

## Spectral Signatures and Vegetation Indices

A. R. HUETE

### INTRODUCCION

La composición espectral del flujo radiante emergente de la superficie del suelo proporciona información acerca de las propiedades biológicas, químicas y físicas del suelo, del agua y de la vegetación que caracterizan los sistemas terrestres. Las técnicas de teledetección, los modelos y los índices se diseñan para interpretar más fácilmente esta información espectral. No obstante, para que las técnicas de teledetección se apliquen eficientemente, debemos entender cuales son las limitaciones y aplicabilidad de los datos de teledetección.

Se han desarrollado numerosos índices para caracterizar las superficies cubiertas por vegetación. El más común de estos índices usa la reflectividad en el rojo y en el infrarrojo próximo (IRP) en forma de cociente (índice de vegetación de diferencia normalizada; Tucker, 1979) o de combinación lineal (índice de vegetación perpendicular; Richardson y Wiegand, 1977). Estos índices se han desarrollado para que presenten una

buena correlación con varios parámetros de la vegetación, como el área de hojas verdes, la biomasa, el porcentaje de cobertura verde, la productividad y la actividad fotosintética (Colwell, 1974; Hatfield *et al*, 1984; Sellers, 1985). Se muestran como técnicas válidas en la medida e interpretación de las condiciones de la vegetación y constituyen un importante paso hacia adelante en el establecimiento de modelos simples y "globales" que puedan describir adecuadamente la dinámica de los sistemas suelo-vegetación.

Los estudios de teledetección de la abundancia en vegetación, composición, productividad y salud a partir de las medidas ópticas realizadas desde un satélite, se ven distorsionadas, sin embargo, por la presencia de la atmósfera, a través de la cual debe pasar el flujo reflejado en la superficie terrestre y del cual debe discriminarse la vegetación. La contribución del suelo en la respuesta espectral del sistema planta-suelo es importante especialmente en áreas donde existan variaciones temporales o espaciales de la cobertura vegetal.

La influencia del suelo se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios, en los cuales para una cantidad de vegetación dada, los suelos con un sustrato más oscuro proporcionan valores mayores en el índice de vegetación, cuando se usa el índice de vegetación de diferencia normalizada ( $NDVI = (IRP - \text{rojo}) / (IRP + \text{rojo})$ ) como medida de la vegetación (Colwell, 1974; Elvidge y Lyon, 1985; Huete *et al.*, 1985). Huete *et al.* (1985) obtienen una influencia opuesta del brillo del suelo en el índice de vegetación perpendicular (PVI), los sustratos más claros proporcionan valores más elevados del índice para una cantidad de cobertura dada. Así, en zonas donde existan variaciones considerables en el brillo del suelo como resultado de diferencias en el contenido en agua, variaciones en la rugosidad, sombras o diferencias en materia orgánica, existirán influencias inducidas por el suelo en los valores del índice de vegetación.

La influencia del suelo en coberturas incompletas se debe parcialmente a la dependencia de la señal reflejada en el mismo de las propiedades ópticas de la cobertura que yace por encima de él. Una superficie cubierta por vegetación dispersa y transmite una cantidad significativa de flujo IRP hacia la superficie del suelo, irradiando el suelo debajo y entre plantas. Allen y Richardson (1968) demostraron como la radiación IRP se puede transmitir a través de ocho capas de hojas. El suelo, por lo tanto, refleja parte del flujo, difundido y transmitido por la vegetación, hacia el sensor en proporción al brillo

de la superficie del suelo. Por el contrario, la luz roja es fuertemente absorbida por las capas de hojas más superiores, por lo que la irradiancia en el suelo solo se debe a la que recibe directamente del sol. Así, la irradiancia en la superficie del suelo depende fuertemente de la densidad y propiedades ópticas de la vegetación. Las diferencias en los flujos transferidos en el rojo y en el IRP a través de la cobertura vegetal dan lugar a una interacción suelo-vegetación más complicada (Kimes *et al.*, 1985; Choudhury, 1987).

