

## Seguimiento del maíz por radiometría de campo en la zona experimental EFEDA. El NDVI como indicador del crecimiento

M.A. Gilabert<sup>1</sup>; J.A. Campos<sup>2</sup>; M.T. Younis<sup>1</sup>; J. Meliá<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Departament de Termodinàmica, Facultat de Física*  
Universitat de València

<sup>2</sup> *Cátedra de Biología, EUIT Agrícola*  
Ciudad Real

### RESUMEN

Se ha realizado un seguimiento de las características espectrales del maíz a lo largo de su ciclo fenológico mediante la medida en el campo del factor de reflectividad bidireccional entre 400 y 2500 nm. Se ha analizado la dispersión que presentan las medidas en función de las características intrínsecas a la propia cubierta vegetal y en función de las condiciones de iluminación. Este último factor queda atenuado mediante la utilización del NDVI. Los valores de NDVI presentan una clara correlación con el índice de superficie foliar (LAI) y con la biomasa, que se han tomado como indicadores agronómico del crecimiento del cultivo. En concreto, en el espacio de fases NDVI/LAI, el ciclo fenológico del maíz presenta un comportamiento parecido a un ciclo de histéresis, con una rama correspondiente al periodo de crecimiento del cultivo donde se produce una saturación del índice para valores altos del LAI.

### ABSTRACT

Field measurements of canopy reflectance (400 to 2500 nm) at different stages of the crop are discussed on the basis on two groups of parameters. The first one includes canopy characteristics such as vegetation gaps, leaf area index (LAI) and biomass. The second group concerns external factors such as sun position. NDVI data have been analyzed as a function of LAI and biomass in order to document the phenological evolution of the corn. One of the results shows that there is an obvious tendency for the NDVI to reach a plateau at very high LAI levels (middle of August). This temporary saturation disappears with the subsequent development of the vegetative structure, looking almost like an hysteresis cycle for the NDVI as a function of the LAI.

### Introducción

El Proyecto EFEDA (ECHIVAL Field Experiment in a Desertification- threatened Area), financiado por la Comunidad Europea, se puede enmarcar dentro del estudio de las interacciones climáticas e hidrológicas entre la atmósfera y la superficie te-

restre (López-Baeza et al., 1994). En este contexto, la cubierta vegetal del suelo desempeña un papel primordial y es, por lo tanto, uno de los principales factores a tener en cuenta en modelos climáticos e hidrológicos. La teledetección desde plataformas espaciales ofrece la posibilidad de estudiar esta cubierta vegetal, tanto en lo que se refiere a su distribución espacial como a su desarrollo temporal. No obstante, un primer paso en el proceso de realizar seguimientos desde satélite consiste en la caracterización espectral de las superficies a nivel del suelo, estudiando las interrelaciones entre parámetros biofísicos (biomasa, índice de superficie foliar, contenido en clorofila, etc.) y parámetros espectrales (derivados de la medida del factor de reflectividad), que constituye el núcleo principal de la radiometría de campo cuando ésta se aplica a superficies que presentan una cubierta vegetal.

En este trabajo se expone un ejemplo de caracterización mediante radiometría de campo de una superficie típica de la zona experimental EFEDA, un pivot de maíz (situado en la zona de Barrax). El principal objetivo consiste en estudiar el comportamiento espectral del cultivo a lo largo de todo su ciclo fenológico así como establecer posibles correlaciones entre parámetros espectrales y agronómicos que, en una etapa futura, se podrían utilizar para estimar algunos de estos últimos a partir de medidas de teledetección.

