaqui 2008.

en los patrones temporales de la variable biofísica de interés (V , usada en términos genéricos) que se manifiestan en un cambio de pendiente en la fase lineal (rectas $V = a_k + b_k t$; Figura 3A) y con patrones muy similares en la fase exponencial (cambios difíciles de detectar en los experimentos). En esta perspectiva se puede usar el concepto de equivalencia ambiental desarrollado por Paz *et al.* (2009) para definir al estrés en un espacio paramétrico $a_k - b_k$ (Figura 3B), que define una línea con meta parámetros $b_k = A + Ba_k$, de modo que el estrés se puede determinar de la pendiente b_k . Paz *et al.* (2009) presentan evidencia experimental para respaldar concepto de equivalencia ambiental, misma que a través de la relación lineal entre el IAP y el $IVTS$ se generaliza para el caso de los patrones temporales de este índice.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el 2008 se realizó un experimento en el Valle del Yaqui, estado de Sonora, México, donde se midió la cobertura de la vegetación y se tomaron datos de reflectancias en cultivos de sorgo, cártamo, frijol, garbanzo y trigo. El Distrito de Riego 041, Río Yaqui, se ubica en el valle del Yaqui, con una superficie de 230 000 ha, entre las coordenadas 27° 10' y 27° 50' N y 109° 55' y 110° 36' O. La zona de estudio tiene una superficie de 1600 ha (bloque de 4 km×4 km) y se localiza entre las coordenadas 27° 14' 24" y 27° 16' 48" N y 109° 52' 12" y 109° 54' 36" O.

very critical stress level is presented as a slope change in the linear phase (dotted line in Figure 1B). Thus, a crop sown on the same date (fixed environment), subjected to different stress levels, shows changes in the temporal patterns of the biophysical variable of interest (V , used in generic terms), which become evident in a slope change in the linear phase (lines $V = a_k + b_k t$; Figure 3A) and with very similar patterns in the exponential phase (changes difficult to detect in the experiments). From this point of view, the concept of environmental equivalence may be used, developed by Paz *et al.* (2009) in order to define stress in a parametric space $a_k - b_k$ (Figure 3B), which defines a line with meta parameters $b_k = A + Ba_k$, so that the stress can be determined of slope b_k . Paz *et al.* (2009) present experimental evidence to support the concept of environmental equivalence, which is generalized through the linear relation between LAI and $ISVI$ for the case of temporal patterns of this index.

MATERIALS AND METHODS

In 2008 an experiment was carried out in Valle del Yaqui, state of Sonora, México, where the vegetation cover was measured and data of reflectance were taken in crops of sorghum, safflower, bean, chickpea, and wheat. Irrigation District 041, Rio Yaqui, is located in Valle del Yaqui with a surface of 230,000 ha, between

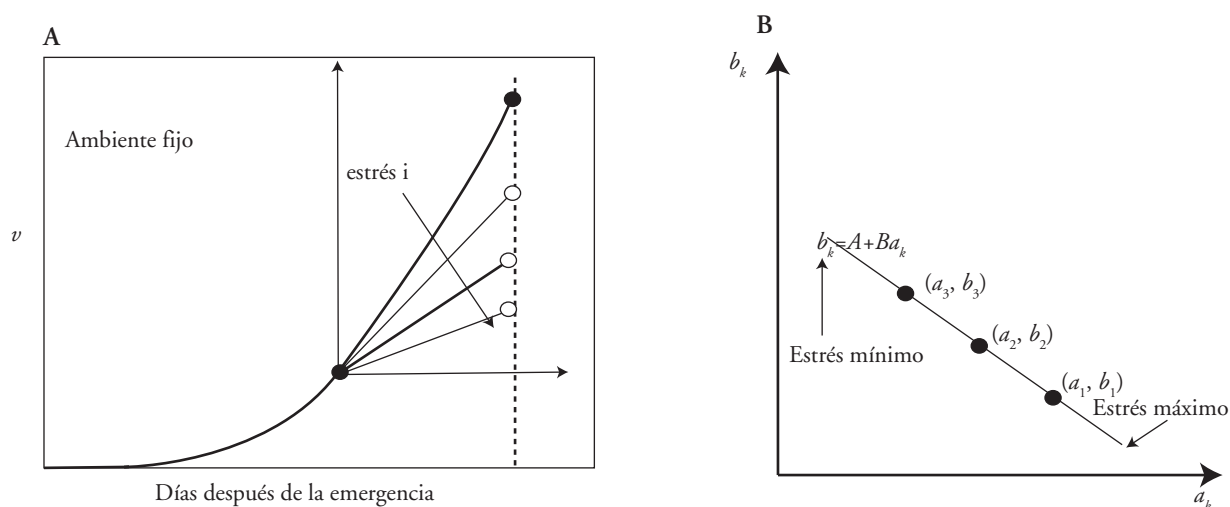


Figura 3. (A) Cambios de la pendiente (línea $V = a_k + b_k t$) en la fase lineal asociados a diferentes niveles de estrés, para un ambiente fijo. (B) Espacio meta-paramétrico $a_k - b_k$.

