

Influencia del ángulo cenital de iluminación en los índices de vegetación

A. Vercher, M. A. Gilabert, F. Camacho de Coca y J. Meliá

Correo electrónico: alexandre.verger@uv.es

Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València.

C/Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (València)

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio acerca de la sensibilidad que algunos de los índices de vegetación más utilizados manifiestan frente a las variaciones en el ángulo cenital solar. Se han analizado diferentes cubiertas vegetales en una observación, aproximadamente, desde el nadir y tanto en el plano de observación principal como en el ortogonal. El estudio se ha realizado con datos hiperespectrales del sensor aerotransportado de gran campo de visión (60°) HyMap, que realizó 3 vuelos con dos pasadas ortogonales entre sí sobre una zona de cultivos localizada en Barrax (Albacete) durante el transcurso de la campaña de 1999 del proyecto DAISEX (*Digital Airborne Imaging Spectroradiometer Experiment*). Los resultados muestran que para los cultivos con vegetación densa y valores altos de LAI, en observación próxima al nadir, los índices analizados son poco sensibles a las variaciones del ángulo cenital solar. Sin embargo, en los cultivos con valores de LAI bajos, donde la anisotropía es mayor, se observa que el valor de los índices de vegetación aumenta con el ángulo cenital solar.

PALABRAS CLAVE: índices de vegetación, anisotropía, ángulo cenital solar, HyMap.

ABSTRACT

The effects of solar zenith angle on spectral vegetation indices are analyzed in this work. Different vegetation canopies have been considered at near nadir view both in the principal plane and in the orthogonal plane. In this study, we have made use of the hyperspectral capabilities of the wide-FOV airborne HyMap data, and the several flights that were carried out in 1999 over the Barrax area (Albacete) in the frame of the DAISEX (*Digital Airborne Imaging Spectroradiometer Experiment*) project.

It is concluded that the vegetation indices hardly vary with the solar zenith angle in dense vegetation canopies (high LAI values). However, an increase in vegetation indices when solar zenith angle increases has been found in crops with low values of LAI.

KEY WORDS: vegetation indices, anisotropy, solar zenith angle, HyMap.

INTRODUCCIÓN

Las superficies naturales y, en particular, las cubiertas vegetales, no son difusores lambertianos y, en consecuencia, su reflectividad presenta un comportamiento claramente anisótropo (Kimes, 1983, Deering *et al.*, 1999). Por ello, la geometría de observación e iluminación afecta a la reflectividad observada de una cubierta vegetal, dado que determina la proporción relativa de los distintos componentes del sistema en el campo de observación del sensor. Las propiedades espectro-angulares de la reflectividad de una cubierta vegetal pueden caracterizarse mediante la función de distribución

de la reflectividad bidireccional o BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) (Nicodemus *et al.*, 1977). La BRDF depende, básicamente, de la geometría de adquisición, de las características estructurales de la cubierta vegetal y de las propiedades ópticas de sus componentes (Camacho-de Coca *et al.*, 2002a). Las características estructurales de la escena determinan la geometría de la superficie, cuya influencia en la BRDF puede ser explicada, principalmente, mediante dos efectos: el *gap effect* (efecto hueco) y el *backshadow effect* (efecto de dispersión direccional) (Kimes, 1983; Sandmeier *et al.*, 1998; Camacho-de Coca *et al.*, 2001). El efecto hueco se produce cuando desplazamos el

sensor de la vertical y aumenta, en el campo de observación del sensor, la proporción de estratos superiores, más irradiados. Esto produce que por lo general, en cubiertas abiertas, a medida que nos alejamos del nadir, la reflectividad en el visible disminuye, aumentando en el infrarrojo cercano. El *backshadow effect* se produce en la dirección de dispersión hacia delante, en la que el sensor detecta una alta proporción de elementos sombreados. La combinación de estos dos efectos produce un mínimo de reflectividad cercano del *forward scattering* (hacia adelante) y un máximo en la dirección de retrodispersión. Este máximo en la reflectividad es denominado el efecto *hot spot* y responde a mecanismos de transmisión de radiación en el interior de la cubierta (Camacho-de Coca *et al.*, 2002b). Por otra parte, las propiedades ópticas de los elementos que conforman la cubierta vegetal dependen de la longitud de onda, lo que producirá una variabilidad espectral de la anisotropía de la BRDF en función del intervalo espectral en que nos situemos (Sandmeier *et al.*, 1998).

La anisotropía de la reflectividad constituye uno de los campos de investigación en teledetección donde actualmente se está trabajando más activamente. Los requisitos instrumentales habían limitado hasta ahora los estudios direccionales de la reflectividad. Los satélites tradicionales como el LANDSAT se caracterizan por realizar sus observaciones desde el nadir (observación vertical) y porque su paso por un lugar determinado se efectúa siempre a la misma hora local. Esto, claramente, supone una limitación en la perspectiva de observación de la zona y obliga a adoptar la hipótesis de comportamiento lambertiano de la superficie. Los nuevos satélites, además de incorporar nuevos canales espectrales de medida, permiten, en alguno de ellos como SEVIRI/MSG, AVHRR3/EPS, POLDER/ADEOSII y AATSR/ENVISAT captar imágenes bajo condiciones de observación variables, en razón a la elevada frecuencia de medidas diarias y a la orientabilidad del sensor. Esto posibilita un mejor conocimiento desde satélite de la BRDF de las superficies, lo que se traduce en que el IFOV (*Instantaneous Field Of View*) del sensor capta mejor el sistema en su estructura tridimensional. Así, además de apoyarnos en la respuesta espectral del suelo y vegetación, podemos obtener información de su estructura tridimensional: Pasamos de una signatura espectral a una signatura direccional y puede tratarse la superficie como un medio difusor no lambertiano tal y como se describe en Camacho-

de Coca *et al.* (2002a). De este modo, la anisotropía en la reflectividad puede considerarse como una fuente de información adicional que conviene realizar para aprovechar sus posibilidades.

Sin embargo y, por otra parte, siempre que no se pretenda explotar la dependencia angular de la reflectividad, ésta introduce un factor de variabilidad en la señal que debe ser tratado como un 'ruido' que enmascara la información de interés. Así pues, la anisotropía de la reflectividad puede considerarse, también, como una fuente de error en todas aquellas medidas de reflectividad o parámetros de la cubierta vegetal derivados a partir de ésta. Tradicionalmente, el estudio de la cubierta vegetal del suelo mediante imágenes de satélite se ha fundamentado en la distinta respuesta radiométrica que suelo y vegetación tienen en el dominio solar del espectro (Meliá *et al.*, 1986). En este sentido, basándose en la característica espectral de suelo y vegetación, los índices de vegetación nos proporcionan un método rápido y eficaz para cuantificar la abundancia de vegetación (Gilabert *et al.*, 1997). En el cálculo de los índices espectrales de vegetación, la anisotropía de la reflectividad constituye una perturbación que debemos minimizar en lo posible, análogamente a como, por ejemplo, se corrige el efecto en la señal del suelo de fondo o de la atmósfera. Precisamente, en este sentido abordamos el problema de la anisotropía en el presente trabajo.

Se realiza un estudio comparativo que trata de analizar cómo se ven afectados algunos de los índices de vegetación más utilizados (véase Tabla 3) por las variaciones en el ángulo cenital solar con que se ilumina la escena y, entre estos índices, trataremos de encontrar los que se vean menos influenciados por los efectos de la anisotropía en la señal. Se han utilizado datos de avión del sensor HyMap, con vuelos efectuados sobre una explotación agrícola situada en Barrax (Albacete). En esta zona de estudio podemos encontrar cultivos con características distintas, lo que permite analizar el comportamiento de los índices de vegetación frente a las variaciones del ángulo cenital solar en un amplio rango de valores del LAI. Realizaremos las medidas tanto en el plano de observación principal (plano que contiene a la fuente de iluminación y al vector normal a la superficie observada) como en el ortogonal (plano de observación perpendicular al plano principal). Así mismo, las medidas se toman bajo ángulos cenitales de observación pequeños. De este modo se minimiza la influencia del ángulo cenital de observación y se puede considerar que las

observaciones, aproximadamente, se efectúan desde el nadir.

