

Acerca de los Índices de Vegetación

M. A. Gilabert, J. González-Piqueras, J. García-Haro

Departament de Tennodin3.mica, Facultat de Física, Universitat de Valencia Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot, Valencia

E-mail: M.Amparo.Gilabert@uv.es

RESUMEN

En este trabajo se abordan los índices de vegetación desde un punto de vista docente, al objeto de explicar qué son y cuáles son las mejores que han ido experimentando a lo largo de los últimos años. La interpretación y justificación de los principales índices de vegetación que han aparecido en la bibliografía para normalizar los efectos del suelo, así como el estudio comparado de los mismos, se realiza con ayuda de una serie de medidas radiométricas correspondientes a una experiencia que se realizó en el laboratorio.

PALABRAS CLAVE: Índices de vegetación, reflectividad.

ABSTRACT

In this paper, the vegetation indices are considered from an educational perspective. Their physical meaning and the improvements introduced in their definitions along the recent years are emphasized. The main vegetation indices are calculated for the reflectance measurements from a laboratory experiment and their functional utility is quantitatively compared.

KEY WORDS: Vegetation indices, reflectance.

INTRODUCCIÓN

La Teledetección tiene por finalidad identificar y caracterizar los materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma, entendiendo por tal tanto la emitida por la propia superficie terrestre como la reflejada de la que le llega del sol, prevaleciendo una sobre otra en función del intervalo espectral considerado. En la región óptica del espectro, o espectro solar (0.4-3.0 μm), la radiación procedente de las superficies es la radiación solar reflejada. En general, cuando la radiación solar incide sobre un material, una parte de la misma se refleja en la parte más superficial del mismo y el resto se propaga por su interior. Allí, parte es absorbida y el resto sufre un proceso de dispersión (en todas direcciones) de tal modo que parte de la energía dispersada emerge del material por la misma superficie por la que penetró, sumándose así a la radiación reflejada en la capa superficial. La suma de estas dos contribuciones constituye la radiación reflejada por el material y, juntamente con la irradiancia, permite definir la reflectividad espectral del mismo, R_λ . Es precisamente la dependencia de la reflectividad con la longitud de onda λ , juntamente con el hecho de que la reflectividad espectral está íntimamente relacionada con la naturaleza del material

(rasgos de absorción en función de los constituyentes químicos de los materiales) lo que hace posible el reconocimiento de materiales en Teledetección.

Al ser este tipo de absorción un proceso que está cuantizado, dichos rasgos se encuentran localizados en longitudes de onda concretas, dependiendo de la presencia de determinados componentes en el material, estando la intensidad de los mismos relacionada de forma directa con la cantidad de dicho componente (Baret, 1995). Así, por ejemplo, los rasgos que son consecuencia de transiciones electrónicas (como los debidos a la presencia de óxidos de hierro o a la presencia de clorofila) se localizan en la región visible del espectro, mientras que los debidos a transiciones de tipo rotacional (como los del ion OH^-) se producen en la zona del infrarrojo cercano (Figura 1).

Es, por tanto, la distinta forma de interactuar la radiación electromagnética con la materia en función de λ la que determina la respuesta espectral de las superficies naturales y posibilita su estudio. Hay que añadir, sin embargo, que la reflectividad de una superficie puede ser perturbada por la acción de factores externos a la misma entre los que cabe destacar principalmente los relacionados con la configuración de la observación y la iluminación, así como a la presencia de la propia atmósfera.

En concreto, la reflectividad de las cubiertas vegetales viene determinada, además de por los factores externos citados anteriormente, por las características ópticas y distribución espacial de todos sus constituyentes (incluyendo el suelo sobre el que se asienta la vegetación), así como por sus proporciones. En este contexto, el gran reto de la Teledetección consiste en estudiar la vegetación de una escena a partir de medidas de reflectividad con independencia de todos los factores que perturban¹ a la señal radiométrica, entre los que cabe resaltar la reflectividad del suelo. Es decir, para establecer una relación biunívoca entre la medida efectuada por Teledetección y los parámetros biofísicos que caracterizan una cubierta vegetal, es necesario derivar algún parámetro (magnitud secundaria) a partir de la reflectividad (magnitud primaria) que normalice la influencia de todos los factores perturbadores antes mencionados de forma que, idealmente, esta magnitud secundaria adopte el mismo valor para una cantidad de vegetación dada aunque ésta se asiente sobre suelos con propiedades ópticas distintas o la medida se realice bajo diferentes condiciones atmosféricas. La solución a este problema se ha abordado tradicionalmente en Teledetección a partir del diseño de los denominados *índices de vegetación*. De forma genérica se podría definir un índice de vegetación (IV) como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas. El índice de vegetación *ideal* ha sido descrito por Jackson et al. (1983) como "aquél particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geometrías de la iluminación y de la observación". Evidentemente, el IV ideal no existe y los IVs definidos hasta el momento tienen en común el uso de los valores de reflectividad en las zonas espectrales del rojo (*r*) e infrarrojo cercano (*irc*). Esto es fácil de comprender si observamos nuevamente la Figura 1 y comprobamos el diferente comportamiento espectral que presentan la vegetación verde y el suelo en dichas zonas espectrales: la reflectividad de la vegetación pasa de un mínimo relativo en el rojo correspondiente a la banda de absorción de la clorofila a un máximo absoluto en el infrarrojo cercano que es consecuencia de las dispersiones múltiples de la radiación por el interior de la estructura celular; la reflectividad del suelo, sin embargo, presenta también una tendencia ascendente entre estas dos regiones espectrales pero mucho más suave. Se puede decir que, aproximadamente

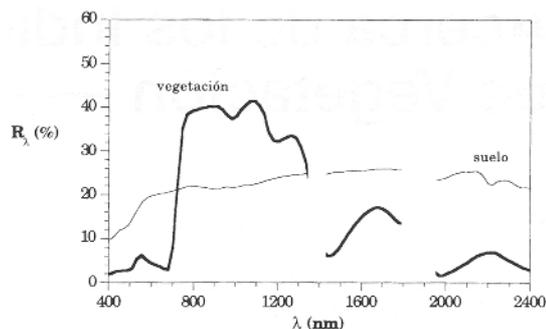


Figura 1. Espectros de reflectividad típicos de vegetación y suelo, adquiridos mediante un espectrorradiómetro GER SIRIS.

el 90% de la información relativa a la vegetación está contenida en las bandas *r e irc*; éste es el motivo por el que algunos autores (Bannari et al., 1995) definen los IVs restringiéndolos a combinaciones de estas dos bandas solamente: la roja, fuertemente correlacionada con el contenido en clorofila y la infrarroja, controlada por el LAI (*leaf area index* o índice de superficie foliar) y la densidad de vegetación verde.