Figure 3. (A) Slope changes (line $V = a_k + b_k t$) in the linear phase associated to different stress levels for fixed environment. (B) Meta-parametric space $a_k - b_k$.

Estrategia general de muestreo en parcelas homogéneas

Para las mediciones realizadas en el Valle del Yaqui se usaron parcelas homogéneas (PH; Cuadro 1), concepto que se refiere estrictamente a parcelas con un mismo cultivo, misma densidad de siembra, misma separación y dirección de los surcos y misma fecha de siembra (parcelas que sólo difieren en las fechas de siembra se consideraron como diferentes).

Para realizar las mediciones se seleccionaron en cada PH dos líneas de plantas representativas del cultivo. Estas líneas se denominaron L1 y L2 y en cada una de ellas se establecieron cinco puntos de muestreo (P1-P5), a los cuales se les dio seguimiento durante el desarrollo del cultivo (Figura 4).

Las mediciones de reflectancias, con tres repeticiones, se obtuvieron con radiómetros CROPSCAN^{MR} de 16 bandas cuyo ángulo de medición es de 2:1 (altura:diámetro). La altura para obtener reflectancias en los puntos de cada una de las PH se muestra en el Cuadro 1.

En cada medición radiométrica semanal se tomó una fotografía digital a nadir, en el mismo punto de medición del radiómetro, usando una cámara digital Cybershot DSC-V1 (Sony^{MR}). Las fotografías digitales recortadas para el área de medición fueron procesadas para determinar la cobertura aérea usando clasificaciones supervisadas (Calera *et al.*, 2001).

Mediciones radiométricas especiales para suelo seco y húmedo

Adicionalmente a las mediciones en las líneas L1 y L2, en la línea L1 (P1 a P5) se tomaron reflectancias posicionando la altura del radiómetro arriba de una hilera de cultivo, para obtener diferentes coberturas del sistema suelo-cultivo para el sorgo, frijol y cártamo. En cada medición se tomaron datos considerando dos condiciones del suelo debajo del cultivo: seco y húmedo (se humedeció la superficie con agua). En el caso especial de cobertura vegetal del 100 %, analizado en este estudio, las mediciones se hicieron posicionando el radiómetro arriba del cultivo, de tal manera que el radiómetro sólo observara a la vegetación y no al

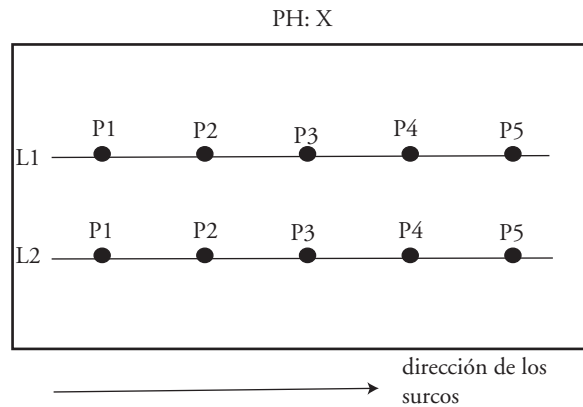


Figura 4. Mediciones en las parcelas homogéneas.
Figure 4. Measurements in homogeneous plots.

the coordinates 27° 10' and 27° 50' N and 109° 55' and 110° 36' W. The study zone has an area of 1600 ha (block of 4 km×4 km) and is situated between the coordinates 27° 14' 24" and 27° 16' 48" N and 109° 52' 12" and 109° 54' 36" W.

General sampling strategy in homogeneous plots

For the measurements carried out in Valle del Yaqui homogeneous plots (PH; Table1) were used, concept referring strictly to plots with one single crop, the same sowing density, the same separation and direction of furrows, and the same sowing date (plots differing only in sowing dates are considered different).

In order to carry out the measurements two lines of plants representative of the crops were selected. These lines were called L1 and L2, and in each of them five sampling points (P1-P5) were established being monitored during crop development (Figure 4).