En el siguiente apartado se describe el procedimiento experimental seguido, detallando la geometría de adquisición de los datos HyMap, así como las características de la zona de estudio y de los cultivos analizados. Se presentan también, los índices de vegetación estudiados y se explica la metodología seguida para calcularlos. En el apartado de resultados se dedica especial atención al cálculo de la línea de suelo, dado que la mayor parte de los índices que conforman nuestra selección han sido desarrollados a partir de ésta. Así mismo, antes de analizar propiamente los índices de vegetación, se presentan los valores de reflectividad en el rojo y en el infrarrojo cercano que intervienen en el cálculo de estos índices y se estudia la dependencia de la reflectividad en estas bandas espectrales con la geometría de adquisición de las medidas. Por último, se muestra en función del LAI la variabilidad que exhiben los valores de los índices de vegetación en las diferentes configuraciones de medida y se analiza su dependencia con el ángulo cenital de iluminación.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En esta sección se describe, en primer lugar, la geometría del problema, detallando los ángulos que definen la configuración de observación e iluminación. A continuación se explica el procedimiento de adquisición de los datos experimentales mediante el sensor aerotransportado HyMap. Así mismo, se hace una descripción de la zona de estudio y de las parcelas de cultivo seleccionadas. Finalmente se presenta una relación de los índices de vegetación analizados y se explica la metodología que se sigue para calcularlos.

Geometría de adquisición

La Figura 1 muestra esquemáticamente la geometría de los flujos de radiación incidente y reflejado. La geometría de observación viene determinada por el ángulo acimutal relativo, Φ , que indica la posición del plano de observación respecto al plano de iluminación o plano principal. Φ varía desde 0 (Plano Principal, P.P.) hasta $\pi/2$ (Plano Ortogonal, P.O.). Para cada plano de observación, el ángulo cenital de observación, θ_r , tomará valores entre $-\pi/2$ y $+\pi/2$ (con ángulo cenital negativo indicamos que

la contribución a la reflectividad proviene de la dispersión hacia adelante, y ángulos positivos que la dispersión proviene de la retrodispersión). Por último, la altura solar queda determinada especificando el ángulo cenital solar, θ_i .

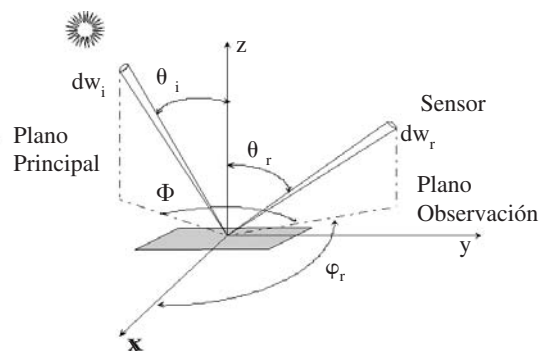


Figura 1. Sistema de coordenadas que define la geometría de los flujos de radiación incidente y reflejado: dw (elemento de ángulo sólido), θ (ángulo cenital), φ (ángulo acimutal), i (dirección de iluminación), r (dirección de observación) y Φ (ángulo acimutal relativo). (Adaptado de Camacho-de Coca *et al.*, 2001).

Datos HyMap

Para estudiar la dependencia de los índices de vegetación con las condiciones de observación e iluminación, hemos utilizado datos HyMap (Hyperspectral Mapper) adquiridos en la campaña DAISEX-99 los días 3 y 4 de Junio de 1999. En el transcurso de esta campaña, se llevaron a cabo tres vuelos sobre el área de Barrax (Albacete; $39^{\circ}3' N / 2^{\circ}6' W$, 700 m) con el sensor aerotransportado de gran campo de visión HyMap a bordo del DLR Do228.

El sensor HyMap dispone de 128 canales entre 0.4 y 2.5mm, entre los cuales cuatro de ellos (canales 15-18) miden en la banda del rojo ([0.63-0.69]mm) y otros doce (canales 23-34) lo hacen en la banda del infrarrojo cercano ([0.76-0.90]mm). Este sensor presenta una resolución espacial de 5 m y un campo de visión (FOV) de 60.3° (512 píxeles). Puede obtenerse más información acerca de este instrumento en las páginas de Internet: <http://www.op.dlr.de/dais> y <http://www.hyvista.com>.

Los vuelos de la campaña DAISEX se diseñaron con el objetivo de estudiar la anisotropía de la reflectividad introducida por las condiciones de observación e iluminación (Moreno *et al.*, 2001). La toma de medidas se realizó durante dos días consecutivos mediante tres vuelos efectuados a distin-

tas horas del día y siguiendo en cada caso dos direcciones de vuelo diferentes para poder disponer de un amplio rango de ángulos de iluminación y de observación. De este modo, se obtienen seis imágenes diferentes de la misma zona de estudio, dadas las seis configuraciones de observación e iluminación en que se realizan las medidas. En la Tabla 1 se muestran los datos que determinan la geometría de los vuelos. Las imágenes adquiridas tienen unas dimensiones de 4 km x 4 km (790 x 790 píxeles) y fueron corregidas atmosférica y geoméricamente por el centro aeroespacial alemán DLR (Hausold, 2001; Richter, 2001).

maíz, cebada, trigo, legumbres y remolacha. Los distintos suelos presentes en el área de estudio son bastante similares y se caracterizan por tener una textura fina y un alto grado de compactación en seco, además todos ellos presentan un estrato cálcico por debajo de los 40 cm de la superficie (García *et al.*, 2001).

Entre los distintos cultivos que había en la zona de estudio y de los cuales se disponía de datos HyMap, se seleccionaron para su análisis aquellos que presentaran entre sí un comportamiento difusor distinto y que fueran representativos de la variedad de valores de LAI de la zona para hacer un estudio de la res-

Nombre	Dirección	Fecha	HLS*	θ_i	Φ
Bar1_12	N →S	3.6.1999	11:52	17.8°	78.9°
Bar2_12	E→W	3.6.1999	12:08	17.6°	2.1°
Bar1_08	N→S	4.6.1999	08:01	54.4°	0.5°
Bar2_08	E →W	4.6.1999	08:16	51.5°	87.2°
Bar1_15	N→S	4.6.1999	14:58	40.0°	13.4°
Bar2_15	E→W	4.6.1999	15:11	42.5°	80.5°