Sin pretender hacer un *review*, pues ya existen algunos muy buenos en la bibliografía (Bannari et al., 1995; Elvidge & Chen, 1995; Baret & Guyot, 1991; Perry & Lautenschlager, 1980), a continuación vamos a proceder a enumerar los IVs más importantes en la actualidad. Hay que mencionar que, durante los últimos veinte años, se han publicado cerca de cuarenta IVs; la selección que presentamos viene determinada, principalmente, por la frecuencia de aparición de los mismos en la literatura. Entre los distintos autores surgen fuertes discrepancias a la hora de enumerar las ventajas y desventajas de los distintos índices. Conviene señalar que, en la mayoría de los casos, las validaciones que se efectúan no tienen carácter universal por estar restringidas a un conjunto muy particular de datos experimentales. Algunos intentos se han realizado para generalizar el problema. Por ejemplo, Rondeaux et al. (1996) realizan un estudio de distintos tipos de cubiertas vegetales sobre distintos tipos de suelos de fondo y condiciones de iluminación mediante modelos de simulación de la reflectividad. Sin embargo, se puede afirmar que *cuál índice de vegetación es el más apropiado* es una cuestión todavía abierta y pendiente de un análisis más profundo.

Los IVs publicados hasta el momento se presentan agrupados bajo distintos tipos de clasificaciones. Así, por ejemplo, Bannari et al. (1995) hablan de índices de primera y segunda generación, mientras que Rondeaux et al. (1996) los clasifican en índices intrínsecos y en índices que utilizan la línea del suelo (la cual será definida más adelante). En este trabajo, los reagruparemos en *índices de baja resolución espectral* (que comprenden a todos los anteriores y que hacen uso de los valores de reflectividad integrados en bandas de unos cientos nanómetros de anchura) y en *índices de alta resolu-*

¹ Entendemos que son factores "perturbadores" todos aquellos que no están relacionados con las partes vegetales del sistema, dado que la vegetación es nuestro centro de atención.

ción espectral, que definiremos más adelante y que, como veremos, continúan utilizando la zona roja y del infrarrojo cercano del espectro, pero no en forma de bandas sino haciendo uso del espectro de reflectividad continuo. Algunas veces, no se incluyen propiamente bajo la denominación de índices de vegetación, pero coincidimos con algunos autores (Elvidge & Chen, 1995) al considerarlos perfectamente englobados por la misma, ya que son tratamientos matemáticos encaminados a realizar la contribución de la vegetación en la señal radiométrica y a atenuar la influencia del suelo (Gilabert, 1990).

Con este trabajo, restringido a un conjunto de datos experimentales que después detallaremos, no pretendemos señalar las ventajas e inconvenientes de los distintos índices sino comentar cómo viene condicionado el diseño de los mismos e ilustrar su capacidad para correlacionar con la cantidad de vegetación y normalizar la influencia (exclusivamente) del brillo del suelo. No se mencionarán aquellos índices cuyo diseño ha sido motivado para corregir la señal radiométrica de los efectos atmosféricos y de las condiciones de iluminación (véase, por ejemplo, el *review* de Bannari et al., 1995), dado que no se disponía de datos experimentales a tal efecto.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la experiencia diseñamos 21 *plots* que correspondían a 7 valores de LAI, entre 0 (suelo desnudo) y 2.4 (cubierta vegetal densa) sobre tres tipos de suelo. Los *plots* eran macetas de invernadero (de dimensiones 29 cm x 42 cm), en cuyos huecos se introdujeron plantas de *Quercus ilex*, repartidas uniformemente. Las plantas presentaban una altura entre 20 y 30 cm. El sustrato original presentaba un claro dominio de arcillas rojas, y fue recubierto con dos cantidades distintas de carbón con el fin de alterar sus propiedades ópticas (en concreto, su brillo), obteniendo tres tipos de suelos: original, cubierto con una cantidad intermedia de carbón (16 g/m²) y completamente ennegrecido con carbón (40 g/m²).

Las medidas del factor de reflectividad, que se realizaron en laboratorio para evitar su posible dependencia con las condiciones medioambientales, se hicieron desde el nadir con el espectrorradiómetro SIRIS, utilizando como referencia un blanco Spectralon (Labsphere). Se hicieron tres réplicas de cada medida y se tomó el valor medio. Asimismo, se aplicaron filtros para reproducir las ventanas espectrales del sensor TM. En concreto, se utilizaron las bandas TM3 (*r*) y TM4 (*irc*). Las medidas del LAI se obtuvieron mediante un LICOR-2000 LAI Canopy Analyzer, que utiliza un método indirecto basado en la transmisividad de la radiación solar difusa a través de la cubierta vegetal (Welles and Norman, 1991).

La Tabla 1 resume las medidas experimentales. Más detalles de la experiencia se pueden encontrar en García-Haro et al. (1996) y García-Haro (1994).

Insistimos nuevamente en que la experiencia no tiene carácter general porque no medimos sobre suelos distintos sino sobre un único suelo que se va oscureciendo paulatinamente, es decir, sólo cambiamos el brillo del suelo, pero no sus rasgos de absorción. Además, por realizarse la experiencia en el laboratorio, no hay perturbación atmosférica y las geometrías de iluminación y de observación permanecen constantes.