Measurements of reflectances with three replications were obtained using CROPSCAN^{MR} radiometers of 16 bands, whose measuring angle is 2:1 (height: diameter). The height for obtaining reflectance at the points of each of their PH is shown in Table 1.

Cuadro 1. Descripción de las parcelas homogéneas y sus mediciones.
Table 1. Description of homogeneous plots and their measurements.

Parcela homogénea	Cultivo	Separación de surcos (m)	Altura del radiómetro (m)	Diámetro del área de medición del radiómetro (m)	Número de hileras dentro del área de medición
PH1	Fríjol	1.60	3.20	1.60	1
PH3	Sorgo	0.80	3.20	1.60	2
PH4	Garbanzo	0.80	3.20	1.60	2
PH5	Cártamo	0.80	3.20	1.60	2
PH6	Trigo	1.00	2.00	1.00	1

suelo entre surcos. Esta condición aproxima a un medio radiativo turbio (Ross, 1981). En el caso de las mediciones normales, la mezcla suelo-vegetación aproxima una condición de medio heterogéneo (medio turbio con óptica geométrica).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar el concepto de equivalencia ambiental relacionado con las pendientes de la fase lineal de la etapa vegetativa, las mediciones radiométricas normales en L1 y L2 (P1 a P5) fueron modeladas usando regresión lineal en los puntos temporales del *IVIS* asociados a un patrón lineal (Figura 1B). En la Figura 5 se muestra los resultados obtenidos de acuerdo con el modelo expo-lineal en su fase lineal, definida por la relación (3), donde cada punto representa un punto de medición temporal en las dos líneas (10 puntos). En el cultivo trigo las mediciones sólo se realizaron cerca de la meseta y en la etapa de senescencia, por lo que no hay información suficiente para la etapa vegetativa.

En la Figura 5 se observa que el modelo planteado para la equivalencia ambiental (nivel de estrés) está bien caracterizado, por lo que se puede usar en forma operacional.

Una implicación de los patrones lineales mostrados en la Figura 5 es que cada medición representa una condición de estrés diferente y el utilizar un promedio no es garantía de representatividad espacial. En términos estadísticos esto implica que el concepto de homogeneidad (estacionariedad) no es aplicable y cada conjunto de mediciones en los puntos de muestreo debe analizarse por separado.

At each weekly conducted radiometric measurement a digital photograph was taken at nadir, at the same measuring point of the radiometer using a digital Cybershot DSC-VI camera (Sony^{MR}). The digital photographs cut out for the area of measuring were processed in order to determine the aerial cover using supervised classifications (Calera *et al.*, 2001).

Special radiometric measurements for dry and humid soil

Additionally to the measurements in lines L1 and L2, reflectances were taken in line L1 (P1 to P5), placing the height of the radiometer above one crop row to obtain different covers of the soil-crop system for sorghum, bean, and safflower. At every measuring data were taken considering two conditions of the soil below the crop: dry and humid (the surface was moistened with water). In the special case of 100 % of vegetal cover analyzed in this study, measurements were made, placing the radiometer above the crop, so that the radiometer would observe only the vegetation and not the soil between the furrows. This condition approaches a turbid radiative medium (Ross, 1980). In case of normal measurements, the soil-vegetation mixture is close to a condition of heterogeneous medium (turbid medium with geometric optics).

RESULTS AND DISCUSSION

In order to analyze the concept of environmental equivalence related to the slopes of the linear phase of the vegetative period, the normal radiometric measurements in L1 and L2 (P1 to P5) were modeled using linear regression at the temporal points of *ISVI* associated to a linear pattern (Figure