(*) HLS: Hora Local Solar

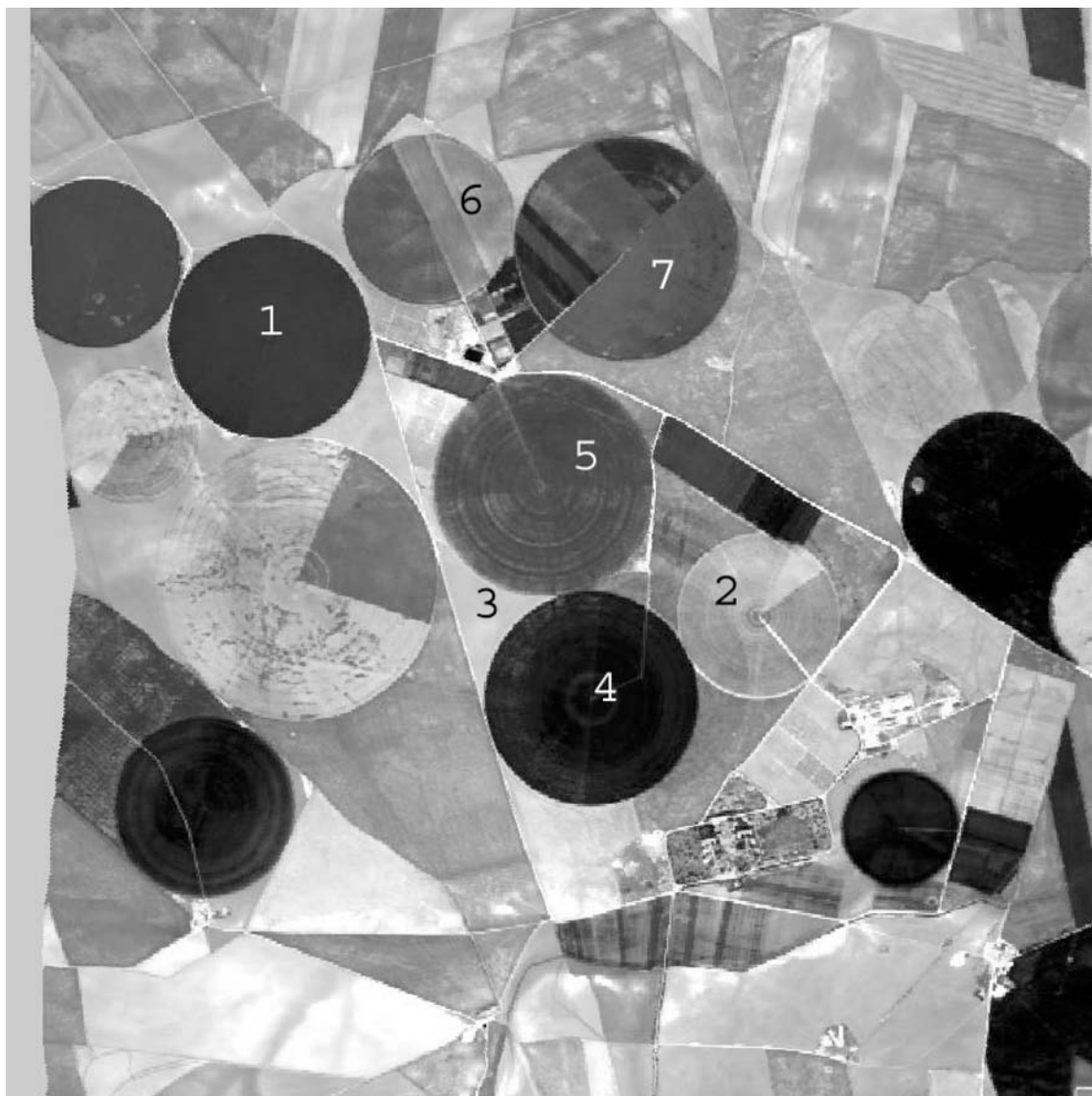
Tabla 1. Datos relevantes de los diferentes vuelos, donde θ_i es el ángulo cenital solar y Φ el acimutal relativo entre el plano de observación y el de iluminación.

El ángulo cenital solar (θ_i) viene determinado por la hora en que se efectúan las medidas. Para todos los vuelos, el ángulo solar acimutal ($\varphi_i = \Phi + \varphi_r$) está cerca de un punto cardinal, Este en los vuelos de mañana, Sur en los vuelos de medio día y Oeste en los de tarde. Las direcciones de vuelo son perpendiculares entre sí, siguiendo una trazada Norte-Sur para los vuelos Bar1 y Este-Oeste para los Bar2. Por tanto, para cada posición del sol disponemos de dos imágenes: una adquirida cerca del plano principal ($\Phi=0$) y la otra adquirida cerca del plano ortogonal ($\Phi=\pi/2$).

Zona de estudio

El área de estudio (Figura 2) se seleccionó porque presenta un paisaje plano, sin elevaciones de más de 2 m de altura, de modo que la influencia de la topografía es mínima y basta con considerar la rugosidad de la superficie introducida por la vegetación. La zona está dividida en parcelas grandes y uniformes con diferentes cultivos, lo que permiten hacer validaciones con sensores de una resolución espacial media, como es el caso del HyMap. Entre las cubiertas vegetales presentes podemos encontrar alfalfa,

puesta anisótropa de los índices de vegetación en un amplio rango de variación de los valores de éstos. De este modo, se analizaron siete parcelas que correspondían a siete valores de LAI, entre 0 (suelo desnudo) y 4.8 (cubierta vegetal densa). Las parcelas 1 y 5 son de alfalfa pero, mientras la parcela 1 tiene plantas de más de medio metro que cubren por completo el suelo y se ve como un manto verde con un LAI elevado (4.8), la alfalfa de la parcela 5 ha sido cortada y las plantas presentan una altura de aproximadamente un decímetro, quedando más del 50% del suelo sin cubrir, por lo que el LAI de esta parcela toma un valor más bajo (1.5). La parcela 2 tiene un LAI de 0.3 y en ella hay maíz distribuido en forma de hileras que se encuentra en las primeras etapas de su crecimiento, por lo que las plantas son pequeñas (miden entre uno y dos decímetros) y cubren una pequeña fracción de la superficie de cultivo, quedando el 75% del suelo desnudo. La parcela 3 es de suelo desnudo. La parcela 4, con un LAI de 1.8, tiene plantas de trigo de casi un metro de altura que ofrecen una cobertura densa y homogénea que cubre prácticamente por completo la superficie del suelo. En la parcela 6 hay remolacha, con plantas de unos diez o quince centímetros dispuestas en hileras y que cubren únicamente la mitad del terre-



*Figura 2. Imagen de la zona de estudio con indicación de las parcelas seleccionadas.

no cultivable, por lo que el LAI de esta parcela es relativamente bajo (0.7). Por último, la parcela 7 es de legumbres, con un recubrimiento total del suelo dedicado a su cultivo y con un LAI de 2.6.

Las distintas parcelas consideradas se encuentran dentro de zonas extensas dedicadas a un mismo cultivo, lo cual, permiten seleccionar regiones de estudio grandes que, como se indica en la Tabla 2, están formadas por varios miles de píxeles. Así mismo, a la hora de elegir las parcelas hemos evitado los límites con otros cultivos, las zonas en las que no se

conocieran con exactitud las características y tipos de cultivo, o aquellas parcelas que presentarían un estado de riego diferente a lo largo de los dos días que duró la campaña de medidas.

Por otra parte, como puede verse en la Figura 2, las parcelas seleccionadas están relativamente cerca las unas de las otras y se distribuyen, aproximadamente, alrededor del centro de la imagen captada por el sensor. Con ello, intentamos no alejarnos del nadir y que el ángulo cenital de observación cambie poco entre unas parcelas y otras, como se indica en la Tabla 2.

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

De este modo, podremos hacer un estudio comparativo entre las distintas parcelas minimizando la influencia del ángulo cenital de observación.

En la Tabla 2 resumimos algunas de las características de las parcelas seleccionadas: Tipo de cultivo, LAI, altura de las plantas, fracción de cobertura vegetal, fracción de suelo desnudo, rango de variación del ángulo cenital de observación dentro de cada parcela y número de píxeles que forman las

et al., 1994) y OSAVI (Rondeaux *et al.*, 1996); 3) índices corregidos atmosféricamente: GEMI (Pinty y Verstraete, 1992).

Los índices de vegetación considerados, así como la mayor parte de los índices de vegetación definidos hasta el momento, están basados en combinaciones algebraicas de valores de reflectividad en las zonas espectrales del rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), puesto que es donde se produce un mayor

Parcela	Cultivo	LAI	Altura (m)	FCV	FSD	$\Delta\theta_1$ (Bar1)	$\Delta\theta_2$ (Bar2)	Número de píxeles
1	Alfalfa	4.8	0.6-0.7	1	0	-12° a -19.3°	-8.7° a 15.4°	6631
2	Maíz-5 hojas	0.3	0.12-0.2	0.25	0.75	+7.9° a +14.7°	+0.3° a +6.6°	3660
3	Suelo desnudo	0	0	0	1	-2.2° a 5.8°	+0.5° a +6.1°	1554
4	Trigo	1.8	0.7-0.85	0.97	0.03	2.1° a +6.3°	+3.8° a +12.1°	9485
5	Alfalfa cortada	1.5	-	0.79	0.21	4° a +4.4°	0.2° a -7.9°	9113
6	Remolacha	0.7	0.1-0.15	0.49	0.51	3.4° a -7.5°	-16° a -21.3°	2057
7	Legumbres	2.6	-	1	0	+1.3° a +9.3°	-11.8° a -19.3°	4687

Tabla 2. Características de las parcelas estudiadas: Tipo de cultivo, LAI, altura de las plantas, Fracción de Cobertura Vegetal (FCV), Fracción de Suelo Desnudo (FSD), rango de variación del ángulo cenital de observación dentro de cada parcela en las trazadas Norte-Sur ($\Delta\theta_1$ (Bar 1)) y Este-Oeste ($\Delta\theta_2$ (Bar 2)), y número de píxeles de cada parcela.

parcelas. (Fuente: medidas in-situ realizadas por el IDR (García *et al.*, 2001) y medidas desde avión por el DLR (Richter, 2001)).