Con objeto de realizar aplicaciones sistemáticas de la medida desde satélite al seguimiento de los recursos agrícolas, y contando con que los factores que afectan a la reflectividad de las superficies vegetales tienen dependencia distinta según la longitud de onda, se han desarrollado los llamados índices de vegetación. Los índices de vegetación se pueden definir como combinaciones de bandas espectrales cuya función es la de realzar la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores, como el suelo, las condiciones de la iluminación y la atmósfera (Colwell, 1974; Tucker *et al.*, 1979), que puedan producir interferencias en la señal radiométrica. La ventaja fundamental que ofrece la utilización de índices de vegetación en vez de bandas espectrales individuales es su mayor correlación con parámetros agronómicos tales como la biomasa, el LAI, etc., así como una disminución de la cantidad de datos espectrales a tratar, reduciendo los valores de radiancia en las distintas bandas espectrales a simple números adimensionales. El índice de vegetación más extensamente utilizado en la bibliografía es la diferencia normalizada de las bandas espectrales del infrarrojo cercano (IRC) y del rojo (R), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), sugerido por Rouse *et al.* (1974) y que se expresa, por tanto, como:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRC} - \text{R}}{\text{IRC} + \text{R}} \quad [1]$$

Este índice, que toma valores entre -1 y +1, es sin lugar a dudas, el más utilizado en las aplicaciones agronómicas de la teledetección ya que reúne dos características muy importantes: su sencillez matemática y su poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas vegetales, alcanzando un alto grado de correlación con diversos parámetros de interés agronómico. Este último hecho es consecuencia de que este índice explota el contraste espectral entre la zona del IRC ( $\approx 760-900$  nm), donde la reflectividad de la vegetación toma valores altos como consecuencia de la dispersión que sufre la radiación al atravesar las distintas membranas celulares, y la zona del R ( $\approx 630-690$  nm), donde la reflectividad de la vegetación verde es muy baja como consecuencia de la fuerte absorción por clorofila. El suelo, sin embargo, mantiene valores menos contrastados en estas dos regiones espectrales.

### ***Materiales y métodos***

En esta sección se va a dar una breve descripción del procedimiento experimental seguido para la obtención de las medidas de los dos parámetros biofísicos utilizados para realizar el seguimiento de la fenología del maíz (LAI y biomasa) así como de los valores de reflectividad espectral, utilizados posteriormente para calcular el índice de vegetación representativo de cada fecha. Se demostrará también que el NDVI normaliza, en parte, la influencia de las condiciones de iluminación solar, por lo que, en principio, es un parámetro espectral apropiado para realizar el seguimiento del cultivo, dado que es susceptible de su comparación temporal.

### ***Medidas de parámetros biofísicos***

Estas medidas fueron adquiridas regularmente cada siete días a lo largo del ciclo fenológico del maíz por el grupo de trabajo de la Universidad Castilla-La Mancha, también integrante del Proyecto EFEDA.

La medida del índice de superficie foliar (*leaf area index*, LAI) se llevó a cabo utilizando un LI-COR LAI 2000 Plant Canopy Analyzer, que estima dicha magnitud a partir de la transferencia de la radiación solar difusa a través de la cubierta vegetal (LI-COR, 1992). Se trata, por tanto, de un procedimiento indirecto no destructivo.

La biomasa, por el contrario, se estimó a través de un procedimiento destructivo tradicional, que consiste en multiplicar la densidad de siembra (determinada por medio de un muestreo inicial) por el peso seco de la planta (obtenido desecando las plantas muestreadas en cada fecha en una corriente de aire a 70°C durante 24 horas, separando raíces, hojas y frutos).

La figura 1 ilustra la evolución fenológica del maíz estudiado mediante la representación de las medidas de LAI y biomasa en función del día del año.