Heilman y Kress (1987) y Huete (1987) investigaron la penetración de la radiación en campos de algodón y obtuvieron que la respuesta espectral reflejada de la superficie del suelo imitaba la signatura espectral del algodón verde. Así, independientemente de los índices de vegetación comprobados, el "verdor" de la señal de la componente suelo no se distingue de la de la vegetación verde. Esta componente espectral se traduce en una "dependencia del suelo" de los índices de vegetación, porque la magnitud del verdor de la señal producida varía con las propiedades reflectantes del suelo.

El propósito de este trabajo es modelar la dependencia del brillo del suelo en las superficies parcialmente cubiertas y presentar un índice de vegetación simple que describa adecuadamente el comportamiento espectral del sistema suelo-vegetación, el cual está relacionado con los parámetros biofísicos significativos de las plantas.

## MODELO

En general, los índices de vegetación se basan en la existencia de una "línea de suelo" en el espacio definido por las bandas del rojo y del infrarrojo próximo (IRP), es decir, hay un eje principal de variación que pasa por el origen y va aumentando a medida que lo hace la reflectividad. Ya que la mayoría de los espectros de suelos se dibujan sobre, o encierran a, la línea de suelo, y ya que la ordenada en el origen es prácticamente nula, los valores del NDVI de suelos desnudos serán, prácticamente, idénticos para un amplio intervalo de condiciones del suelo. Del mismo modo, ya que el PVI utiliza esta línea de suelos como línea de base, los valores de suelos desnudos serán también idénticos para la mayor parte de suelos.

Las influencias del brillo del suelo son predominantes en superficies cubiertas porque los índices de vegetación ortogonales o de cociente fallan en la predicción del comportamiento de los píxeles cubiertos por vegetación a medida que se alejan de la línea de suelo. La figura 1 representa las líneas de cantidad de vegetación constante (isolíneas) predichas por los índices ortogonales y de cociente. Los índices de cociente se pueden representar gráficamente por isolíneas de pendiente variable que convergen en el origen, mientras que las isolíneas de los índices ortogonales son líneas paralelas que cortan al eje IRP. Así, los dos tipos de índices se complementan para explicar el comportamiento espectral

del sistema suelo-vegetación. A modo de ejemplo, en la figura 1 se muestra una cobertura parcial sobre un suelo seco (A). Si el suelo se humedece, el píxel cubierto por vegetación cambiaría en el espacio IRP-rojo y formaría una isolínea limitada por las condiciones de suelo seco y húmedo. Para que el NDVI normalice efectivamente tales cambios, dicho píxel debería moverse directamente hacia el origen (B), siguiendo una isolínea de valores NDVI constantes. El PVI, sin embargo, requeriría que el píxel se moviera a lo largo de una isolínea paralela a la línea de suelo (C) para que los píxeles, con suelo seco y húmedo, mantuvieran un valor constante (equidistante de la línea de suelo).

Huete *et al.*, (1985) y Huete y Jackson (1987) utilizaron espectros obtenidos "in situ" de algodón (*Gossypium hirsutum* L. var DPL-70) y hierba (*Eragrostis lehmanniana* Nees) para estudiar las isolíneas de los espectros de vegetación. Las isolíneas se obtuvieron insertando diferentes suelos con condiciones de humedad diferente bajo las coberturas vegetales. Los suelos incluían una arena tipo Superstition de color amarillo oscuro y brillante, un limo rojo tipo Whitehouse, un limo oscuro tipo Avondale y un limo oscuro y rico en materia orgánica tipo Cloversprings. Una vez convertidos en reflectividad (tomando como referencia un panel de BaSO<sub>4</sub>), los datos obtenidos se representan en la figura 2. Tanto las isolíneas de algodón como las de la hierba siguen un mismo patrón, las pendientes y ordenadas en el origen

umentan a medida que lo hace la densidad de vegetación. Las isolíneas nunca convergen al origen (como re-

quiere el NDVI) ni mantienen pendientes idénticas a la línea del suelo (requisito del PVI).