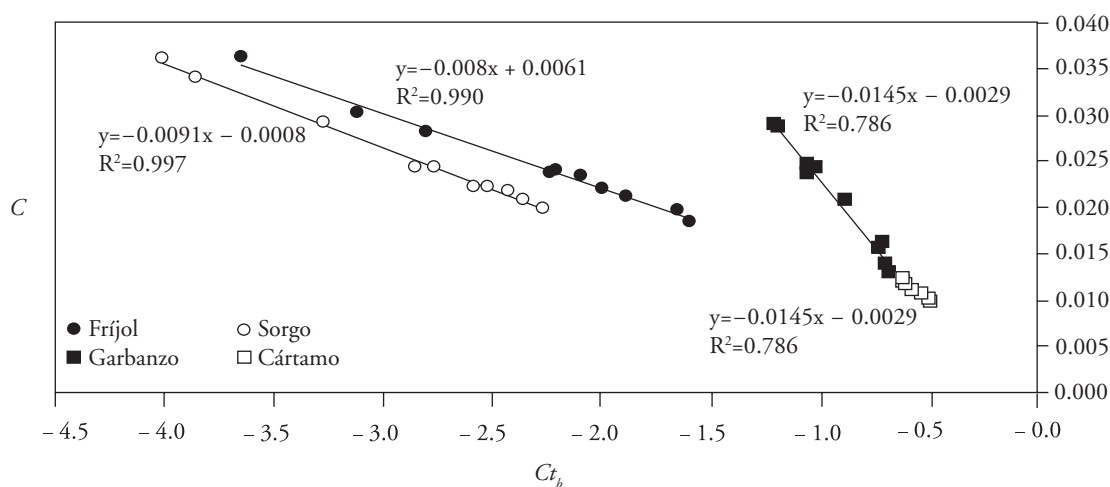


Figura 5. Patrones entre la intersección y la pendiente de la fase lineal de la etapa vegetativa de los cultivos.
Figure 5. Patterns between intersection and slope linear phase of crop vegetative period.

El índice *IVIS* fue diseñado para minimizar el efecto del suelo (humedad), aunque contiene efectos residuales difíciles de filtrar. Para revisar esta situación, en la Figura 6 se muestra las estimaciones de los parámetros de la fase lineal del frijol y sorgo (medios turbios) en condiciones de suelo seco y húmedo.

En la Figura 6 se observa que hay algunos efectos residuales de la humedad del suelo en las estimaciones del *IVIS*. No obstante, las relaciones obtenidas para medios homogéneos (Figura 6) y heterogéneos (Figura 5) muestran relaciones muy similares, por lo que los efectos de escala (sistema suelo-cultivo) pueden considerarse poco importantes.

En la etapa de senescencia, para los muestreos con diferentes niveles de humedad del suelo, el modelo de la relación (8) fue ajustado por regresión lineal. En la Figura 7 se muestra los resultados obtenidos para frijol y cártamo después de una transformación lineal del modelo exponencial ajustado, donde se observa que el concepto de equivalencia ambiental se ajusta bien y se obtienen resultados similares al caso de la etapa vegetativa. Esto es, los patrones (pendientes) temporales de la etapa vegetativa también se manifiestan en la etapa de senescencia.

Finalmente, la relación esperada entre el índice *IVIS* y la cobertura de la vegetación o *fv*, es aproximada por una forma bi-lineal, en realidad de tipo exponencial (diferencias en los parámetros de los modelos expo-lineales; Figura 8); aunque puede aproximarse razonablemente con un polinomio de segundo grado. En el caso de combinar la etapa vegetativa y la de senescencia, bajo el supuesto de un

1B). Figure 5 shows the results obtained according to the expo-linear model in its linear phase, defined by relation (3), where each point represents a temporal measuring point on the two lines (10 points). In the wheat crop, the measurements only were made close to the plateau and at the stage of senescence; therefore there is not enough information for the vegetative period.

In Figure 5 it can be observed that the model proposed for environmental equivalence (stress level) is well characterized, that is why it can be used operationally.

One implication of the linear patterns shown in Figure 5 is that each measurement represents a different stress condition, and using an average does not guarantee spatial representativeness. In statistical terms, this implies that the concept of homogeneity (stationarity) cannot be applied and each set of measurements at the sampling points must be analyzed separately.

The *ISVI* index was designed for minimizing the soil effect (humidity) although it contains residual effects difficult to filter. To revise this situation, Figure 6 shows the estimates of the parameters of the linear phase of bean and sorghum (turbid media) under conditions of dry and humid soil.

In Figure 6 it can be observed that there are some residual effects of soil humidity in estimates of *ISVI*. Nevertheless, the relations obtained for homogeneous (Figure 6) and heterogeneous (Figure 5) media show very similar relations; therefore, the scale effects (soil-crop system) may be considered of little importance.