Índices de Vegetación estudiados

Entre el gran número de índices de vegetación espectrales publicados hasta el momento (Bannari *et al.*, 1995), hemos seleccionado algunos de los que aparecen con mayor frecuencia en la literatura. En la Tabla 3 presentamos una relación de los índices de vegetación estudiados en el presente trabajo. Estos índices, siguiendo el criterio de clasificación propuesto por Rondeaux *et al.* (1996), los hemos agrupado en tres categorías: 1) Índices intrínsecos que se basan en las medidas de reflectividad espectral sin considerar ningún otro parámetro externo: RVI (Pearson y Miller, 1972), NDVI (Rouse *et al.*, 1974); 2) índices que utilizan la línea de suelo (la cual será definida más adelante): PVI (Jackson *et al.*, 1980), SAVI (Huete, 1988), TSAVI (Baret y Guyot, 1991), MSAVI (Qi

contraste espectral entre la signatura espectral del suelo y de la vegetación. Las reflectividades en el infrarrojo cercano y en el visible de los suelos desnudos presentan generalmente una relación lineal de acuerdo con la ecuación , que denominamos *línea del suelo* y donde *a* y *b* son, respectivamente, la pendiente y la ordenada en el origen de la misma (Baret *et al.*, 1993).

Metodología para calcular los índices de vegetación

En primer lugar, a partir de cada una de las imágenes hiper-espectrales HyMap de las que se dispone (seis en total) se generan dos canales (rojo e infrarrojo cercano) de banda ancha. A continuación, se determinan los valores medios de reflectividad en el rojo y en el infrarrojo de las distintas parcelas seleccionadas. Así mismo, a partir de los valores de reflectividad de los píxeles de suelo en estas bandas espectrales se obtiene la línea de suelo del problema. Finalmente, con los valores de reflectividad y

Índices de vegetación		Definición	Autor y año
Índices intrínsecos	Ratio Vegetation Index	$RVI = \frac{IRC}{R}$	Pearson & Miller, 1972
	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)}$	Rouse et al., 1974
Índice que utilizan la línea de suelo	Perpendicular Vegetation Index*	$PVI = \frac{(IRC - aR - b)}{\sqrt{a^2 + 1}}$	Jackson et al., 1980
	Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R + L)}(1 + L)$ $L = 0.5$	Huete, 1988
	Transformed SAVI*	$TSAVI = \frac{[a(IRC - aR - b)]}{(R + aIRC - ab) + X(1 + a^2)}$ $X = 0.08$	Barcl & Guyot, 1991
	Modified SAVI	$MSAVI = \frac{2IRC + 1 - \sqrt{(2IRC + 1)^2 - 8(IRC - R)}}{2}$	Qi et al., 1994
	Optimized SAVI	$OSAVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R + Y)}$ $Y = 0.16$	Rondeaux et al., 1996
Índices corregidos atmosféricamente	Global Environment Monitoring Index	$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - \frac{(R - 0.125)}{(1 - R)}$ $\eta = \frac{[2(IRC^2 - R^2) + 1.5IRC + 0.5R]}{(IRC + R + 0.5)}$	Pinty & Verstraete, 1992

(*) 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 3. Índices de vegetación estudiados en el presente trabajo.

los parámetros de la línea de suelo, se calculan los valores que toman los índices de vegetación estudiados (véase Tabla 3) en las distintas parcelas de cultivo seleccionadas (véase Figura 2) y para las diferentes condiciones geométricas de observación e iluminación. Dadas las seis configuraciones de medida distintas (véase Tabla 1), cada índice toma seis valores diferentes para una misma parcela.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo de la línea de suelo

En la determinación de la línea de suelo (Baret *et al.*, 1993) nos cuestionamos, en primer lugar, la posible dependencia de ésta frente a las condiciones de observación e iluminación. Y, en este sentido, nos planteamos la conveniencia de tomar una línea de suelo única o adoptar, por el contrario, una línea de suelo diferente en cada situación de medida. En principio, cabe esperar que, efectivamente, la línea de suelo cambie con la configuración de observación e iluminación de la medida, dado el comportamiento no lambertiano de las superficies que se traduce en una respuesta anisótropa de la reflectividad. Sin embargo y, por otra parte, dado que el área de estudio es bastante homogénea en cuanto al relieve o rugosidad y tipos de suelo, es previsible que la influencia de la geometría en la línea de suelo no sea demasiado importante.

Para comprobar en que medida la geometría de adquisición afecta a los parámetros de la línea de suelo, se ha realizado, por separado, el cálculo de la línea en cada una de las distintas situación de medida. La metodología que hemos seguido para determinar la ecuación de estas líneas de suelo “específicas” a la geometría de medida se basa en el NDVI para discriminar los píxeles de suelo en cada una de las imágenes adquiridas bajo las diferentes geometrías de observación e iluminación. Para ello, se ha de elegir un valor umbral de NDVI por debajo del cual se considera que no hay vegetación. Este valor umbral varía según la geometría de adquisición y en cada imagen se toma el valor que defina mejor los puntos de suelo. De este modo, para cada una de las seis configuraciones de observación y de iluminación diferentes en que se efectúan las medidas se ha determinado la línea de suelo “específica” a partir de los valores de reflectividad en el R e IRC de los píxeles de suelo desnudo seleccionados en cada

imagen. En la Figura 3 presentamos, a modo de ejemplo, para la imagen Bar1_12: (i) una representación de la línea de suelo así como los puntos considerados como suelo y que intervienen en su cálculo; (ii) una representación conjunta de la línea de suelo y del triángulo de reflectividades de toda la escena. Por otra parte, también se ha calculado la línea de suelo “global” a partir de los valores de reflectividad de aquellos píxeles que han sido considerado como suelo en todas las configuraciones de medida y que han intervenido en el cálculo de todas las líneas de suelo específicas.

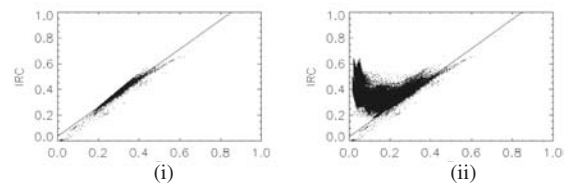


Figura 3. Imagen Bar1_12: (i) los píxeles seleccionados como suelo y la línea de suelo; (ii) el triángulo de reflectividades (todos los píxeles de la imagen) y la línea de suelo.

Los parámetros de la línea de suelo “global” no difieren de manera significativa de los correspondientes parámetros obtenidos en las diferentes líneas de suelo “específicas”, como puede verse en la Tabla 4 donde se presenta la pendiente y la ordenada en el origen de cada una de las líneas de suelo calculadas.

Nombre	a	b
LS Bar1_9	1.23	$1.35 \cdot 10^{-1}$
LS Bar1_12	1.14	$3.31 \cdot 10^{-2}$
LS Bar1_15	1.23	$1.29 \cdot 10^{-1}$
LS Bar2_9	1.17	$2.33 \cdot 10^{-2}$
LS Bar2_12	1.17	$2.39 \cdot 10^{-2}$
LS Bar2_15	1.16	$2.87 \cdot 10^{-1}$
LS global	1.16	$2.41 \cdot 10^{-2}$

Tabla 4. Pendiente (a) y ordenada en el origen (b) de las líneas de suelo calculadas.