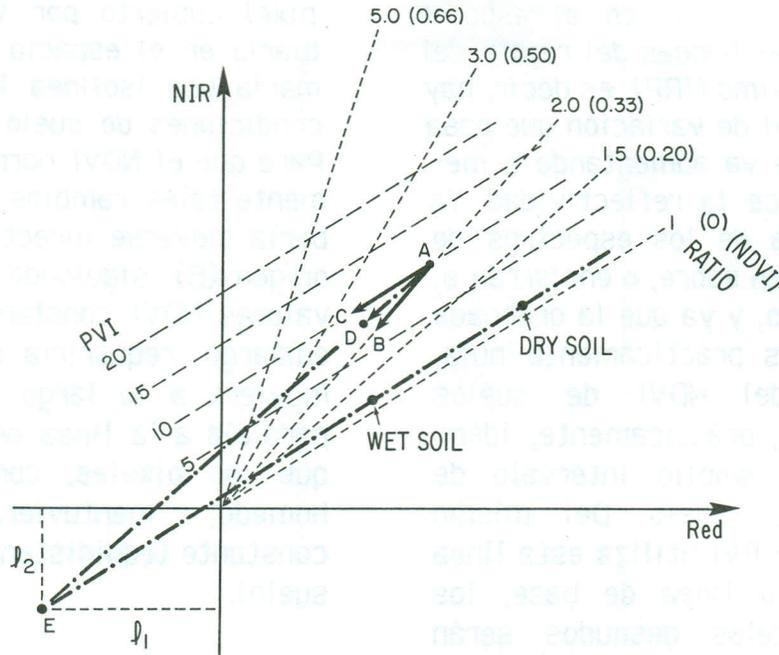


Figura 1.- Isolíneas de los espectros de vegetación que predicen los índices de diferencia normalizada (NDVI) y perpendicular (PVI), y puntos de convergencia en el espacio NIR (infrarrojo próximo, IRP) - Red (rojo).

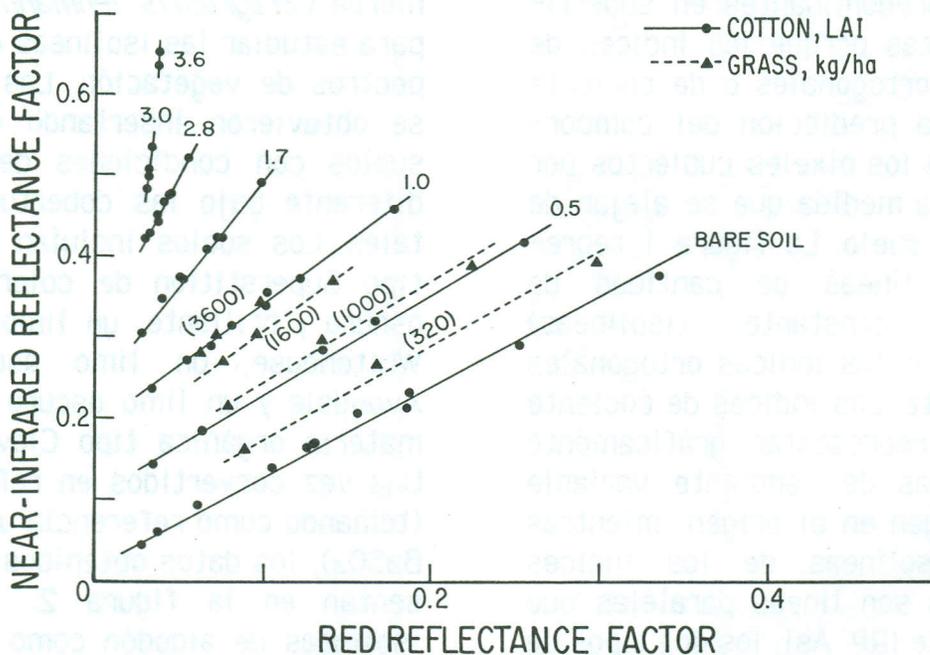


Figura 2.- Isolíneas de vegetación observadas para varias densidades de cobertura de algodón y hierba con diferentes suelos.