LAI	CARBON	r(%)	irc(%)
0.00	0.0 g/m ²	13.7	17.4
0.24		10.7	19.3
0.56		7.34	19.0
0.94		6.01	20.6
1.30		4.93	22.6
1.70		4.31	23.5
2.40		3.14	26.7
0.00	16 g/m ²	7.51	9.15
0.24		6.24	12.1
0.56		5.22	15.7
0.94		4.36	17.3
1.30		3.93	20.9
1.70		3.80	21.9
2.40		2.91	25.9
0.00	40 g/m ²	4.37	4.94
0.24		5.24	10.3
0.56		3.74	13.4
0.94		3.30	15.5
1.30		3.31	19.7
1.70		3.36	21.5
2.40		3.00	25.7

Tabla 1 Detalles relativos a las medidas experimentales efectuados en los *plots* (valor del LAI, del recubrimiento de carbón del suelo y de la reflectividad en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano, expresadas en %).

DISEÑO Y CALCULO DE INDICES DE VEGETACION

Índices de vegetación de baja resolución espectral

Estos índices reciben este nombre porque utilizan valores de reflectividad en "bandas anchas" de unos cientos de nanómetros, es decir, como aquellas con las que habitualmente operan los sensores a bordo de los satélites operativos actualmente.

En el plano de reflectividad *irc-r*, los puntos que representan a superficies desnudas se distribuyen, con mayor o menor dispersión en función de la variación experimentada por los parámetros que determinan la reflectividad de los suelos que se representan (color, brillo, humedad, rugosidad...), a lo largo de una línea recta. Esta línea recta se denomina *línea del suelo*:

$$irc_{\text{suelo}} = a \cdot r_{\text{suelo}} + b \quad [1]$$

donde a y b son, respectivamente la pendiente y la ordenada en el origen de la misma (Figura 2). Evidentemente, cuanto menos varíen los parámetros que influyen en la reflectividad del suelo, menor será la dispersión de los puntos que configuran la línea del suelo y con mayor precisión no podrá determinar la ecuación de la misma.

A medida que crece vegetación sobre un tipo de suelo determinado (por ejemplo, el A, en la Figura 2), disminuye la reflectividad en el rojo y aumenta en el infrarrojo cercano, por lo que el punto van separándose de la línea del suelo en sentido ascendente y hacia la izquierda (A'). Cuando esto tiene lugar sobre cualquier tipo de suelo, aparece en el plano de $irc-r$ el denominado *triángulo de reflectividades*, característico de la presencia de vegetación. La distancia de cada uno de estos puntos a la línea del suelo será, por tanto, proporcional a la cantidad de vegetación. En este contexto, el diseño de índices consistiría en definir una métrica con la que medir la distancia de los puntos representativos de cubiertas vegetales a la línea del suelo.

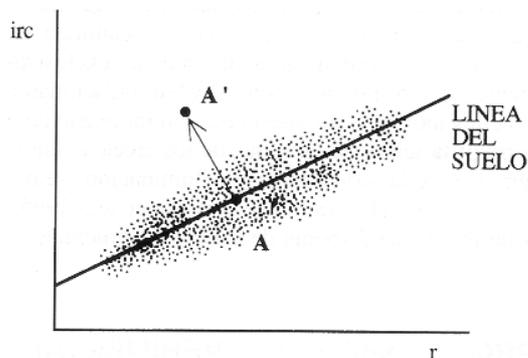


Figura 2. Esquema de la línea del suelo, definida en el plano de reflectividades $irc-r$: El punto A corresponde a un suelo desnudo y el A' al mismo suelo recubierto con una cierta cantidad de vegetación.

Antes de pasar a enumerar los distintos índices veamos cuál es el triángulo de reflectividades de nuestros datos experimentales, que viene representado en la Figura 3 conjuntamente con la línea del suelo ($irc = -0.009 + 1.34r$). Hay que hacer notar que aunque el triángulo de reflectividades obtenido es específico para nuestro conjunto de datos, en general se obtienen triángulos semejantes que poseen características idénticas.

En dicha figura se han representado los puntos con igual cantidad de vegetación (LAI idéntico) con el mismo símbolo, aunque se asienten sobre suelos de distinto brillo, es decir, con un recubrimiento de carbón diferente. Son de destacar las siguientes características:

(i) Se puede definir fácilmente la línea de suelo, dado que tenemos tres puntos (círculos negros), pero, obviamente, el carácter de esta línea no es universal sino específico para el conjunto de datos considerado. (ii) A medida que crece la vegetación (LAI en aumento) los puntos se separan de la línea de suelo en el sentido antes mencionado. (iii) A

medida que el LAI aumenta, disminuye la dispersión entre puntos de LAI idéntico, de modo que para el valor máximo de LAI (2.4) los puntos prácticamente coinciden, lo cual indica que la influencia de las propiedades ópticas del suelo en la reflectividad del sistema disminuye a medida que aumenta la densidad vegetal y es mínima cuando el LAI es máximo. (iv) Si trazáramos líneas que conectaran los puntos con idéntico valor de LAI (*isolíneas de vegetación*) se comprobaría que las mismas no son paralelas a la línea del suelo ni tampoco convergen en el origen.

Esta última característica es muy importante y vamos a ver a continuación las implicaciones que tiene en el diseño de índices de vegetación. De momento ya se puede entrever que un buen índice de vegetación será aquél que dé lugar a una familia de *isolíneas* (con valor de índice constante) similar a la de *isolíneas de vegetación*.

Vamos a considerar los índices de vegetación fundamentales², que se resumen, por otra parte, en la Tabla 2.

Índice de vegetación	Definición	Autor y año
Ratio Vegetation Index	$RVI = \frac{irc}{r}$	Pearson & Miller (1972)
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{irc-r}{irc+r}$	Rouse et al. (1974)
Perpendicular Vegetation Index*	$PVI = \frac{irc-a-r-b}{\sqrt{a^2+1}}$	Richardson & Wiegand (1977)
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(irc-r)}{(irc+r+1)}(1+1)$	Huete (1988)
Transformed SAVI*	$TSAVI = \frac{a(irc-a-r-b)}{r+a\frac{irc-a-b+X}{1+a^2}}$	Baret & Guyot (1991)
Modified SAVI	$MSAVI = \frac{2\text{irc} + 1 - \sqrt{(2\text{irc} + 1)^2 - 8(\text{irc} - r)}}{2}$	Qi et al. (1994)
Optimized SAVI	$OSAVI = \frac{irc-r}{irc+r+Y}$	Rondeaux et al. (1996)

(*) Las constantes a y b son, respectivamente, la pendiente y la ordenada en el origen de la línea de suelo $irc_{suelo} = a \cdot r_{suelo} + b$.