Así mismo, podemos evaluar el error cuadrático medio (RMSE) que se comete al utilizar una única línea de suelo “global” en lugar de diferentes líneas de suelo “específicas” (Tabla 5). El RMSE se ha determinado calculando, a partir de una serie de valores dados de reflectividad en el rojo, los valores de reflectividad en el infrarrojo estimados mediante las distintas ecuaciones de la línea de suelo calculadas. De este modo, comparando los valores estimados mediante la ecuación “global” de la línea

LS específica	RMSE
LS b1_9	$3.17 \cdot 10^{-2}$
LS b1_12	$0.59 \cdot 10^{-2}$
LS b1_15	$3.11 \cdot 10^{-1}$
LS b2_9	$0.51 \cdot 10^{-2}$
LS b2_12	$0.56 \cdot 10^{-2}$
LS b2_15	$0.46 \cdot 10^{-1}$

Tabla 5. Error cuadrático medio por considerar una línea de suelo “global” en lugar de diferentes líneas de suelo “específicas” según la geometría de observación e iluminación en que se adquiere la medida.

de suelo con los valores que se obtienen con las distintas líneas “específicas” se cuantifica el RMSE en cada caso.

Por tanto, como muestran los resultados expresados en las tablas 4 y 5, puede establecerse una línea de suelo única, válida para todas las situaciones de medida, sin necesidad de utilizar una línea de suelo diferente para cada configuración de observación e iluminación específica. La línea de suelo con el error de dispersión asociado a su pendiente y su ordenada en el origen queda definida por la ecuación: $IRC = (1.16 \pm 0.02) \cdot R + (0.024 \pm 0.003)$.

“Triángulo de reflectividades” de los datos experimentales considerados en el trabajo

En la Figura 4 representamos conjuntamente, en el plano de reflectividades R-IRC, la línea de suelo y los valores medios de la reflectividad medida en las diferentes superficies de estudio en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano. En esta gráfica se marcan los puntos que corresponden a una misma parcela (LAI idéntico) con el mismo símbolo, aunque estén asociados a configuraciones de medida distintas, es decir, que hayan sido adquiridos bajo una geometría de observación e iluminación diferente. De este modo, para cada parcela aparecen señalados seis puntos, dadas las seis geometrías de adquisición de los datos experimentales (véase Tabla 1). Conviene matizar que esta representación no es exactamente un *triángulo de reflectividades* en el sentido más tradicional con que se emplea este término. En el triángulo de reflectividades “tradicional” varían las propiedades ópticas del suelo sobre el que se asientan los puntos con igual cantidad de vegetación, mientras que en nuestro caso se mantiene el suelo y las medidas se efectúan, exactamente, sobre la misma cubierta vegetal, siendo la geometría de adquisición lo que varía.

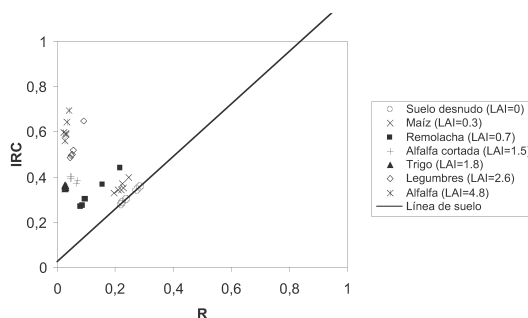


Figura 4. “Triángulo de reflectividades”, con la correspondiente línea de suelo, de los datos experimentales considerados en el trabajo.

En la gráfica de la Figura 4 se observa que los puntos se distribuyen siguiendo una pauta de comportamiento general en todo este tipo de representaciones. A medida que crece la vegetación (LAI en aumento) los puntos se separan de la línea de suelo en sentido ascendente y hacia la izquierda; disminuye la reflectividad en el rojo y aumenta en el infrarrojo cercano. Por lo tanto, los puntos que representan una cubierta vegetal en el plano de reflectividades tienen una distancia de separación a la línea de suelo que es proporcional a la cantidad de vegetación.

Por otra parte, la geometría de observación e iluminación introduce una variabilidad en los valores de reflectividad medidos en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano para un mismo LAI. Así, en la Figura 4 podemos atribuir a la anisotropía de la reflectividad las siguientes características:

- Para valores bajos de LAI la reflectividad medida en las diferentes geometrías de observación e iluminación presenta una mayor variabilidad en la banda del rojo, mientras que para valores altos del LAI cambia sobre todo en el infrarrojo cercano.

- Si trazáramos líneas que conectaran los puntos con idéntico valor de LAI (*isolíneas de vegetación*) se comprobaría que las mismas son aproximadamente paralelas a la línea del suelo para valores del LAI menores a 1.5 y dejan de estar alineadas con ésta para valores mayores del LAI. Además, estas *isolíneas* son convergentes casi al origen para valores altos del LAI.

- Para las distintas parcelas, el máximo de reflectividad corresponde a las doce del mediodía y cuando la observación se realiza en el plano principal, coincidiendo con la geometría del *hot spot*. En estas condiciones de medida, cuando la dirección de observación y la de iluminación coinciden la cantidad de sombras que recoge el sensor es mínima y se

observa una banda brillante que cruza la imagen, con valores de reflectividad muy altos comparados con la reflectividad que estos mismos píxeles ofrecen en las otras geometrías de adquisición. El efecto *hot spot* afecta especialmente a las parcelas de alfalfa, remolacha y legumbres por las que cruza esta banda brillante. Es por ello, que en estas tres parcelas se observa un punto separado del resto y que representa valores de reflectividad más altos.

Anisotropía de los índices de vegetación en función del LAI

En las gráficas de la Figura 5 representamos en función del LAI los valores que algunos de los índices de vegetación analizados toman en las diferentes condiciones geométricas de iluminación y de observación. En concreto, las gráficas que presentamos corresponden al NDVI, GEMI, SAVI y PVI. Para cada valor del LAI, en estas gráficas se representan seis puntos que corresponden a los valores que presentan los índices en cada una de las seis

configuraciones geométricas de adquisición de la medida (véase Tabla 1).

Los índices de vegetación (IV) analizados presentan en todos los casos una dependencia exponencial con respecto al LAI. Podemos ajustar los índices a una ecuación del tipo $IV = A - B \cdot \exp(-C \cdot LAI)$, en donde A representa el valor del índice cuando el $LAI \rightarrow \infty$, 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 (Gilabert *et al.*, 1996). En las gráficas de la Figura 5 podemos ver el resultado del ajuste de los índices: NDVI, GEMI, SAVI y PVI a la ecuación $IV = A - B \cdot \exp(-C \cdot LAI)$ y, en la Tabla 6 presentamos los valores que toman los coeficientes de esta ecuación en cada caso.

El diferente comportamiento que presentan los índices representados en la Figura 5 se debe a que mientras algunos, como el NDVI, alcanzan la saturación dentro del rango de valores estudiados, otros, como el PVI, no lo hacen y presentan una relación aproximadamente lineal con respecto al LAI. Por