Las isolíneas observadas en la figura 2 convergen en alguna parte entre el origen (modelo del índice del cociente) y el infinito (modelo ortogonal). Cualquier punto de convergencia entre cero e infinito es el resultado de un índice espectral que cuenta con el comportamiento de la isolínea para que aumenten las pendientes y ordenadas en el origen con el aumento en el desarrollo de la vegetación (figuras 1 y 2). En este estudio, el comportamiento espectral del sistema suelo-vegetación es en primer lugar modelado gráficamente mediante un ajuste del origen del espacio IRP-rojo con un punto de convergencia de las isolíneas. Un corrimiento en el origen hacia valores negativos equivale a añadir una constante,  $L$ , a los datos de reflectividad en el rojo y en el IRP, de modo que el NDVI ajustado sea:

$$\frac{(IRP + \lambda_2) - (rojo + \lambda_1)}{(IRP + \lambda_2) + (rojo + \lambda_1)}, \quad (1)$$

Puesto que la línea de suelo tiene de pendiente prácticamente 1, los factores de ajuste,  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ , serán, aproximadamente, equivalentes. Moviendo los datos del IRP y del rojo una misma cantidad ( $\lambda_1 = \lambda_2$ ) la ecuación 1 se convierte en:

$$\frac{(IRP - rojo)}{(IRP + rojo + L)} \quad (2)$$

donde  $L = \lambda_1 + \lambda_2 = 2\lambda$ . Así, un índice de vegetación ajustado (soil adjusted vegetation index, SAVI) incluiría únicamente la adición de una constante,

$L$ , en el denominador del NDVI. Sin embargo, para mantener los límites del NDVI (-1 a +1), añadiremos un factor multiplicativo  $(1 + L)$  en la ecuación 2, tal que:

$$SAVI = \frac{(IRP - rojo)}{(IRP + rojo + L)} (1 + L) \quad (3)$$

## RESULTADOS

Aunque las isolíneas individuales no convergen realmente a un punto común, en un primer orden de aproximación se puede obtener desplazando el origen hasta un punto donde las densidades intermedias de vegetación ( $LAI=1$ ) convergen con la línea de suelo desnudo. En la figura 2 este resultado es aproximadamente igual en los ejes  $x$  e  $y$  (0,25 en unidades de reflectividad) ( $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,25$  en la figura 1 ó  $L = 0,5$  en la ecuación 3). En la figura se muestra una comparación entre el SAVI y los índices NDVI y PVI, representando los valores de cada uno frente al índice de superficie foliar ( $LAI$ ). En estas gráficas, se han utilizado ocho condiciones de suelo (4 tipos de húmedo y 4 tipos de seco) para alterar la contribución del mismo. El SAVI reduce sustancialmente las variaciones inducidas por el suelo en comparación con el NDVI y el PVI en la mayoría de las condiciones de la vegetación. La relación entre el SAVI y el índice de superficie foliar,  $LAI$ , es mucho más lineal que las encontradas con el NDVI o con el PVI. Aunque existe una pérdida de señal en el índice de vegetación entre el NDVI

y el SAVI, el cociente entre el ruido del suelo y la vegetación se mejoró considerablemente, con excepción de

las densidades de vegetación mayores (LAI>3).