Tabla 2. Índices de vegetación estudiados en el presente trabajo

Pearson & Miller (1972) son los pioneros de esta historia al proponer el primer índice; el "Ratio Vegetation Index" (RVI) que, como su nombre indica es el cociente entre las dos bandas citadas anteriormente (véase Tabla 2). Posteriormente, Rouse et al. (1974) propusieron el "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI), que es la diferencia normalizada de las dos bandas, y cuyo rango de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1. Este es el índice más ampliamente utilizado a lo largo de la corta historia de la Teledetección. Las razones parecen ser de tipo práctico: su cálculo matemático es sencillo (después veremos expresiones para índices más

² Utilizaremos la nomenclatura en inglés, tal como aparecen publicados en la bibliografía

complejas) y, aunque sensible todavía al suelo de fondo y a las condiciones atmosféricas, parece serlo menos que el *RVI*. El hecho de que tanto el *RVI* como el *NDVI* sean sensibles a las propiedades ópticas del suelo se entiende fácilmente recurriendo a la Figura 3. Los dos índices (ver Apéndice) dan lugar a isóneas convergentes en el origen y, por lo tanto, no son paralelas a las isóneas de vegetación (Figura 4).

Si se considera, por el contrario, que las isóneas de vegetación son, en primera aproximación, paralelas a la línea del suelo (que no es exactamente cierto como vimos en nuestro caso en particular), la distancia perpendicular de los puntos a la misma vendría dada por el "*Perpendicular Vegetation Index*" (*PVI*), introducido por Richardson & Wiegand (1977) y reescrito por Jackson et al. (1980). Este índice, como se observa en la Tabla 2, introduce en su definición la pendiente *a* y la ordenada *b* en el origen de la línea del suelo y da lugar

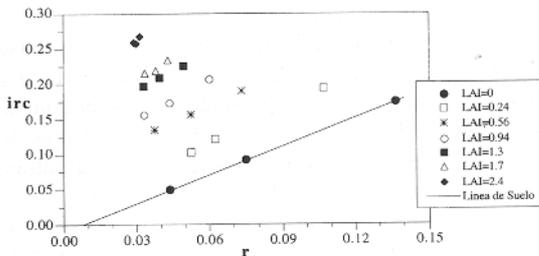


Figura 3. Triángulo de reflectividades, con la correspondiente línea del suelo, de los datos experimentales considerados en el trabajo.

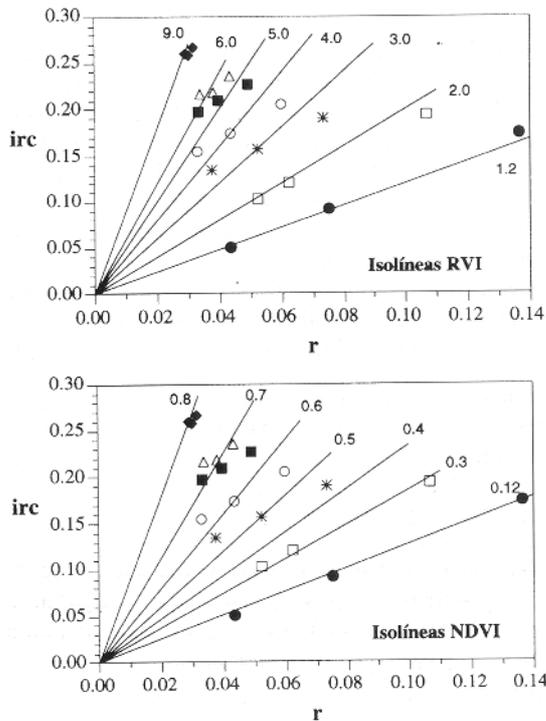


Figura 4. Isóneas de AVI constante y de NDVI constante. Los símbolos representan los valores de LAI que se indicaron en la figura 3.

a una familia de líneas paralelas a la línea del suelo (véase Figura 5 y Apéndice). Este índice funciona muy bien en ocasiones, pero presenta la desventaja de depender de la precisión con que se determine la línea del suelo que, en ocasiones, como habíamos explicado, presenta una elevada dispersión.

Huete (1988) tuvo la idea de considerar que las isóneas de vegetación no eran ni paralelas a la línea del suelo ni convergentes en el origen, sino que eran convergentes pero en un punto situado sobre la bisectriz de la región negativa del plano $irc \pm r$, es decir, en $r=-l_1$ e $irc=-l_2$, siendo $l_1=l_2$ (lo cual tampoco es completamente cierto en todos los casos). Considerando $l=l_1+l_2$, definió el "*Soil-Adjusted Vegetation Index*" (*SAVI*), cuya expresión aparece en la Tabla 2. Este índice es muy parecido al *NDVI* (por lo tanto, también da lugar a una familia de rectas convergentes), salvo por el parámetro *l*, cuya misión, como se ha mencionado, es desplazar el punto de convergencia de las isóneas a la región negativa del espacio *r/irc*. La expresión va multiplicada por $(1+l)$ para mantener el rango de variación de este índice similar al del *NDVI*. Distintas pruebas efectuadas con este índice ponen de manifiesto que normaliza mejor la influencia del suelo que los índices anteriores (Huete & Warrick, 1990). La principal desventaja que presenta este índice es la indeterminación inherente al parámetro *l* que, en principio, puede presentar un rango de variación desde 0 hasta $+\infty$ aunque Huete recomienda tomar un valor igual a 1 para densidades de vegetación bajas, 0.5 para valores intermedios y 0.25 para alta densidad. Esto sugiere que para optimizar la *l* del *SAVI* se requiere *a priori* información relativa al LAI (de hecho Bausch (1993) encuentra para el maíz $l=f(LAI)$) lo cual no es frecuente, sobre todo si se trabaja a escala global y regional mediante imágenes de satélite. La Figura 6 muestra las isóneas de *SAVI* constante para un valor de $l=0.5$.