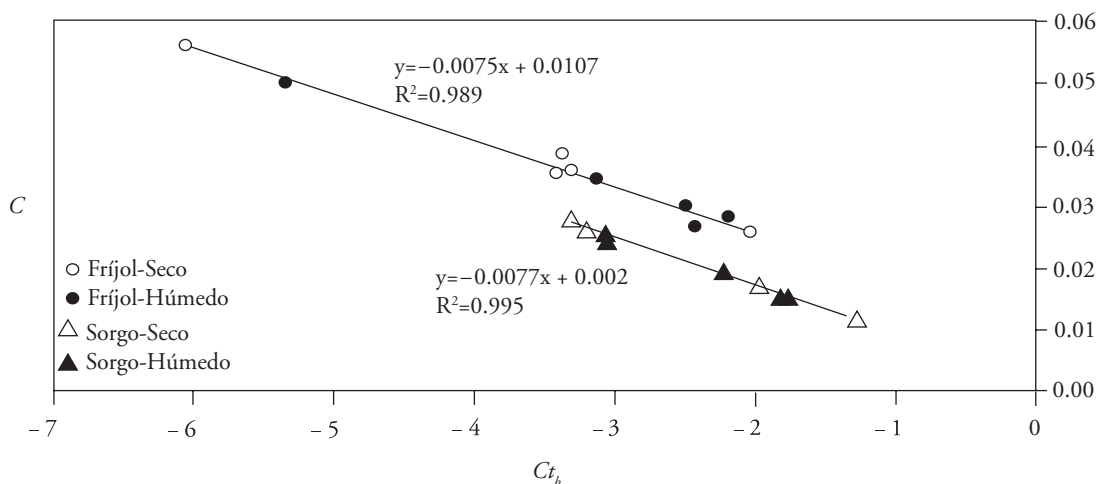


Figura 6. Efecto de la humedad del suelo en los patrones de la fase lineal de los cultivos frijol y sorgo (medios turbios).
Figure 6. Soil humidity effect in linear phase patterns of bean and sorghum crops (turbid media).

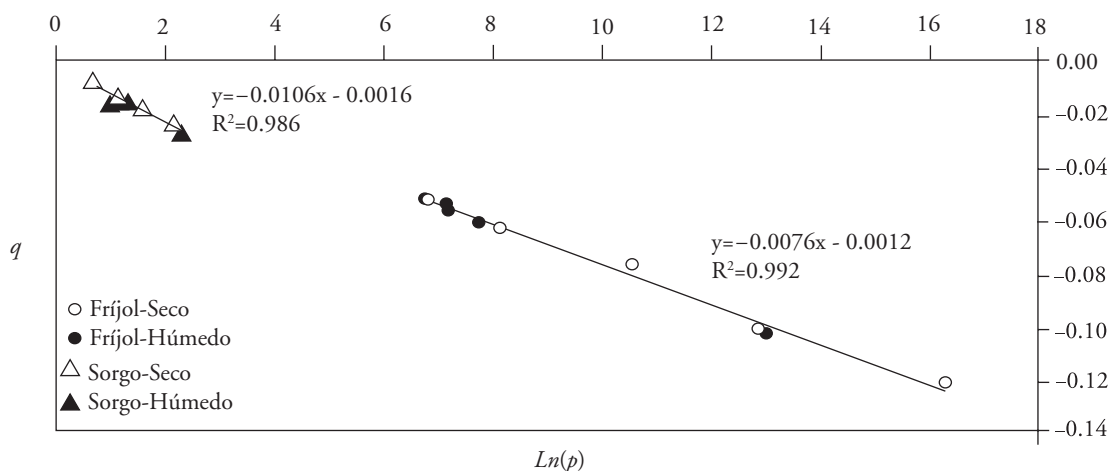


Figura 7. Efecto de la humedad del suelo en los patrones de la etapa de senescencia de los cultivos frijol y sorgo (medios turbios).
Figure 7. Soil humidity effect in patterns of senescence period of bean and sorghum crops (turbid media).