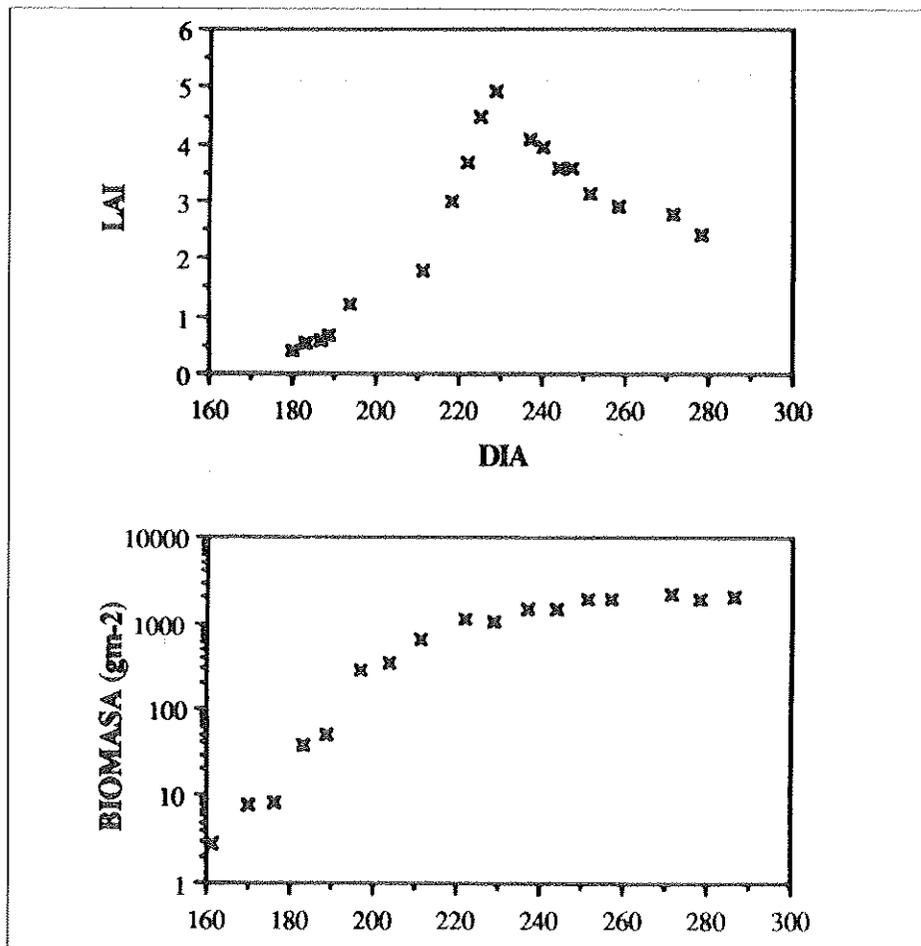


FIGURA 1  
Evolución del LAI y de la biomasa del pivot de maíz estudiado,  
en función del día del año. Para la biomasa se ha utilizado una escala logarítmica  
para visualizar mejor su crecimiento

### Medidas radiométricas

Las características reflectantes del sistema en estudio se han determinado a través de la medida del factor de reflectividad bidireccional (R) que, para cada longitud de onda y tal como se observa en la expresión [2], se define como el cociente entre la ra-

diancia del sistema ( $L$ ) y la de un panel de referencia ( $L^*$ ) que se supone perfectamente reflectante y difusor:

$$R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL(\theta_i, \phi_i)}{dL^*(\theta_r, \phi_r)} K(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \quad [2]$$

En dicha expresión, los subíndices  $i$  y  $r$  hacen referencia, respectivamente, a los ángulos de incidencia y de reflexión. Ante la imposibilidad de conseguir un blanco perfecto se debe realizar una corrección (factor  $K$ , que se obtiene del calibrado del panel) con objeto de tener en cuenta la reflectividad espectral del mismo (<100%) y su comportamiento cuasi-lambertiano (Jackson et al., 1992; Gilabert & Meliá, 1993).

El sensor utilizado en este trabajo para medir la radiancia de las superficies es el SIRIS (*Single field-of-view Infrared Intelligent Spectroradiometer*, de la casa GER), que es un espectrorradiómetro que proporciona medidas en el intervalo espectral que va desde 0.3 hasta 3.0  $\mu\text{m}$  mediante un espectro continuo. El equipo consta de dos unidades: un sensor o cabezal óptico y un ordenador portátil PC (ver figura 2), de forma que el sensor sólo puede operar comandado por el software del PC, permitiendo este último no sólo la toma de medidas, sino también su almacenamiento y procesado. Con el radiómetro se realizan medidas secuenciales del panel de referencia y de la superficie en estudio, de forma que, posteriormente, el *software* del equipo nos permite obtener un único espectro, correspondiente al factor de reflectividad,  $R$ , de dicha superficie en todo el intervalo de longitud de onda considerado. El panel de referencia se puede medir, o bien antes de cada medida, o bien antes de una serie de medidas. Como el tiempo mínimo que transcurre entre dos barridos consecutivos es de 2 minutos, el primer modo de operación es más aconsejable para obviar en lo posible los errores debidos a fluctuaciones en las condiciones de iluminación (Milton, 1987). El panel que se ha utilizado en esta trabajo es el Spectralon (de Labsphere), uno de los que dispone de los valores más altos de reflectividad difusa (entre 93.9% y 99.4%, dependiendo de la longitud de onda).