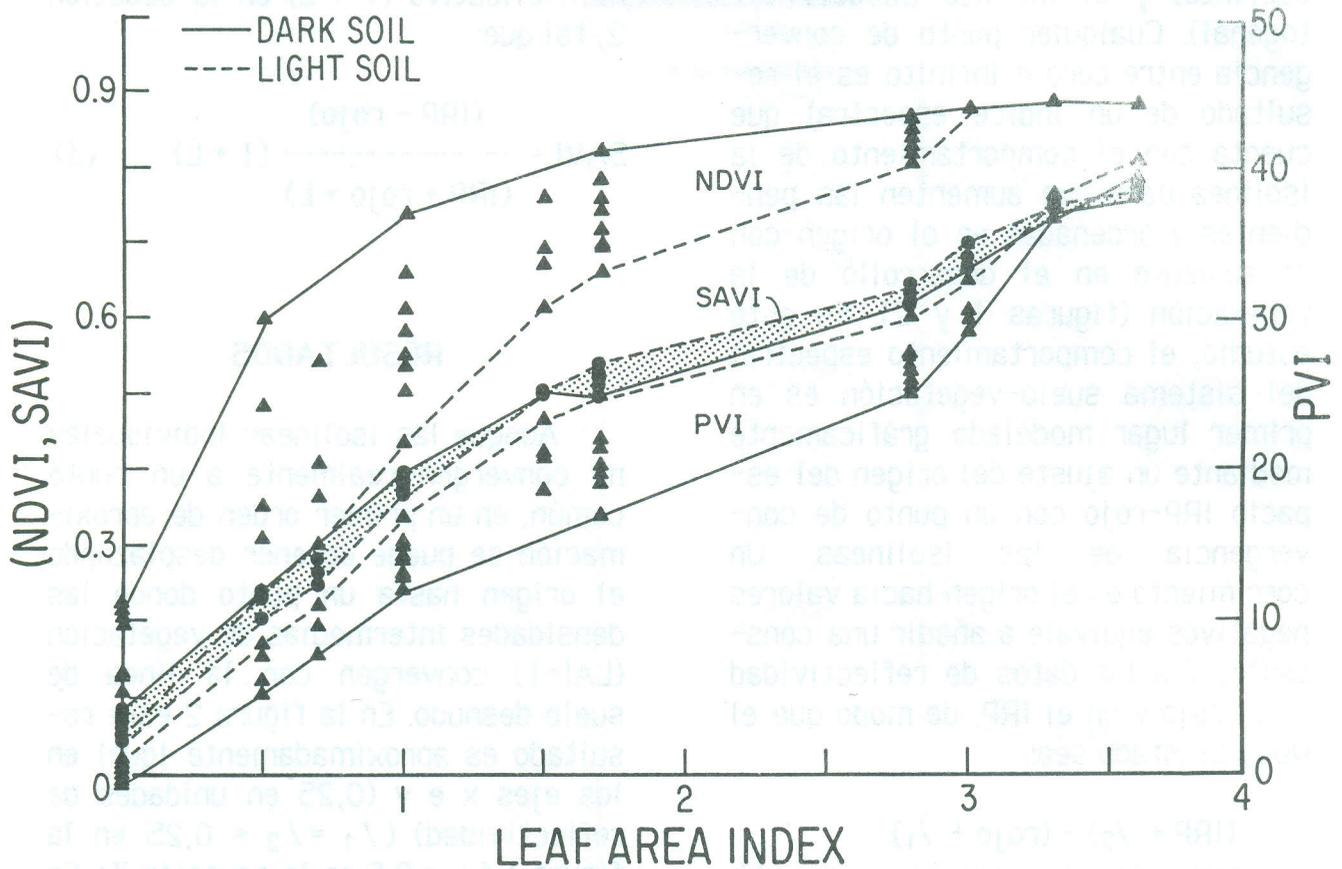


Figura 3.- Respuesta de los índices de vegetación y variaciones del suelo de los NDVI, SAVI e PVI, en función del índice de superficie foliar del algodón.

La aparente pérdida en la respuesta del índice de vegetación es digna de notarse porque el uso del SAVI, en vez del NDVI, puede dar una señal más baja en el índice de vegetación, especialmente en estudios que se realicen para un único tipo de suelo. Como se puede observar en la figura 3 existe una buena, pero curvilínea, relación entre el NDVI y el LAI para cualquier suelo específico. Es únicamente en datos globales y cuando se comparan a lo largo de

diferentes tipos de suelos cuando el NDVI sufre los problemas del suelo, que el SAVI es capaz de minimizar. La relación entre el NDVI y el LAI depende fuertemente del suelo como se observa por el considerable intervalo de valores del NDVI para una densidad de vegetación constante (NDVI varía desde 0,24 a 0,60 para LAI=0,5 y desde 0,44 a 0,74 para LAI=1). Las variaciones equivalentes con el SAVI son de 0,21 a 0,24 (LAI=0,5) y 0,38 a 0,40 (LAI=1).