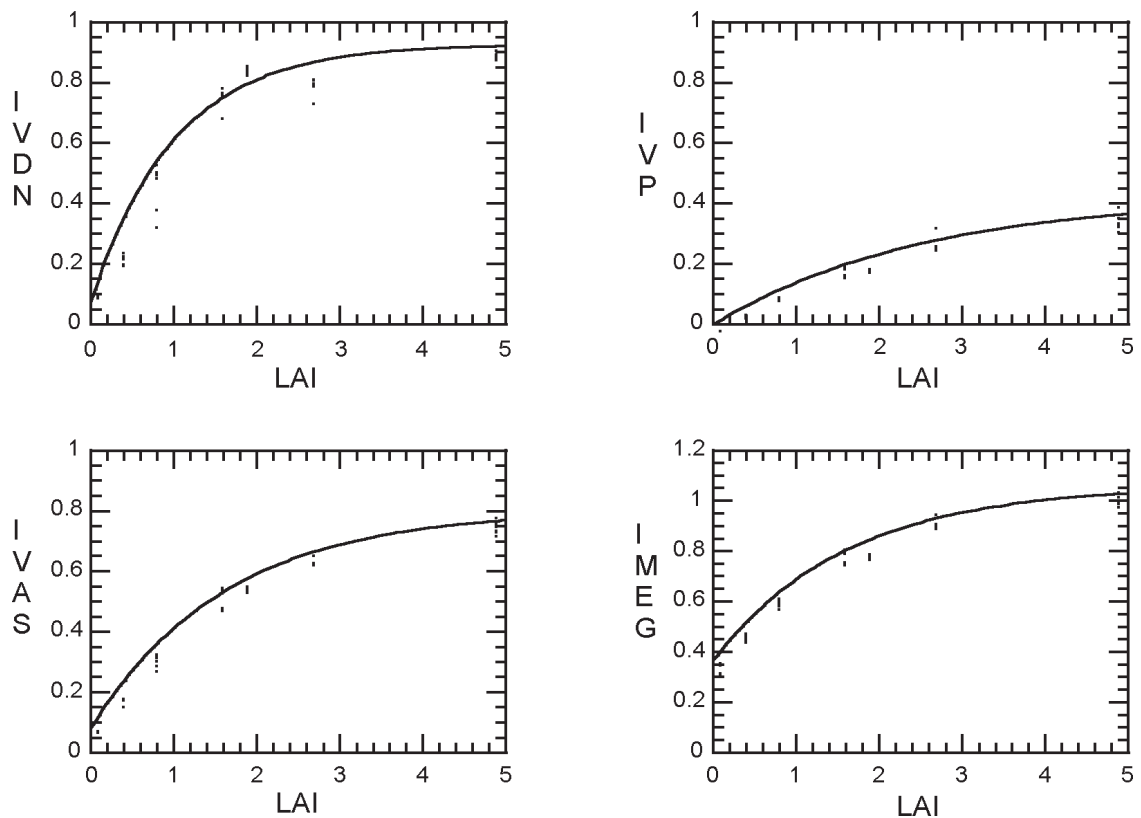


Figura 5. Representación en función del LAI de los valores que toman los índices NDVI, GEMI, SAVI y PVI en las diferentes configuraciones de medida, ajustados a una ecuación del tipo $IV = A - B \cdot \exp(-C \cdot LAI)$.

$IV = A - B \cdot \exp(-C \cdot LAI)$				
	NDVI	GEMI	PVI	SAVI
A	0.93 ± 0.02	1.06 ± 0.01	0.43 ± 0.02	0.80 ± 0.01
B	0.85 ± 0.03	0.70 ± 0.01	0.43 ± 0.02	0.72 ± 0.01
C	0.99 ± 0.09	0.62 ± 0.03	0.39 ± 0.04	0.62 ± 0.03
Chisq	0.14	0.02	0.01	0.02
R ²	0.96	0.99	0.98	0.99

Tabla 6. Ajuste de los índices NDVI, GEMI, SAVI y PVI a la ecuación exponencial $IV = A - B \cdot \exp(-C \cdot LAI)$.

otra parte, este comportamiento lineal que presenta el PVI se manifiesta también en todos los demás índices cuando el LAI es menor a 1.5.

La anisotropía de los índices de vegetación se manifiesta con la variabilidad que presentan los valores de éstos cuando se efectúa la medida bajo geometrías de observación y de iluminación diferentes. Así, la anisotropía no rompe la tendencia exponencial genérica que siguen los índices pero introduce una variabilidad dentro de ella. En las distribuciones de puntos representadas en la Figura 5 vemos que esta variabilidad afecta principalmente a los valores de los índices evaluados en cubiertas con LAI bajos. Evidentemente, cuanto mayor sea la dispersión que presenten los valores calculados para un mismo LAI, mayor será la dependencia del índice de vegetación representado con la geometría de adquisición.

La anisotropía de los índices de vegetación constituye una fuente de error en la estimación a partir de éstos de parámetros de la cubierta vegetal, como el LAI. Así por ejemplo, si analizamos con detalle la gráfica del NDVI de la Figura 5, observamos que para la parcela de remolacha con un LAI de 0.7, el índice presenta valores muy dispares que varían entre 0.34 y 0.55 según sea la configuración geométrica en que se efectúa la medida. Esta fuerte dependencia del NDVI con la geometría del problema supondría, en el caso que no se conociera el LAI de la parcela de remolacha y pretendiéramos estimarlo a partir del valor del índice de acuerdo con la ecuación $NDVI = 0.93 - 0.85 \cdot \exp(-0.99 \cdot LAI)$, variaciones en el LAI estimado entre 0.36 y 0.81. De este modo, sin entrar en consideraciones en la región de saturación donde el índice deja de ser operativo, se pone de manifiesto que la variabilidad introducida en los índices de vegetación por influencia de la anisotropía supone fuertes desviaciones en la estimación del LAI.

Se puede cuantificar la dependencia de los índices de vegetación con la geometría de observación e iluminación a partir de la dispersión que presentan sus valores calculados para una misma parcela

en las distintas configuraciones de adquisición. En la Tabla 7 se muestra esta dispersión en tanto por cien para cada índice y en las distintas parcelas seleccionadas.

En vista de los resultados expresados en la Tabla 7 y en relación a la anisotropía que manifiestan, en función del LAI, los distintos índices de vegetación analizados pueden hacerse las siguientes consideraciones:

- La dependencia de los índices de vegetación frente a las geometrías de observación e iluminación, como ya se ha mencionado, es mayor en cultivos con LAI bajo (maíz, remolacha y alfalfa cortada), siendo menor en los extremos, suelo desnudo y cubierta continua.

- Si nos interesa estimar un parámetro biofísico como el LAI a partir de medidas radiométricas con independencia de las geometrías de observación e iluminación, entre los índices analizados el que se muestra más efectivo es el GEMI, dado que presenta los valores de dispersión más bajos entre los puntos correspondientes a las distintas condiciones de medida para un valor de LAI dado.

- Por el contrario, el RVI, el NDVI y el PVI presentan para cualquier valor del LAI una gran sensibilidad a la configuración geométrica de medida. Pero, mientras el RVI y el PVI presentan una fuerte anisotropía para cualquier valor del LAI y también para valores altos de este, el NDVI se satura y para valores del LAI altos no se ve tan influenciado por los ángulos de observación e iluminación.

- El SAVI, OSAVI y MSAVI tienen un comportamiento muy similar y presentan unos valores muy parecidos. Entre el SAVI y el MSAVI las diferencias son mínimas. El OSAVI respecto al SAVI reduce ligeramente la anisotropía para valores altos del LAI, pero presenta una mayor dependencia frente a la geometría de observación e iluminación para valores bajos del LAI.

- El TSAVI, que recordemos introduce en su definición de manera explícita los parámetros de la línea de suelo, respecto al resto de índices de la

LAI	Cultivo	RVI	NDVI	SAVI	OSAVI	MSAVI	GEMI	PVI	TSAVI
0	Suelo desnudo	2.3	9.8	5.5	6.2	7.4	12.8		—
0.3	Maíz	8.7	17.5	14.1	15.0	15.9	7.7	26.0	26.7
0.7	Remolacha	48.4	43.4	17.3	29.1	14.5	7.3	12.4	38.3
1.5	Alfalfa cortada	44.9	13.2	14.3	13.7	18.4	8.0	18.7	17.5
1.8	Trigo	24.2	3.6	3.5	3.3	5.1	2.7	5.4	4.8
2.6	Legumbres	37.8	9.6	4.9	3.3	1.5	5.7	26.0	3.6
4.8	Alfalfa	36.2	3.3	7.9	2.5	4.1	5.7	23.1	2.5
Valores medios		28.9	14.3	9.7	10.5	9.6	7.1	18.6	15.6

Tabla 7. Dispersión (%) entre los valores de los índices de vegetación calculados bajo diferentes geometrías de observación y de iluminación en una misma cubierta con un determinado LAI, y valor medio de estas dispersiones para cada índice.

familia del SAVI presenta, prácticamente para cualquier LAI, una mayor dispersión entre los valores medidos sobre una misma parcela en condiciones de medida diferentes, es decir, es más sensible a la geometría de adquisición.