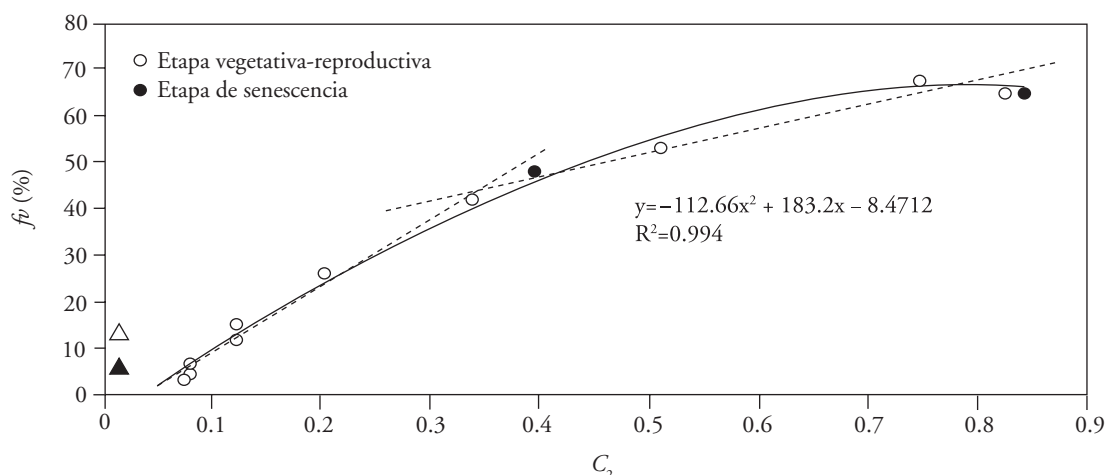


Figura 8. Patrón entre el $IVIS$ y f_v para el frijol (L1, P3).
Figure 8. Pattern between $ISVI$ and f_v for bean (L1, P3).

patrón exponencial en la etapa reproductiva, se esperaría que pueda estimarse una relación general entre el $IVIS$ y f_v ; a diferencia del caso del uso de índices espectrales basados en las líneas iso- I_{AF} , donde se esperan relaciones lineales diferentes para la etapa vegetativa y la de senescencia.

En el Cuadro 2 se muestra los resultados de los ajustes del polinomio de segundo grado:

$$f_v = c_1 + c_2 IVIS + c_3 IVIS^2 \quad (9)$$

De dichos resultados, el ajuste del modelo polinómico de segundo grado entre el $IVIS$ y f_v implica que es posible utilizar un modelo del crecimiento del

In the senescence period, for the samplings with different soil humidity levels, the model of the relation (8) was adjusted by linear regression. Figure 7 shows the results obtained for bean and safflower after a linear transformation of the adjusted exponential model, where we can observe that the concept of environmental equivalence is well adapted, and results are obtained, similar to the vegetative period. That is, the temporal patterns (slopes) of the vegetative period also become evident in the senescence period.

Finally, the expected relation between the $ISVI$ index and the cover of vegetation or f_v is approximated by a bi-linear form, actually of exponential type

Cuadro 2. Ajuste del polinomio entre el *IVIS* y *f_v*.
Table 2. Polynomial adjustment between *ISVI* and *f_v*.

Cultivo	L	P	c_1	c_2	C_3	R^2
Frijol	1	1	-8.784	202.03	-133.17	0.988
	1	2	-7.428	174.17	-100.83	0.979
	1	3	-8.199	185.10	-117.04	0.982
	1	4	-8.219	175.48	-96.06	0.979
	1	5	-14.592	226.11	-160.83	0.967
	2	1	-8.074	153.93	-79.38	0.978
	2	2	-6.031	144.15	-63.57	0.985
	2	3	-11.749	190.18	-104.81	0.984
	2	4	-6.676	191.80	-126.75	0.988
	2	5	-13.753	213.97	-152.31	0.986
Sorgo	1	1	1.249	169.34	-107.08	0.989
	1	2	1.383	211.61	-157.93	0.987
	1	3	0.276	211.61	-157.93	0.987
	1	4	0.988	197.67	-149.72	0.992
	1	5	0.917	194.91	-133.85	0.988
	2	1	0.866	175.49	-89.11	0.995
	2	2	1.726	148.33	-42.48	0.998
	2	3	-0.357	203.38	-147.15	0.991
	2	4	0.744	147.43	-71.06	0.996
	2	5	0.208	181.84	-100.25	0.985
Garbanzo	1	1	-1.036	176.44	-95.60	0.988
	1	2	-2.147	204.16	-131.94	0.972
	1	3	-2.709	214.16	-189.46	0.983
	1	4	-0.995	209.27	-177.25	0.980
	1	5	-7.501	276.21	-316.35	0.958
	2	1	-3.531	170.78	-82.78	0.973
	2	2	-6.412	177.75	-83.56	0.978
	2	3	-2.015	172.15	-89.26	0.983
	2	4	-6.155	216.49	-134.17	0.983
	2	5	-3.481	189.54	-116.37	0.996
Cártamo	1	1	6.430	126.98	-52.63	0.969
	1	2	7.013	95.49	-8.72	0.981
	1	3	3.908	133.65	-64.29	0.972
	1	4	-0.744	174.51	-112.50	0.958
	1	5	2.897	138.17	-60.66	0.969
	2	1	7.936	110.45	-33.80	0.933
	2	2	-1.952	144.97	-60.30	0.962
	2	3	1.657	128.82	-33.98	0.988
	2	4	1.037	147.17	-71.44	0.988
	2	5	3.849	116.98	-25.68	0.964

IVIS y *f_v* asimétrico en la etapa vegetativa, pero simétrico en la etapa reproductiva y de senescencia, tal como el modelo de Yin *et al.* (2003).