## BASE TEORICA

La pendiente y la ordenada en el origen de las isólinas de vegetación en el espacio IRP-rojo se pueden relacionar también con las propiedades ópticas del sistema suelo-vegetación. Varios estudios se han ocupado de la dinámica del flujo radiante en superficies parcialmente cubiertas (Norman y Welles, 1983; Verhoef, 1984; Kimes *et al.*, 1985). Estos modelos se orientan hacia la predicción del flujo reflejado caracterizando la geometría, la estructura y las propiedades ópticas de una superficie cubierta por vegetación. Esto implica conocer la irradiancia en el rojo y en el IRP en la superficie del suelo una vez alterada por la presencia de la cobertura.

La transferencia del flujo radiante a través de un medio absorbente se puede evaluar mediante la ley de Bouguer:

$$E_s(\lambda) = E_0(\lambda) \exp \{-k(\lambda)m\} \quad \text{ó} \quad (4)$$

$$T(\lambda) = \exp\{-k(\lambda)m\} \quad (5)$$

donde  $E_0$  es la irradiancia global (directa y difusa) que llega al sistema suelo-vegetación;  $E_s$  es la irradiancia que llega a la superficie del suelo después de atravesar una cobertura de espesor óptico  $m$ ;  $k$  es el coeficiente de extinción;  $km$  es el espesor óptico de extinción (adimensional);  $T$  es la transmisividad de la cobertura vegetal; y  $\lambda$  es la longitud de onda. Usando LAI como el espesor óptico ( $m$ ), el coeficiente de extinción será la pendiente del ajuste  $\ln(T)$ -LAI.

Huete (1987) obtiene los datos de la transmisividad para el conjunto de datos de algodón presentados aquí, separando el flujo reflejado del conjunto algodón-suelo en dos componentes, la vegetación y el suelo:

$$d_m(\lambda) = E_0(\lambda)r_c(\lambda) + E_0(\lambda)r_s(\lambda)T^2(\lambda), \quad (6)$$

donde la señal obtenida de todo el sistema,  $d_m$ , es igual a la suma de (i) la componente vegetación,  $E_0r_c$ , que es el flujo directamente reflejado por la vegetación; y (ii) la componente dependiente del suelo,  $E_0r_sT^2$ , que es el producto de la irradiancia global,  $E_0$ , por la reflectividad del suelo,  $r_s$ , y por dos veces la transmisividad global,  $T^2$ .

Todos los flujos radiantes que interaccionan con el suelo forman la componente dependiente del suelo. La componente vegetación representa el flujo reflejado que se mediría si un suelo de reflectividad cero se situara debajo de la cobertura. Esta respuesta espectral es independiente del suelo y se relaciona con el LAI a través de una constante,  $\gamma$ , que depende de las propiedades dispersoras en el dominio óptico de la vegetación. Combinando esto con las ecuaciones 5 y 6 tenemos que:

$$r_m(\lambda) = \gamma(\lambda)LAI + r_s(\lambda) \exp\{2k(\lambda)LAI\}, \quad (7)$$

que es la suma de las componentes suelo y vegetación;  $r_m$  es la reflectividad del conjunto ( $d_m/E_0$ ).