Al partir del momento de la introducción del *SAVI*, los índices de vegetación toman un mayor auge y son numerosos los que se introducen nuevos, la mayor parte de ellos correspondiendo a modificaciones sucesivas del *SAVI* (se denominan por ello los de la "familia *SAVI*"), al objeto de opti-

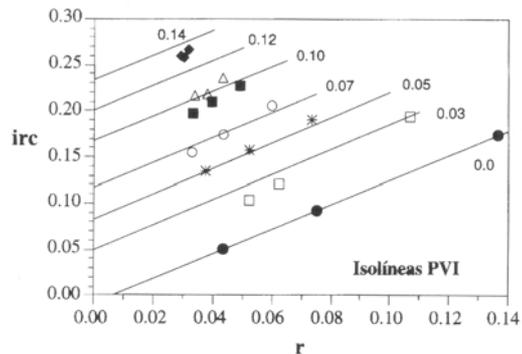


Figura 5. Isóneas de PVI constante. Los símbolos representan los valores de LAI que se indicaron en figura 3.

mizar el valor del parámetro l para darle una aplicabilidad más general. Por citar alguno, tendríamos el "Transformed SAVI" (TSAVI), introducido por Baret & Guyot (1991) y el "Modified SAVI" (MSAVI), por Qi et al. (1994). Más recientemente ha aparecido el OSA VI, introducido por Rondeaux et al. (1996). Todos ellos aparecen definidos en la Tabla 2. El primero de ellos introduce nuevamente los parámetros de la línea del suelo, y la variable X para minimizar al máximo los efectos del suelo. Los autores aconsejan tomar un valor de 0.08. En relación a esta variable se podrían repetir los comentarios efectuados anteriormente con relación a la l del SAVI. El MSAVI resulta de incluir en la fórmula del SAVI una dependencia explícita de la l con la cantidad de vegetación. Finalmente, el OSA VI es como un SAVI sin el factor de normalización $1+l$, y en el que se ha tomado $l=Y$. Los autores recomiendan en este caso tomar $Y=0.16$. Se puede ver también que este índice es similar al TSAVI también, sin más que tomar $a=1$ y $b=0$. Evidentemente, cuánto se ajusten estos índices al conjunto experimental de datos va a depender de lo apropiada que sea la selección de la variable l , X o Y.

Índices de alta resolución espectral

La resolución espectral de los datos convencionales de Teledetección, con anchura de banda de ≈ 100 nm, presenta limitaciones cuando el espectro de reflectividad del material de interés muestra cambios no graduales o rasgos característicos muy finos en determinadas longitudes de onda. En este con texto, puede ser de gran interés la utilización de datos de alta resolución espectral (bandas de algunos nanómetros de anchura), que permiten identificar y resolver rasgos más finos en los espectros. Tal sería el caso, por ejemplo, de las medidas realizadas con espectrorradiómetros a nivel de suelo o las procedentes de imágenes del AVIRIS. La riqueza espectral de estos datos puede explotarse al máximo recurriendo a técnicas propias de espectroscopía, ampliamente utilizadas, por otra parte, en otros campos de investigación como es el caso de la química analítica o la ciencia de materiales. Una de estas técnicas consiste en anali-

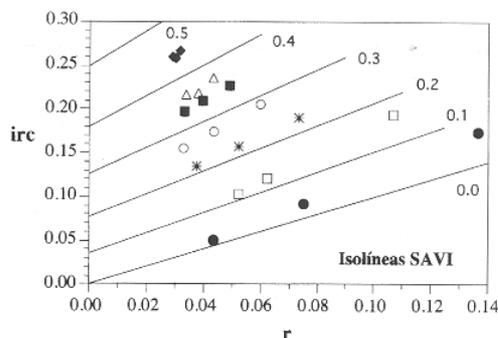


Figura 6. Isolíneas de SAVI constante para $l=0.05$. Los símbolos representan los valores de LAI que se indicaron en la figura 3.

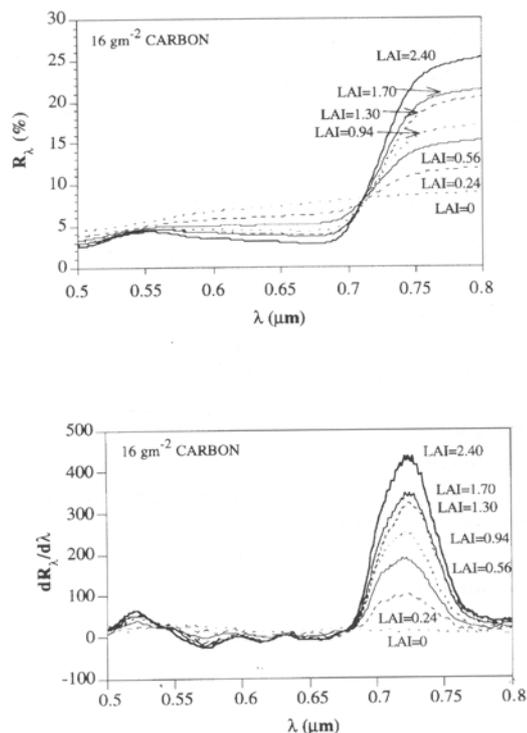


Figura 7. Espectros de reflectividad (a) y de la primera derivada (b) correspondientes a plots con un suelo dado (recubrimiento de carbón de 16 gm^{-2}) y distintos valores de LAI.

zar las derivadas sucesivas de los espectros en función de la longitud de onda (Gilabert et al., 1997; O'Haver, 1979), dado que permiten reconocer mejor algunos rasgos de los mismos (con independencia del "brightness" del espectro) así como resolver solapamientos de características espectrales. Ciertamente esto es así porque la primera derivada muestra máximos donde en el espectro original aparecían puntos de inflexión y la segunda derivada los muestra donde inicialmente se producía un rasgo de absorción, esto es, un mínimo de reflectividad.