Índices de vegetación en función del ángulo solar cenital

En las gráficas de la Figura 6 representamos los valores de los índices NDVI, SAVI y GEMI en función del ángulo cenital solar. Las líneas continuas conectan los valores que, para una determinada parcela, toman los índices cuando la observación se efectúa en el plano principal, mientras que las líneas discontinuas indican la tendencia que siguen los índices en el plano ortogonal. Además, los valores que toman los índices en cada una de las distintas parcelas se marcan con tramas diferentes.

Respecto a la dependencia angular de los índices de vegetación, en las gráficas de la Figura 6 se observa:

– No se puede establecer una relación constante y para todo el intervalo de valores de LAI entre la hora en que se efectúan las medidas y el valor del índice. No obstante, la mayoría de las curvas representadas

presentan una ligera pendiente positiva, es decir, los valores de los índices de vegetación aumentan con el ángulo cenital solar. Esta tendencia positiva se aprecia mejor en las parcelas de remolacha (LAI=0.7) y de alfalfa cortada (LAI=1.5) en las que, como hemos visto, la dispersión entre los valores de los índices es mayor. Este era un resultado esperado ya que, como se ha explicado, cuando aumenta el ángulo cenital solar la reflectividad disminuye en el visible y aumenta en el infrarrojo cercano, dado que aumenta el gradiente de intercepción y el suelo recibe menos iluminación (Kimes, 1983).

– En la parcela de remolacha se observa, además, que los índices de vegetación presentan un valor mínimo en el plano principal cuando el ángulo cenital solar vale 17.6°. Este mínimo en los índices se corresponde con la localización del máximo del *hot spot* en la reflectividad, y se debe al mayor efecto del *hot spot* en el rojo que en el infrarrojo próximo.

– En la mayoría de las parcelas analizadas y salvo en la geometría del *hot spot*, no se aprecian diferencias significativas en el comportamiento de los índices en el plano principal y el plano ortogonal. Esta característica en la respuesta de los índices también era de prever dado la observación en estos dos planos resulta muy similar cuando las medidas, como es el caso, se efectúan cerca del nadir.

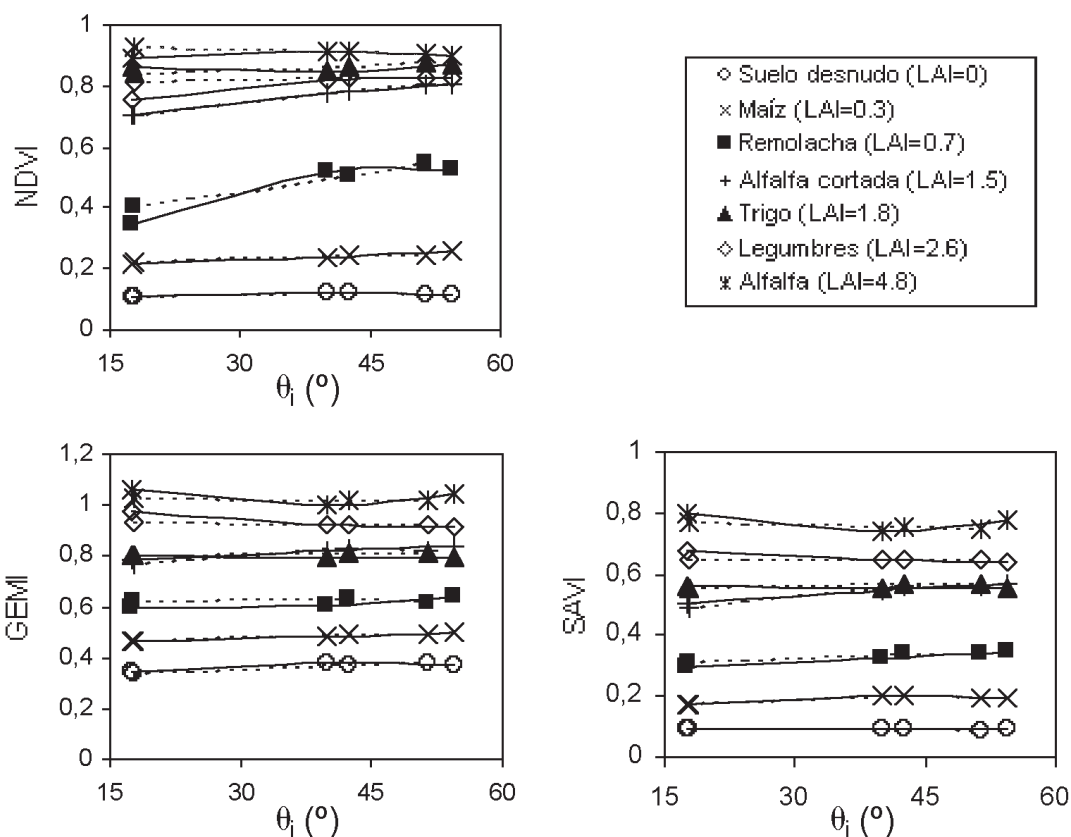


Figura 6. Valores del NDVI, SAVI y GEMI en función del ángulo cenital solar en las diferentes parcelas seleccionadas. Conectamos con una línea continua los valores que, para una determinada parcela, toman los índices cuando la observación se efectúa en el plano principal y señalamos con una línea discontinua la tendencia que siguen los índices en el plano ortogonal.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos realizado un estudio comparativo sobre la sensibilidad que presentan algunos de los índices de vegetación más utilizados con el ángulo cenital solar. Se han calculado los índices con medidas realizadas en el plano de observación principal y en el plano ortogonal en una observación próxima al nadir. El análisis de la dependencia que presentan los índices de vegetación con el ángulo cenital solar resulta interesante cuando se comparan cubiertas vegetales que se encuentran en diferentes latitudes y en estudios sobre cambios estacionales de la vegetación, ya que en estos casos la altura solar cambia de manera sistemática entre las diferentes medidas.

Como paso previo al análisis de estos índices, hemos realizado el cálculo de la línea de suelo a partir de la cual se definen la mayor parte de los

índices de vegetación que conforman nuestra selección. Así mismo, hemos estudiado la anisotropía que manifiestan los valores experimentales de la reflectividad en el rojo y en el infrarrojo cercano con que se calculan estos índices.

El estudio se ha realizado con datos hiper-espectrales del sensor de gran campo de visión HyMap adquiridos mediante vuelos de avión en la campaña DAISEX-99 sobre el área de Barrax. Los vuelos se realizan a tres horas del día distintas y siguiendo dos trazadas diferentes, lo cual permite captar imágenes bajo condiciones de iluminación y de observación variables. Sobre el área de estudio se seleccionaron siete parcelas con cultivos y LAI diferentes para hacer el estudio de la respuesta anisotrópica de los índices en un amplio rango de variación de sus valores.

Dada la gran variedad de cultivos estudiados y de índices comparados, resulta difícil hacer un análisis general y fehaciente de la sensibilidad de los índi-

ces de vegetación frente a las condiciones de observación e iluminación. Los resultados obtenidos no llevan a conclusiones del todo determinantes respecto a la caracterización de la anisotropía de los índices de vegetación, puesto que lo que parece ser una pauta de comportamiento en la respuesta angular de algunos índices no lo es en otros y lo que para un mismo índice se cumple en unas determinadas parcelas no lo hace en otras. Ahora bien, podemos destacar los siguientes aspectos importantes:

– Puede establecerse una línea de suelo única, válida para todas las situaciones de medida, sin necesidad de utilizar una línea de suelo diferente para cada configuración de observación e iluminación específica.

– Los índices de vegetación analizados presentan en todos los casos una dependencia exponencial con respecto al LAI que podemos ajustar a una ecuación del tipo $IV = A - B \cdot \exp(-C \cdot LAI)$.

– La anisotropía no rompe la tendencia exponencial genérica que siguen los índices de vegetación pero introduce una variabilidad dentro de ella.