Combinando las versiones para el rojo y el infrarrojo de la ecuación 7

con la ecuación de la línea de suelo, resulta una ecuación para la pendiente de las isolíneas de vegetación ( $M_{vi}$ ) en el espacio IRP-rojo:

$$r_s(irp) = r_s(rojo)M_s + I_s \quad y \quad (8)$$

$$M_{vi} = M_s \exp\{2(k_{rojo} - k_{irp}) LAI\} \quad (9)$$

$M_s$  e  $I_s$  son la pendiente y ordenada en el origen de la línea de suelo. La ecuación 9 demuestra que la pendiente de una isolínea de vegetación depende de la pendiente de la línea de suelo y de la diferencia entre los espesores ópticos en el rojo e IRP. Se pueden hacer las siguientes generalizaciones:

- si  $LAI=0$ , la ecuación 9 se reduce a la pendiente de la línea de suelo,
- si  $k_{rojo}=k_{irp}$ , la pendiente de las isolíneas permanece constante e igual a la pendiente de la línea de suelo,
- si  $k_{rojo}>k_{irp}$  (una vegetación activa fotosintéticamente), la diferencia entre los flujos transmitidos es positiva y la pendiente de la isolínea es mayor que la de la línea de suelo.

Así, es la diferencia entre la extinción en el rojo y en el infrarrojo próximo a través de superficie vegetada la que determina la pendiente de una isolínea y la influencia del suelo. A medida que aumenta la diferencia entre la extinción en el rojo y en el IRP, las isolíneas se vuelven más abruptas. Si los flujos de penetración en el rojo y en el IRP a través de la cobertura fueran iguales, entonces las pendientes de las isolíneas de

vegetación serían idénticas a la pendiente de la línea de suelo.

## DISCUSION

La técnica de transformación presentada en este estudio constituye un importante paso hacia adelante en la construcción de modelos globales simples que puedan describir adecuadamente la dinámica del sistema suelo-vegetación. Se ha demostrado ampliamente que los índices de vegetación constituyen unas técnicas válidas para la medida e interpretación de las condiciones de la vegetación. El objetivo de este estudio ha sido el de refinar estos índices, ya que estudios previos demostraban que eran sensibles al suelo. A este respecto, el factor de ajuste ( $L$ ) se presenta aquí como un método por el cual los índices espectrales se pueden "calibrar" para que las variaciones del sustrato suelo sean efectivamente normalizadas y no influyan espectralmente en la medida de la vegetación. En base a los datos de algodón y hierba obtenidos "in situ", se ha demostrado que un único factor de ajuste ( $L=0,5$ ) reduce considerablemente el ruido producido por el suelo en un amplio intervalo de densidades de vegetación.

Aunque el SAVI minimizó sucesivamente el ruido producido por el suelo en las dos coberturas de diferente arquitectura (erectófila y planófila) examinadas aquí, se necesitan más estudios de campo para confirmar la aplicabilidad del SAVI en una base global. Los flujos radiantes

transmitidos a través de las comunidades de vegetación implican mezclas de múltiples especies de plantas. La distribución de las diferentes especies de plantas, junto con sus morfologías y densidades, determinarán la composición y magnitud de la irradiancia en la superficie del suelo y, por tanto, la contribución e influencia de la parte de señal que depende del suelo. Así, las limitaciones del SAVI necesitarán analizarse en vegetación de distinta biomasa y en diferentes situaciones agrícolas. Lo que aparece como cierto es que el NDVI y el PVI están seriamente afectados por las variaciones del suelo y que casi cualquier ajuste (especialmente para L desde 0,25 a 1) mejoraría las interpretaciones de la vegetación obtenidas por teledetección.

Las isolíneas de vegetación en el espacio IRP-rojo se han obtenido lineales, sugiriendo que únicamente necesitamos considerar las interacciones espectrales de primer orden en los estudios que modelen el sistema suelo-vegetación. La pendiente de las isolíneas aumenta a medida que lo hace la densidad de vegetación porque el suelo refleja una gran cantidad del flujo IRP dispersado por la vegetación, mientras que la luz roja es absorbida, en su mayor parte, por la cobertura. Aunque los índices de vegetación reproducen el comportamiento lineal de las isolíneas, fallan al no tener en cuenta el aumento simultáneo en la pendiente y en la ordenada en el origen, al aumentar las densidades de vegetación. El PVI tiene en cuenta el aumento en el eje IRP al aumentar la biomasa, mientras

que los índices de cociente tienen en cuenta el aumento de pendiente con densidades de vegetación mayores. Los índices ortogonales suponen que no existen interacciones espectrales entre el suelo y la vegetación, mientras que los índices de cociente sobreestiman las interacciones espectrales y producen isolíneas muy empinadas.