En concreto, para el caso de la vegetación, la 1.ª derivada de los espectros permite identificar el denominado límite rojo (*red edge*) y calcular algunas magnitudes asociadas al mismo (posición, amplitud, área...), cuya función es similar a la de los índices de vegetación vistos anteriormente, es decir, realzan la contribución de la vegetación en la señal radiométrica y normalizan la influencia del suelo de fondo. Recordemos que el límite rojo (Horler et al., 1983) es la zona de transición en la curva de reflectividad de la vegetación entre el mínimo en el rojo, asociado a la absorción por clorofila, y el máximo en el infrarrojo cercano (originado por la dispersión de la radiación por el interior de la estructura celular de las hojas) (entre 650 y 800 nm). Entre ambas regiones espectrales existe, por lo tanto, un punto de inflexión que, en el espectro correspondiente a la primera derivada, aparece como un máximo. Esta característica es exclusiva de los espectros de vegetación y no apa-

rece para nada en los espectros de suelo. La utilidad del límite rojo se ilustra, por ejemplo, en los trabajos de Gilabert et al. (1996), Danson & Plummer (1995) y Filella & Peñuelas (1994).

Veamos el límite rojo de los datos radiométricos citados anteriormente. En este apartado, se trabajará con los espectros medios representativos de cada plot, no con los valores obtenidos al aplicar los filtros de las bandas TM. La Figura 7(a) nos muestra estos espectros para el caso de un recubrimiento de carbón de 16gm-2 y para las longitudes de onda comprendidas entre 500 y 800 nm.

Se observa una disminución progresiva de la reflectividad en el rojo (aumento concentración clorofila) y un aumento en el infrarrojo próximo. En la Figura 7(b) se muestran las primeras derivadas de los mencionados espectros. En este caso se observa que el valor del máximo aumenta a medida que lo hace el LAI, mientras que la longitud de onda de este máximo sólo sufre ligeras variaciones.

Los parámetros asociados al límite rojo estudiados en este caso son: (i) la amplitud de la onda de la derivada (valor del máximo de la curva) y (ii) el área encerrada por la misma entre 680 y 780 nm (Filella and Peñuelas, 1994). Dado que en este caso han resultado ser redundantes, a partir de ahora consideraremos exclusivamente el primero. Ambos parámetros pueden, en principio, considerarse como índices de vegetación, dado que resultan ser proporcionales al LAI de los plots. En otros trabajos, sobre todo cuando se estudia la evolución fenológica de una cubierta vegetal, el parámetro del límite rojo que resulta ser más sensible a la misma es su posición, es decir, la longitud de onda en la que se produce el máximo en la derivada de la reflectividad, la cual va sufriendo un corrimiento hacia valores más altos en la época de crecimiento del cultivo y hacia valores más bajos en la senescencia (Gilabert et al., 1996).

En el siguiente apartado se realizará un estudio comparado de la potencia para normalizar la influencia del suelo de todos los índices considerados.

ESTUDIO COMPARADO DE LOS DIVERSOS ÍNDICES

La Figura 8 nos muestra ocho gráficos correspondientes a la relación de cada uno de los índices estudiados con el LAI. En dicha figura los círculos blancos corresponden a los plots con el suelo original, esto es, sin recubrimiento de carbón, mientras que las cruces corresponden al recubrimiento intermedio y los círculos negros al máximo recubrimiento.

Aunque no nos vamos a ocupar en este trabajo de estudiar las correlaciones índice/LAI, se puede afirmar que la mayoría de los índices de vegetación presentan una dependencia exponencial con respecto al LAI, del tipo $IV = A - B \exp(-C \cdot LAI)$, en donde A representa el valor de índice cuando $LAI \rightarrow \infty$, esto es, el valor de saturación, B es la diferencia entre A y el valor del índice correspondiente al suelo desnudo, y C está relacionado con la extinción de la radiación a través de la cubierta vegetal (Haret et al., 1989; Gilabert et al., 1996). En algunos casos, el valor del LAI a partir del cual se produce la saturación del índice no se encuentra dentro del rango de valores estudiados, por lo que la relación entre el índice y el LAI se puede considerar, aproximadamente lineal. Esta es la razón del diferente comportamiento que se observa en las distribuciones de puntos de la figura 8. Por ejemplo,

podríamos citar al *PVI* como un índice que presenta, dentro del rango de variación, una dependencia lineal con respecto al LAI, y al *NDVI* como aquél en el que se observa más claramente la saturación. Esto le resta validez a este índice dado que, por una parte, para valores bajos de LAI se ve fuertemente influenciado por el tipo de suelo y, por otra parte, para valores un poco más altos de LAI alcanza rápidamente la saturación, lo que implica cierta incertidumbre al estimar dicho parámetro biofísico a partir de medidas radiométricas.

Por todo lo dicho en apartados anteriores, un índice de vegetación será tanto más efectivo cuando, (i) para un valor de LAI dado, menor sea la sepa-

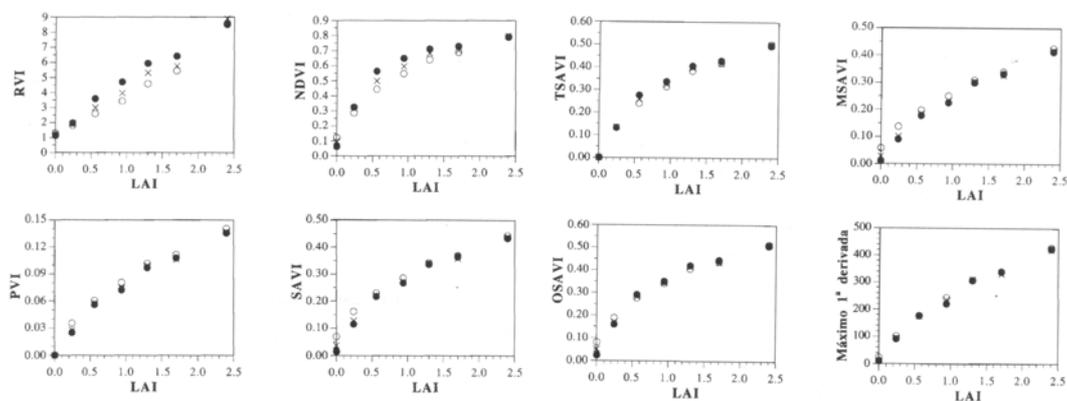


Figura 8. Índices de vegetación estudiados en función del LAI de los plots. Los símbolos hacen referencia al tipo de suelo, correspondiendo los círculos blancos a las medidas realizadas sobre el suelo original, las cruces al recubrimiento intermedio con carbón y los círculos negros al recubrimiento máximo.

ración entre los tres puntos correspondientes a los distintos suelos y, simultáneamente, (ii) cuanto mayor sea el intervalo de variación total del índice entre los valores extremos del LAI. Dado que cada uno de los índices considerados presenta un rango de variación diferente, es interesante definir alguna magnitud que permita su comparación objetiva y que tenga en cuenta las dos características (i) y (ii) que acabamos de mencionar.