– La anisotropía de los índices de vegetación constituye una fuente de error en la estimación a partir de éstos de parámetros de la cubierta vegetal, como el LAI.

– La dependencia de los índices de vegetación analizados frente a las geometrías de observación e iluminación es más acusada en cubiertas con LAI bajo siendo más suave en los extremos, suelo desnudo y cubierta continua.

– Entre los distintos índices analizados, el GEMI es el que resulta más efectivo para estimar la vegetación con independencia de la configuración angular de medida, dado que presenta una menor dispersión media entre los valores que, para un mismo cultivo, toma en las diferentes condiciones de la geometría de observación e iluminación. Así, esta dispersión media es del orden del 7% para el GEMI, aproximadamente de un 30% para el RVI y de un 10% para los índices de la familia del SAVI salvo para el TSAVI que, al igual que para el PVI y el NDVI, toma un valor próximo al 15%.

– En las parcelas más densas con valores altos de LAI, donde los efectos de la anisotropía son menos acusados, los índices de vegetación estudiados son poco sensibles a los cambios en el ángulo cenital solar. Sin embargo, en las parcelas con valores de LAI bajos, donde la anisotropía es mayor, se observa que el valor de los índices de vegetación aumenta con el ángulo cenital solar.

– En la mayoría de los casos, salvo en la geometría del *hot spot*, no se aprecian diferencias significativas, en observación próxima al nadir, entre los valores que toman estos índices cuando las medidas se adquieren en el plano principal o en el plano ortogonal.

Por último, cabe decir que las conclusiones aportadas solo son válidas para el tipo de cubiertas vegetales analizadas (cultivos) y en las condiciones de observación en que se han efectuado las medidas (observación próxima al nadir). Estas conclusiones no se pueden generalizar hasta que se amplíe el estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la beca de colaboración concedida por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a Aleixandre Vercher en el curso académico 2001-2002. Así mismo, debemos dar gracias a los proyectos: 'DAISEX-99' (ESA), 'Evaluación por teledetección de la incidencia de los cambios de la cubierta vegetal del suelo en los flujos de agua y energía' (CICYT, CLI99-0793) y 'Procedimientos de alerta y seguimiento de la desertificación en España (HISPASED)' (CICYT, REN2000-1507-C0E-02 GLO).

BIBLIOGRAFÍA

- BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F. y HUETE, A. R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*. 13: 95-120.
- 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., JACQUEMOUD, S. y HANOCQ, J. F. 1993. The Soil Line Concept in Remote Sensing. *Remote Sensing Reviews*. 7: 65-82.
- CAMACHO-DE COCA, F., GILABERT, M. A. y MELIÁ, J. 2001. Bidirectional Reflectance Factor Análisis from Field Radiometry and HyMap data. *Proceedings of the Final Results Workshop on DAISEX (Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment)*, ESA SP-499. pp. 163-175. ESA Pub., ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Ed. M. Wooding / R.A. Harris, 288 pages.
- CAMACHO-DE COCA, F., GARCÍA-HARO, J., GILABERT, M. A. y MELIÁ, J. 2002a. La aniso-

- tropía del BRDF: Una nueva signatura de las cubiertas vegetales. *Revista de Teledetección* (en prensa).
- CAMACHO-DE COCA, F., LEROY, M., GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P. and GARCÍA-HARO, F. J. 2002b. Measured Hot Spot Directional Signatures of Agricultural Crops during DAISEX'99. *Proceeding of the 1st International symposium on "Recent advances in quantitative remote sensing"*, Valencia, 16-20 September 2002 (in press).
- DEERING D. W., ECK, T. F. y BANERJEE, B. 1999. Characterization of the Reflectance anisotropy of Three Boreal Forest Canopies in Spring-Summer. *Remote Sensing of Environment*. 67: 205-229.
- GARCÍA J. C., CUÑAT C., MONTERO F., BRASA A., ALONSO L., GONZÁLEZ M.C., RUÍZ J.R., MARTÍNEZ C., PALACIOS A. y MORENO, J. 2001. Vegetation and soil measurements at Barrax. *Proceedings of the Final Results Workshop on DAISEX (Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment)*, ESA SP-499. pg. 79-87. ESA Pub., ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Ed. M. Wooding / R.A. Harris, 288 pages.
- GILABERT, M. A., GANDÍA, S. y MELIÁ, J. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*. 55:11-20.
- GILABERT, M.A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. y GARCÍA-HARO, J. 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección*, 8:35-45.
- HAUSOLD, A. 2001. Geocoding Methodology for Imaging Spectrometer Data. . *Proceedings of the Final Results Workshop on DAISEX (Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment)*, ESA SP-499. pg. 91-96. ESA Pub., ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Ed. M. Wooding / R.A. Harris, 288 pages.
- HUETE, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
- JACKSON, R. D., PINTER, P. J., PAUL, J., REGINATO, R. J., ROBERT, J. y IDSO, S.B. 1980. Hand-held radiometry. Agricultural Reviews and Manuals ARM-W-19. Oakland, California: U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- KIMES, D. S. 1983. Dynamics of Directional Reflectance Factor Distributions for Vegetation Canopies. *Applied Optics*. 22 (9): 1364-1372.
- MELIÁ, J., GANDÍA, S. y CASELLES, V. 1986. Teledetección y signaturas espectrales. *Revista Académica de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol LXXX, pp. 177-185.
- MORENO, J., CALERA, A., CASELLES, V., CINEROS, J. M., MARTÍNEZ-LOZANO, J. A., MELIÁ, J., MONTERO, F. y SOBRINO, J. 2001. The measurement programme at Barrax. *Proceedings of the Final Results Workshop on DAISEX (Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment)*, ESA SP-499. pp. 43-51. ESA Pub., ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Ed. M. Wooding / R.A. Harris, 288 pages.
- NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C., HSIA, J. J., GINSBERG, I. W., y LIMPERIS, F. 1977. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. National Bureau of Standards. NBS. Monograph 160.
- PEARSON, R. L. y MILLER, L.D. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment II*:1355-1379.
- PINTY, B. y VERSTRAETE M. M. 1992. GEMI: a non linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*. 101: 15-20.
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR, Y. H. y SOROOSHIAN, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 47: 1-25.
- RICHTER, R. 2001. Atmospheric Correction Methodology for Imaging Spectrometer Data. *Proceedings of the Final Results Workshop on DAISEX (Digital Airborne Imaging Spectrometer Experiment)*, ESA SP-499. pg. 97-109. ESA Pub., ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Ed. M. Wooding / R.A. Harris, 288 pages.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M. y BARET, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55: 95-107.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. W., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. y HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report*, Greenbelt, MD, USA.
- SANDMEIER, S., MÜLLER, C., HOSGOOD, B. y ANDREOLI, G. 1998. Physical mechanisms in Hyperspectral BRDF Data of Grass and Watercress. *Remote Sensing of Environment*. 66: 222-223.

NOTICIAS

LIBRO: RECENT ADVANCES IN QUANTITATIVE REMOTE SENSING, Editor: José A. Sobrino, Servicio Publicaciones Universitat de Valencia, ISBN: 84-370-5515-6, 1000 pp.

Este libro contiene las comunicaciones al primer congreso Internacional Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, organizado por la Unidad de Cambio Global de la Universitat de Valencia, que se celebró en el Auditorio de Torrent (VALENCIA), durante los días 16 al 20 de Septiembre del 2002. El congreso reunió a más de 200 congresistas de un total de 25 países. El alto nivel científico de los asistentes queda claramente reflejado en la publicación. El libro incluye un total de 133 trabajos repartidos en 5 temas: Espectro solar, Sinergia, Infrarrojo Térmico, Microondas, Proyectos recientes y Misiones de Observación de la Tierra. El carácter puntero de los trabajos publicados será sin duda de gran utilidad para la comunidad científica tanto nacional como internacional en teledetección.

Aquellos interesados en adquirir el libro contactar con el Servicio de Publicacions de la Universitat de Valencia (Tf: 96 3864115, e-mail: publicacions@uv.es).