Al igual que en el caso de la fase lineal de la etapa vegetativa, es posible expandir el concepto de equivalencia ambiental para la relación entre el *IVIS* y la *f_v* usando los parámetros c_2 y c_3 del modelo polinómico de segundo grado. En la Figura 9 se muestra esta situación para el frijol.

La relación mostrada en la Figura 9 es consecuencia de la transformación lineal:

(differences in the parameters of expo-linear models; Figure 8); though it may be reasonably estimated with a second degree polynomial. In the case of combining the vegetative period and that of senescence, assuming an exponential pattern in the reproductive phase, it would be expected that a general relation between *ISVI* and *f_v* could be estimated; unlike the case of using spectral indexes based on iso-*LAI* lines, where different linear relations for the vegetative and the senescence period are expected.

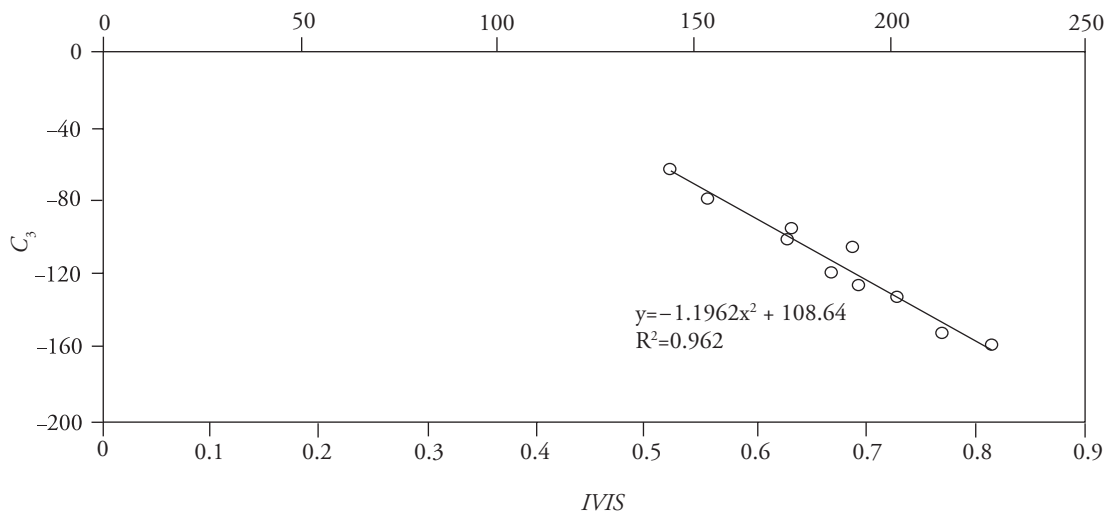


Figura 9. Relación entre los parámetros c_2 y c_3 del modelo polinómico de segundo grado entre el $IVIS$ y fv .
Figure 9. Relation between parameters c_2 and c_3 of the second degree polynomial model between $ISVI$ and fv .

$$\frac{fv - c_1}{IVIS} = c_2 + c_3 IVIS \quad (10)$$

CONCLUSIONES

Los desarrollos mostrados en este estudio plantean una aproximación para cuantificar los niveles de estrés y su asociación con variables relacionadas con el índice de área foliar o la biomasa aérea (suponiendo una relación lineal con el índice de área foliar). El nivel de estrés de los cultivos, para una misma fecha de siembra, se manifiesta por un cambio de pendiente de la fase lineal, después de la exponencial, en la etapa vegetativa. Esto concuerda con la evidencia experimental asociada a variables biofísicas discutida en el desarrollo del concepto de equivalencia ambiental.

Para el diseño experimental la hipótesis de homogeneidad física o estacionariedad estadística se cuestiona como esquema *a priori*, la cual se debe evaluar con resultados experimentales.

Para el concepto de equivalencia ambiental ligado a la relación entre el nivel de estrés y la biomasa o índice de área foliar o variables relacionadas, se encontró evidencia experimental indirecta (a través del índice de vegetación) que soporta este esquema de modelación. Por ello, la aproximación usada (relación lineal entre el índice de vegetación y el índice de área foliar) se puede usar para evaluar el nivel de estrés.