Una magnitud que se puede considerar para cuantificar la eficacia de un índice de vegetación es la siguiente (LePriour et al., 1994):

$$C = \frac{\int_{LAI_{min}}^{LAI_{max}} [Max IV(LAI) - min IV(LAI)] d(LAI)}{IV(LAI_{max}) - IV(LAI_{min})} \times 100 \quad [2]$$

donde la integral del numerador representa el área encerrada entre los valores máximo y mínimo del índice de vegetación para los diferentes tipo de suelo dentro de todo el rango de variación de valores de LAI. El denominador es la diferencia entre los valores medios del índice de vegetación para los valores extremos del LAI. Esta magnitud nos indica cual es la eficacia del IV considerado, en promedio, para todo el rango de variación de los valores del LAI. Cuanto mayor sea dicha eficacia, menor será el valor de C. La Tabla 3 presenta los valores de la magnitud C para todos los índices considerados.

INDICE	C (%)
<i>RVI</i>	20
<i>NDVI</i>	20
<i>PVI</i>	10
<i>SAVI</i>	9
<i>TSAVI</i>	8
<i>MSAVI</i>	10
<i>OSAVI</i>	6
<i>RE</i>	3

Tabla 3. Eficacia de los índices de vegetación estudiados a través de la magnitud C (%).

Se observa la menor eficacia de los índices *RVI* y *NDVI* para normalizar el efecto del suelo y su menor sensibilidad a la presencia de vegetación. Los índices más efectivos teniendo en cuenta todo el intervalo de variación del LAI resultan ser, en este caso en particular, el *SAVI*, el *TSAVI*, el *OSAVI* y el *RE* (el valor máximo de la primera derivada del espectro en la longitud de onda correspondiente al *red edge* o límite rojo).

En la bibliografía aparece también la magnitud REN (*Relative Equivalent Noise*), introducida por Baret & Guyot (1991) y que se define como

$$REN(LAI) = \frac{\sigma_{lai}}{IV_{lai}} \times 100 \quad [3]$$

donde σ_{lai} hace referencia a la desviación típica de los valores del índice para un LAI determinado y IV_{lai} su valor medio. Un índice estará tanto más normalizado respecto a la influencia del suelo cuanto menor sea esta magnitud. Sin embargo, dicha magnitud no tiene en cuenta la característica (ii). Por este motivo, la magnitud que introduciremos aquí para valorar la eficacia de un índice será

$$T(LAI) = \frac{\sigma_{lai}}{\bar{\sigma}} \times 100 \quad [4]$$

donde $\bar{\sigma}$ hace referencia a la desviación entre los valores máximo y mínimo del índice considerado, teniendo en cuenta todo su intervalo de variación. Esta magnitud nos indicará para cada valor del LAI la eficacia del IV considerado, siendo la misma inversamente proporcional al valor de *T*, es decir, cuanto más pequeña sea *T* más eficaz se puede considerar el índice. Se observa que tanto *C* como *T* tienen un significado muy similar (ambas decrecen a medida que aumenta la eficacia del índice), pero la primera establece una valoración global del índice para todo el rango de LAI considerado, mientras que la segunda establece una valoración del índice en función del LAI.

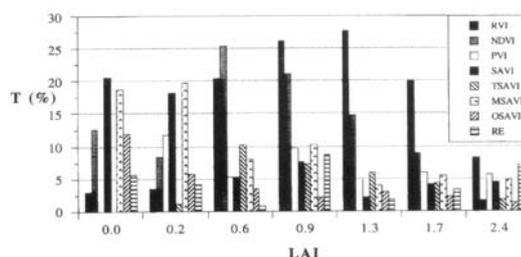


Figura 9. Valores de la magnitud T (definida en el texto [4] en función del LAI para todos los índices de vegetación estudiados.

La Figura 9 es una representación de esta última magnitud en función del LAI. Se observa que para valores intermedios de la cantidad de vegetación (LAI=0.6-1.7), que es cuando los efectos de la dispersión múltiple de la radiación por el interior de la masa vegetal son mayores y, por lo tanto, mayor es la influencia del suelo, los índices de vegetación tradicionales *RVI* y *NDVI* presentan los valores más altos, indicando una eficacia menor en cuanto a su poder de normalización de la perturbación que introduce el suelo en la señal. Se pone de manifiesto la limitación de estos índices en zonas que presentan vegetación dispersa. El *PVI*, sin embargo, parece funcionar mejor, posiblemente a que se ha podido definir con suficiente precisión en este caso la línea del suelo. El *SAVI* y el *MSAVI* parecen presentar cierta sensibilidad al suelo para valores bajo de vegetación, pero aumentan considerablemente su eficacia para valores mayores del LAI. Por su parte, el *TSAVI*, el *OSAVI* y el "red edge" *RE* (haciendo referencia al máximo de la primera derivada en este punto) presentan valores

particularmente buenos prácticamente en todo el rango de variación del LAI.