Los espectros obtenidos sufrieron un nivel de procesado adicional al expuesto hasta ahora para reproducir la reflectividad correspondiente a las dos bandas de medida del sensor Thematic Mapper (Gilabert, 1990; Gilabert & Meliá, 1993) del infrarrojo cercano (TM4) y del rojo (TM3), al objeto de poder deducir posibles conclusiones extrapolables, en una futura etapa, al estudio mediante imágenes Landsat.

Las medidas de reflectividad se realizaron desde mediados de Junio hasta mediados de Septiembre, utilizando el montaje experimental detallado en la figura 2. El cabezal óptico del sensor se fijó al extremo de un brazo articulado que permitía la observación vertical del sistema en estudio. En este caso se trataba de una hilera de ma-

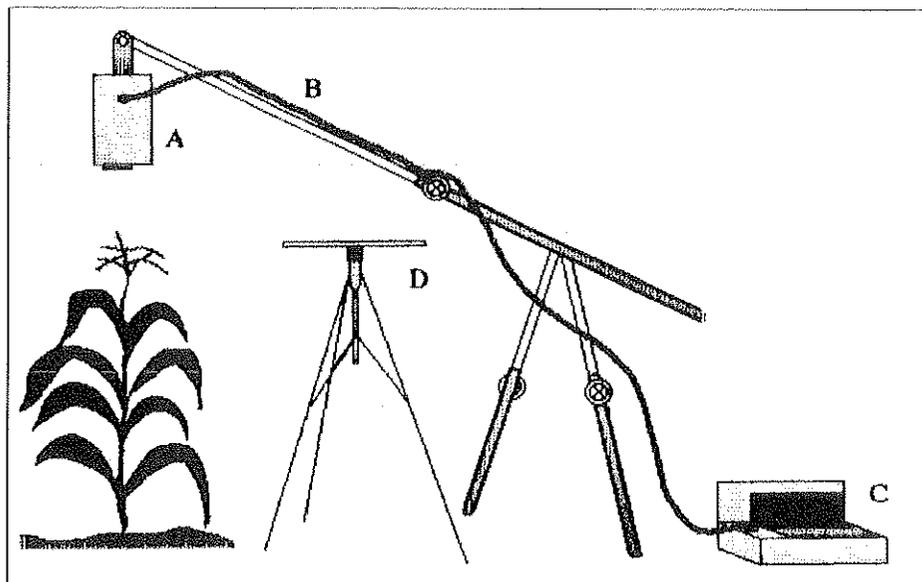


FIGURA 2

Esquema del montaje experimental utilizado en las medidas de la reflectividad en el campo. A es el cabezal óptico del sensor que, a través del cable B, se conecta con el ordenador portátil C, que comanda la medida y también archiva los espectros.

El sensor se fija a un brazo articulado que permite la observación vertical del sistema. D es el panel de referencia, que se sitúa sobre un trípode a una altura similar a la de la planta.

íz, a lo largo de la cual se realizaban medidas sucesivas. Las medidas espectrales se realizaron dentro de un intervalo temporal centrado en el mediodía solar. En dos fechas concretas, correspondientes a estados fenológicos del maíz claramente diferenciados (1 de Julio y 6 de Agosto), se realizaron series de medidas de más larga duración para capturar un intervalo de ángulos solares más extenso y poder analizar la posible influencia en la medida.