El concepto de origen cambiado, utilizado aquí, proporciona también una conexión entre las influencias del suelo en el NDVI (convergencia en el origen) con las del PVI (convergencia en el infinito). En los puntos de convergencia bajos, como en el NDVI, las influencias del suelo tienen lugar en suelos oscuros produciendo los valores de los índices espectrales más elevados. Como el punto de convergencia aumenta lejos del origen, las influencias del brillo del suelo disminuyen gradualmente y desaparecen totalmente en algún origen óptimo. A medida que las distancias de convergencia son mayores, los problemas del suelo reaparecen, pero ahora son los suelos de color claro quienes producen los valores mayores en los índices espectrales. Los índices ortogonales representan los puntos de convergencia mayores (infinito) y, por consiguiente, la influencia del brillo del suelo en estos índices es la opuesta a la de los índices de cociente.

Los resultados presentados aquí se basan en el espacio de reflectividades IRP-rojo. La orientación de la línea de suelo y, por tanto, de las isolíneas de vegetación diferirían si

se utilizaran las radiancias o las cuentas digitales, en vez de las reflectividades. Las diferencias en los filtros del rojo y del IRP entre sensores, así como la naturaleza del calibrado del satélite, afectarán también a las pendientes y ordenadas en el origen de las isolíneas en el espacio IRP-rojo. No obstante, la premisa básica, que es que existe influencia del brillo del suelo en los espectros de vegetación incompleta y que estas influencias pueden ser minimizadas, permanece.

#### AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer al U.S. Water Conservation Laboratory de Phoenix, Arizona (USDA-ARS) el haberme dejado utilizar sus campos experimentales, equipo, recursos y soporte, los cuales hicieron posibles los estudios experimentales.

#### BIBLIOGRAFIA

- Allen, W.A., and Richardson, A.J. (1968), Interaction of light with a plant canopy, *J. Opt. Soc. Am.* 58: 1023-1028.
- Choudhury, B.J. (1987), Relationship between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis, *Remote Sens. Environ.* 22: 209-233.
- Colwell, J.E. (1974), Vegetation canopy reflectance, *Remote Sens. Environ.* 3: 175-183.
- Elvidge, C.D., and Lyon, R.J.P. (1985), Influence of rock-soil spectral variation on assessment of green biomass, *Remote Sens. Environ.* 17: 265-279.
- Hatfield, J.L., Asrar, G. and Kanemasu, E.T. (1984), Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance, *Remote Sens. Environ.* 14: 65-75.
- Heilman, J.L., and Kress, M.R. (1987), A verification of canopy-soil spectral interaction, *Agron. J.* (in press).
- Huete, A.R. and Jackson, R.D. (1987), The suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands, *Remote Sens. Environ.* (in press).
- Huete, A.R. (1987), Soil-dependent spectral response in a developing plant canopy, *Agron. J.* 79: 61-68.
- Huete, A.R., Jackson, R.D. and Post, D.F. (1985), Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, *Remote Sens. Environ.* 17: 37-53.
- Kimes, D.S., Norman, J.M., and Walthall, C.L. (1985), Modeling the radiant transfers of sparse vegetation, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* GE-23: 695-704.
- Norman, J.M., and Welles, J.M. (1983), Radiative transfer in an array of canopies, *Agron. J.* 75: 481-488.
- Richardson, A.J., and Wiegand, C.L. (1977), Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 43: 1541-1552.
- Sellers, P.J. (1985), Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *Int. J. Remote Sens.* 6: 1335-1372.

Tucker, C.J. (1979), Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sens. Environ.* 8: 127-150.

Verhoef, W. (1984), Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model, *Remote Sens. Environ.* 16: 125-141.