COMENTARIOS

De la valoración global de las dos magnitudes estudiadas para cuantificar la eficacia de los índices de vegetación considerados, se podría concluir (sin ánimo de generalizar) que el *OSAVI*, el *TSAVI*, el *SAVI* y el *RE* parecen ser los índices más adecuados para nuestro conjunto de datos experimentales en particular. Hay que tener en cuenta que mientras que el *OSAVI* y el *SAVI* se pueden calcular con independencia de la ecuación de la línea de suelo, para calcular el *TSAVI* hace falta una buena determinación de la misma, lo cual en este caso ha sido posible pero no lo es en general. Por otra parte, se pone de manifiesto también la ventaja de disponer del espectro de reflectividad, que permite calcular los parámetros del límite rojo que tan buenos resultados han dado en este estudio. No obstante, las limitaciones de este índice es que sólo se puede aplicar cuando se dispone de datos de alta resolución espectral y que matemáticamente requiere más tiempo de cálculo.

Conviene insistir nuevamente en que estas conclusiones no poseen carácter universal, lo cual sólo sería posible si el estudio comparado se hubiera realizado en base a un conjunto de datos experimentales más completo. Sin embargo, el estudio realizado sí ha servido para alcanzar el objetivo del trabajo que presentamos al principio, es decir, para discutir, desde un punto de vista docente, la problemática asociada a la funcionalidad de los índices de vegetación e ilustrarla con un ejemplo concreto.

APÉNDICE

Consideremos el plano x - y , donde y hace referencia a la reflectividad en el infrarrojo cercano (*irc*) y x a la del rojo (*r*). Según esta nomenclatura, el índice *RVI* se escribe como:

$$RVI = \frac{y}{x}$$

de donde se observa que las ecuaciones de las isolíneas que predice este índice de vegetación vendrán dadas por

$$y = RVIx$$

Dando valores a *RVI* se obtiene una familia de rectas que pasan por el origen y cuya pendiente se corresponde con el valor del índice.

De forma análoga, el *NDVI* se expresa como

$$NDVI = \frac{y-x}{y+x}$$

Despejando la y :

$$y = x \frac{1+NDVI}{1-NDVI}$$

Si definimos un parámetro $k(NDVI) = \frac{1+NDVI}{1-NDVI}$

la ecuación anterior se puede escribir como

$$y = k(NDVI)x$$

que da lugar a una familia de isolíneas de pendiente variable y convergentes en el origen.

Por último, el *PVI* se podrá expresar como

$$PVI = \frac{|y - Aax - b|}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

Definiendo la constante $m = \sqrt{a^2 + 1}$ y despejando la variable dependiente se obtiene

$$y = ax + (b + mPVI) = y_{\text{suelo}} + mPVI$$

que es la ecuación de una recta paralela a la línea de suelo cuya distancia a dicha línea aumenta proporcionalmente al índice *PVI*. Dando valores al mismo se obtiene una familia de rectas paralelas a la línea de suelo.

BIBLIOGRAFIA

- BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F. y HUETE, A. R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*. 13: 95-120.
- BARET, F., GUYOT, G. y MAJOR, D. J. 1989. Crop biomass evolution using radiometric measurements. *Photogrammetria*. 43: 241-256.
- BARET, F. y GUYOT, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35: 161-173.
- BARET, F. 1995. Use of spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical character en Danson, F. M. and Plummer, S. E. (eds.) *Advances in Environmental Remote Sensing*. John Wiley & Sons. Ltd. ch. 3.
- BAUSCH, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance based crop coefficients for corn *Remote Sensing of Environment*. 46: 213-222.
- DANSON, F. M. Y PLUMMER, S. E. 1995. Red-edge response to forest leaf area index. *International Journal of Remote Sensing*. 16: 183-188.
- ELVIDGE, C. D. y CHEN, Z. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 54: 38-48.
- FILELLA, I. y PEÑUELAS, J. 1994. The red edge position and shape as indicator of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*. 15: 1459-1470.
- GARCIA-HARO, F. J. 1994. Inversión de un modelo lineal de reflectividad para la extracción de parámetros

- tros relacionados con la vegetación en paisajes semi-áridos. Tesis de Licenciatura. Universitat de Valencia.
- GARCIA-HARO, F. J., GILABERT, M. A. Y MELIA, J. 1996. Linear spectral mixture modelling to estimate vegetation amount from optical spectral data. *International Journal of Remote Sensing*. 17: 3373-3400.
- GILABERT, M. A. 1990. Índices de vegetación, en Gandía, S. y Meliá, J. (eds.) *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura*, Universitat de Valencia, pp. 285-294.
- GILABERT, M. A., GANDIA, S. y MELIA, J. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*. 55: 11-20.
- GILABERT, M. A., YOUNIS, M. T., GARCÍA-HARO, J. y MELIA, J. 1997. Sobre la utilización de derivadas en el análisis de datos de alta resolución espectral, en Casanova, J. L. y Sanz Justo, J. (eds.), *Teledetección: usos y aplicaciones*. pp. 407-414.
- HORLER, D. N. H., DOCKRA y, M. y BARBER, J. 1983. The red edge of plant reflectance, *International Journal of Remote Sensing*, 4: 273-288.
- HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
- HUETE, A. R. y WARRICK, A. W. 1990. Assessment of vegetation and soil water regimes in partial canopies with optical remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 32: 155-167.
- JACKSON, R. D., SLATER, P. N. y PINTER, P. J. 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment*. 13: 187-208.
- LEPRIEUR, D., VERSTRAETE, M. M. y PINTY, B. 1994. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve cover from AVHRR data. *Remote Sensing Reviews*. 10: 265-284.
- O'HAVER, T. C. 1979. Derivative and wavelength modulation spectrometry. *Analytical Chemistry*. 51: 90A-100A.
- PERRY, CH. R. y LAUTENSCHLAOER, L. F. 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 14: 169-182.
- QI, J., CHEHBOUNI, AL., HUETE, A. R., KERR, y. H. Y SOROOSHIAN, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment* 48: 119-126.
- RICHARDSON, A. J. Y WIEOAND, C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 43: 1.541-1.552.
- RONDEAUX, O., STEVEN, M. y BARET, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55: 95-107.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERINO, D. W. y HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/OSFC. Type III. Final Report. Oreenbello MD. pp. 371.
- WELLES, J. M. y NORMAN, J. M. 1991. Instruments for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal*. 83,5: 818-825.