Todos los valores de reflectividad obtenidos en las bandas TM3 y TM4 se representaron en función del ángulo cenital solar, con objeto de analizar la dispersión entre los mismos que, en principio, es consecuencia de dos factores: (i) la heterogeneidad espacial de la cubierta vegetal (cuando movemos el radiómetro a lo largo de la hileras), y (ii) la evolución temporal a lo largo del día, en la que pueden influir simultáneamente tanto posibles cambios fisiológicos de la planta como el cambio de ángulo en la iluminación (ángulo cenital solar). Aunque este procedimiento se ha aplicado a todas las fechas, en la figuras 3 y 4 se proporcionan las gráficas correspondiente a las dos series más largas de medidas (1 Julio y 6 Agosto, respectivamente). Juntamente con los valores de reflectividad en las bandas citadas se muestran también los valores

de índice de vegetación (NDVI). En estas figuras, los ángulos solares anteriores al mediodía solar se han adoptado, por convenio, negativos.

En las figuras 3 y 4 se observa que:

- (i) La dispersión entre los valores en Julio, para un ángulo solar determinado, es mayor que en Agosto, posiblemente como consecuencia de los gaps existentes entre las plantas individuales cuando nos movemos a lo largo de una hilera de maíz, dado que son mucho más acentuados en Julio que en Agosto (donde la densidad de vegetación es mucho mayor).
- (ii) La dispersión entre valores medios para diferentes ángulos solares (evolución de la reflectividad a lo largo del día) es también mayor en Julio que en Agosto, por la misma razón. Por otra parte, aunque la reflectividad en TM3 y TM4 presenta una clara evolución diurna (más marcada en TM4), al construir el índice de vegetación este comportamiento desaparece prácticamente, es decir, el NDVI tiende a normalizar posibles influencias del ángulo solar. Este hecho refuerza otras ventajas conocidas de la utilización del NDVI y permite seleccionarlo como parámetro espectral a utilizar en el presente estudio.

Dada la escasa influencia del ángulo solar en el NDVI, se puede calcular un valor medio de cada serie de medidas, que será el índice representativo para cada fecha considerada. Este valor medio tendrá una dispersión asociada que será tanto mayor cuanto más heterogénea sea la cubierta vegetal. Las figuras 3(d) y 4(d) muestran estos valores medios con sus niveles de confianza. Esta operación se repitió en todas las fechas para obtener el índice de vegetación representativo de cada una (ver tabla 1).

| FECHA         | ESTADO FENOLÓGICO             | NDVI  | s (%) |
|---------------|-------------------------------|-------|-------|
| 19 Junio      | Cuatro hojas fuera            | 0.304 | 53    |
| 1 Julio       | Seis hojas fuera              | 0.574 | 37    |
| 14 Julio      | Ocho hojas fuera              | 0.799 | 10    |
| 6 Agosto      | Catorce hojas fuera           | 0.917 | 5     |
| 15 Agosto     | Punta de la mazorca emergente | 0.920 | 7     |
| 15 Septiembre | Grano pastoso                 | 0.797 | 8     |

**NOTA:** Otra serie de medidas se llevó a cabo el 27 Agosto (mazorca totalmente fuera y polen maduro), pero no se han podido incluir en el trabajo por motivos técnicos.

TABLA 1

Fechas en que se realizaron las medidas de reflectividad, con indicación del estado fenológico de maíz (según la clave de Hanway, 1971), y valores de índice de vegetación (NDVI). Se dan también las dispersiones (s) estimadas a partir de los márgenes de confianza obtenidos al calcular los valores medios, según se indica en el texto