El uso del índice $IVIS$ permite reducir el efecto del suelo de fondo a nivel de píxel (punto de

In Table 2 the results of the adjustments of the second degree polynomial are shown:

$$fv = c_1 + c_2 IVIS + c_3 IVIS^2 \quad (9)$$

Of those results, the adjustment of the polynomial model of second degree between $ISVI$ and fv implies the possibility of using an asymmetric growth model of $ISVI$ and fv in the vegetative phase, but a symmetric one in the reproductive and senescence phase, such as the model of Yin *et al.* (2003).

Likewise, in the case of the linear phase of the vegetative period, it is possible to expand the concept of environmental equivalence for the relation between $ISVI$ and fv , using the parameters c_2 and c_3 of the second degree polynomial model. This situation is shown for bean in Figure 9

The relation presented in Figure 9 is the consequence of the linear transformation:

$$\frac{fv - c_1}{IVIS} = c_2 + c_3 IVIS \quad (10)$$

CONCLUSIONS

The developments shown in this study propose an approximation to quantify the stress levels and their association with variables related to foliar area or aerial biomass (assuming a linear relation with the index of foliar area). The stress level of the crops for the same sowing date becomes evident by a change of slope of the linear phase after the exponential

medición). Dicho índice elimina la problemática de relaciones múltiples entre los índices de vegetación y las variables biofísicas, usando aproximaciones a las líneas iso-*I_{AF}* en el espacio espectral de la banda del rojo e infrarrojo cercano. El *IVIS*, desarrollado usando las líneas iso-suelo, permite establecer una relación genérica con las variables biofísicas durante todas las etapas del crecimiento, ejemplificadas por la cobertura aérea de los cultivos.

LITERATURA CITADA

- Calera, A., J. Gonzalez-Piqueras, and J. Meliá. 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 25: 97-109.
- Calera, A., C. Martínez, and J. Meliá, 2001. A procedure for obtaining green plant cover: relation to NDVI in a case study for barley. *Int. J. Remote Sens.* 22: 3357-3362.
- Ferrandino, F. J. 1989. Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield. *Agric. For. Meteorol.* 47: 273-289.
- Gilbert, M.A., J. González-Piqueras, F. J. García, and J. Meliá. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 82:303-310.
- Goudriaan, J., and J. L. Monteith. 1990. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann. Bot.* 66: 695-701.
- 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., M. Odi, A. Cano, M.A. Bolaños, y A. Zarco. 2009. Equivalencia ambiental en la productividad de la vegetación. *Agrociencia* 43: 635-648.
- Paz, F., M. Reyes, y E. Medrano. 2010. Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. En prensa. *Agrociencia*.
- 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.
- Solorio, N., F. Paz, M. Odi, y M. Bolaños. 2008. Modelo exponencial del crecimiento y equivalencia de la productividad de un tomate cultivado en invernadero. *Terra Latin.* 27:143-151.
- one in the vegetative period. This agrees with the experimental evidence, associated to biophysical variables, discussed in the development of the environmental equivalence concept.
- For the experimental design the hypothesis of physical homogeneity or statistical stationarity is questioned as an *a priori* scheme, which must be evaluated with experimental results.
- For the concept of environmental equivalence linked with the relation between stress level and biomass, or index of foliar area or related variables, indirect experimental evidence was found (through the vegetation index), which supports this modeling scheme. Therefore, the approximation utilized (linear relation between vegetation index and index of foliar area) may be used to evaluate the stress level.
- The use of the *ISVI* index allows reducing the effect of below soil at pixel level (measuring point). Such index eliminates the problems of multiple relations between vegetation indexes and biophysical variables using approximations to the iso-*LAI* lines in the spectral space of the red and near infrared band. *ISVI*, developed using iso-soil lines, permits establishing a generic relation with biophysical variables during all the growth phases, exemplified by aerial crop cover.
- End of the English version—
- *---
- Stockle, C. O., M. Donatelli, and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18: 289-307.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographs infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127-150.
- Tucker, C.J., B.N. Holben, J.H. Elgin, and E. McMurtrey. 1981. Remote sensing of total dry matter accumulation on winter wheat. *Remote Sens. Environ.* 11:171-190.
- Verstraete, M. M., and B. Pinty. 1996. Designing optical spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Trans. Geoscience Rem. Sensing* 34: 1254-1265.
- Yin, X., J. Goudriaan, E. A. Latinga, J. Vos, and H. J. Spiertz. 2003. A flexible sigmoid function of deterministic growth. *Ann. Bot.* 91: 361-371.