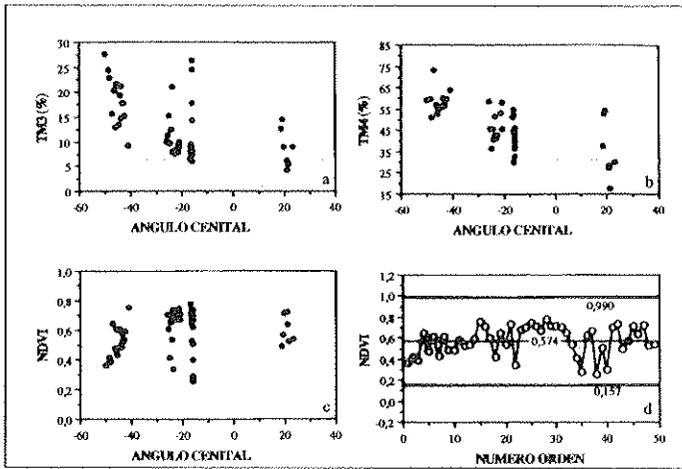


FIGURA 3

(a) Reflectividad en TM3 (rojo), (b) en TM4 (infrarrojo cercano), y (c) valores del índice de vegetación NDVI, en función del ángulo cenital solar, correspondientes al 1 de Julio (los ángulos anteriores al mediodía se han adoptado, por convenio, negativos). (d) Procedimiento utilizado para determinar el valor medio del índice de vegetación, donde se indican, además, los intervalos de confianza

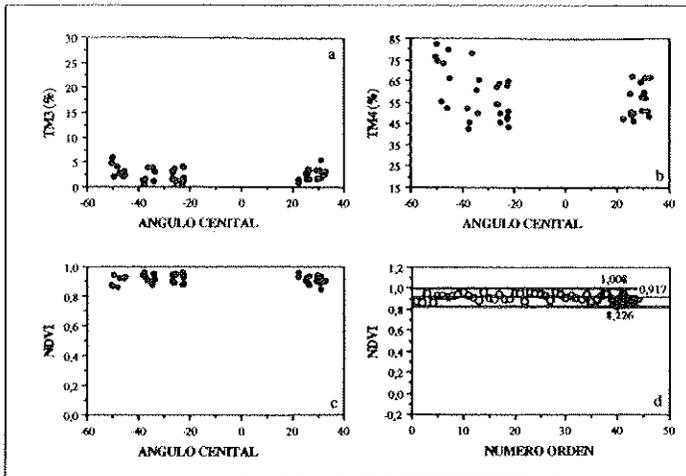


FIGURA 4

(a) Reflectividad en TM3 (rojo), (b) en TM4 (infrarrojo cercano), y (c) valores del índice de vegetación NDVI, en función del ángulo cenital solar, correspondientes al 6 de Agosto (los ángulos anteriores al mediodía se han adoptado, por convenio, negativos). (d) Procedimiento utilizado para determinar el valor medio del índice de vegetación, donde se indican, además, los intervalos de confianza

Como se puede observar en la tabla 1, el NDVI presenta una evolución temporal, a lo largo del ciclo fenológico del maíz, similar a la que presenta el índice de superficie foliar (LAI) (ver figura 1); es decir, ambos parámetros aumentan a medida que transcurren los días hasta, aproximadamente, mediados del mes de Agosto, para ir decreciendo paulatinamente con posterioridad a esta fecha. Este comportamiento es marcadamente diferente al que presenta la biomasa. Este parámetro aumenta, prácticamente, a lo largo de todo el ciclo fenológico, con un crecimiento en la primera etapa mucho más acentuado que el que presentan el LAI y el NDVI.

Con objeto de estudiar las posibles correlaciones entre el parámetro espectral seleccionado en el estudio, el NDVI, y los dos parámetros agronómicos, LAI y biomasa, y dado que las medidas de los mismos se realizaron en fechas no coincidentes, se ha realizado un ajuste de la evolución del índice de vegetación con el día del año (D) por medio de la ley cuadrática que se muestra en la expresión [3]:

$$\text{NDVI} = -8.68 + 8.45 \times 10^{-2} D - 1.85 \times 10^{-4} D^2 \quad r^2 = 0.984 \quad [3]$$

Esta expresión permite estimar los valores del índice de vegetación correspondiente a los días en que se llevaron a cabo medidas de LAI y/o de biomasa, y que serán los utilizados para analizar las correlaciones existentes con dichos parámetros agronómicos.

## **Resultados**

### **Correlación NDVI/LAI**

La figura 5 muestra los valores de índice de vegetación en función del LAI. Como se puede observar, existe una tendencia obvia del NDVI a alcanzar un *plateau* para valores de LAI altos (mitad de Agosto). Esta saturación temporal del índice de vegetación desaparece a medida que avanzan los estados fenológicos del maíz (las mazorcas se forman completamente y las hojas empiezan a resecarse después del período de fuerte actividad fotosintética). De este modo, la distribución de los puntos en la figura 5 adopta una forma parecida a un ciclo de histéresis, con una etapa inicial (pre-LAI<sub>max</sub>) donde el LAI aumenta como consecuencia del incremento en el número de hojas de la planta y el crecimiento de las mismas, lo que conlleva un incremento del índice de vegetación, y un camino de vuelta (post-LAI<sub>max</sub>) donde no se recupera el estado inicial dado que en este caso el decrecimiento en el LAI es consecuencia del resecamiento y pérdida de turgencia de las hojas. Las dos etapas aparecen reseñadas en la figura por símbolos negros y blancos, respectivamente.

Este comportamiento asintótico es típico en esta clase de estudios (Baret et al., 1989; Sellers, 1989; Wiegand et al., 1992) y la principal conclusión del mismo es que la rela-

ción NDVI/LAI es particularmente interesante en la primera parte del ciclo, antes de alcanzarse la saturación, es decir, para bajas cantidades de vegetación. El ajuste de los datos de la gráfica se ha llevado a cabo separando las dos etapas anteriormente mencionadas (valores anteriores al punto donde se alcanza el máximo LAI y valores posteriores), dado que la relación empírica que liga ambas magnitudes depende del estado fenológico (Wiegand et al., 1992). El tipo de ajuste que se ha seguido para estudiar la correlación entre NDVI y LAI viene dado en la expresión [4] (Baret et al., 1989; Wiegand et al., 1992):

$$Y = A + B \exp(-CX) \quad [4]$$

donde Y hace referencia al índice de vegetación y X al índice de superficie foliar. En esta expresión, y para la primera parte del ciclo fenológico, A es el  $NDVI_{\infty}$ , esto es, el valor de la asíntota hacia la que tiende la distribución de valores para LAI elevado; B es la diferencia entre el índice de vegetación del suelo y el  $NDVI_{\infty}$ , y C es un coeficiente relacionado con la extinción de la radiación solar a medida que atraviesa la cubierta vegetal. Para la segunda rama de la figura 5, la interpretación teórica de los coeficientes del ajuste no es tan inmediata y todavía está en términos de discusión. Los valores obtenidos para los ajustes de las dos etapas mencionadas se dan en la tabla 2.

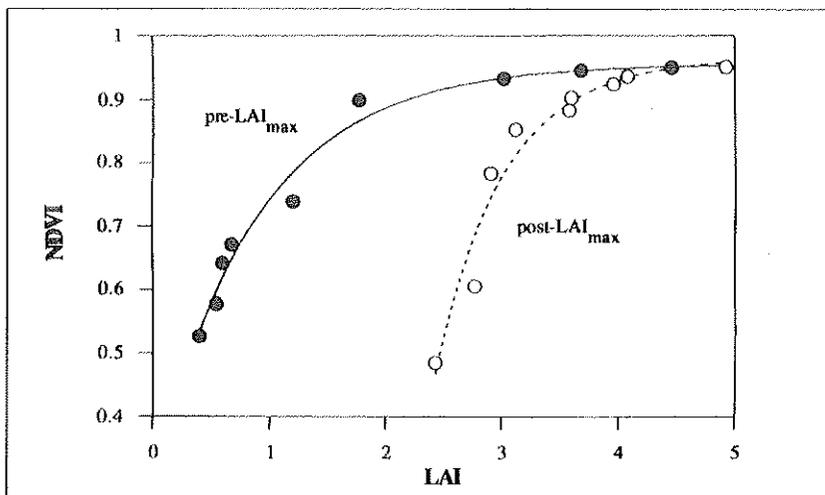


FIGURA 5

Valores del índice de vegetación, NDVI, en función de los valores de índice de superficie foliar, LAI. Los datos correspondientes al periodo de desarrollo y máxima actividad fotosintética del maíz (hasta mediados de Agosto, aproximadamente) se han señalado por símbolos negros (pre-LAI<sub>max</sub>) y los datos correspondientes a fechas posteriores (post-LAI<sub>max</sub>) por símbolos blancos. Las curvas resultantes del ajuste de los datos en ambos periodos, representadas con trazo continuo y discontinuo respectivamente, se comentan con más detalle en el texto

|   | pre-LAI <sub>max</sub> | post-LAI <sub>max</sub> |
|---|------------------------|-------------------------|
| A | 0.956                  | 0.965                   |
| B | -0.666                 | -30.705                 |
| C | 1.133                  | 1.697                   |
| r | 0.991                  | 0.976                   |

TABLA 2  
Coeficientes de los ajuste entre NDVI y LAI siguiendo el modelo propuesto  
en la expresión (4). El significado de A, B y C se discute en el texto  
y r hace referencia al coeficiente de correlación

### Correlación NDVI/biomasa

Si, por el contrario, el índice de vegetación se representa con respecto a la biomasa (figura 6), la distribución muestra una forma claramente diferenciada de la anterior dado que aún después de que el NDVI alcanza su máximo valor, la biomasa continúa aumentando hasta permanecer prácticamente constante hacia el final del ciclo. Por esta razón, la correlación entre ambas magnitudes se ha estudiado solamente en este caso para la primera etapa del ciclo (denominada pre-LAI<sub>max</sub>) y el mejor modelo de ajuste ha resultado ser el logarítmico según se aprecia en la expresión [5]:

$$Y = A + B \log X \quad [5]$$

donde nuevamente Y hace referencia al NDVI y X a la biomasa (en gm<sup>-2</sup>). Los parámetros de ajuste en este caso toman los valores: A = 0.098 y B = 0.288, siendo el coeficiente de correlación igual a 0.980.

### Comentarios

De las figuras 5 y 6 se puede concluir que el índice de vegetación es, en principio, un parámetro espectral apropiado para realizar el seguimiento de la fenología del maíz por técnicas de teledetección. La correlación NDVI/LAI parece caracterizar mejor la evolución fenológica del maíz a lo largo de todo el ciclo vegetativo, dado que en el periodo de senescencia el NDVI decrece a pesar de que la biomasa no lo hace. Sin embargo, si sólo estamos interesados en caracterizar la primera etapa del crecimiento, los dos parámetros resultan ser buenos indicadores dada la buena correlación que alcanzan con el NDVI.

La selección del NDVI como parámetro espectral útil para realizar el seguimiento del cultivo se apoya, básicamente, en dos consideraciones: por una parte, su correlación con los parámetros biofísicos y, por otra, su poder de normalización del efecto debido al cambio en el ángulo de la iluminación solar. No obstante, la extrapolación

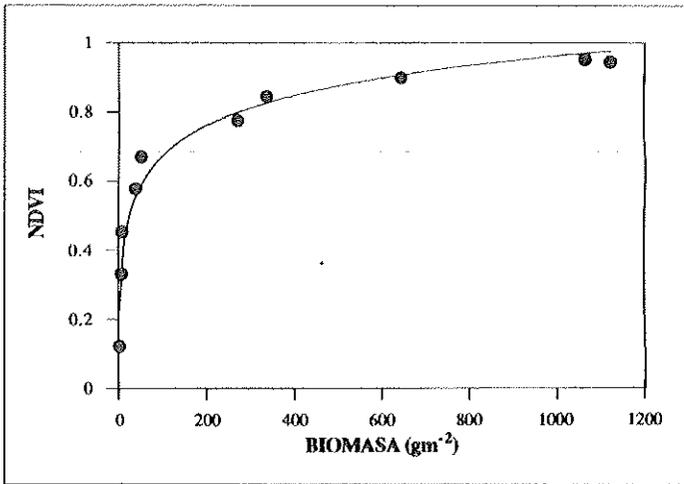


FIGURA 6

Valores del índice de vegetación, NDVI, en función de la biomasa del maíz para la etapa fenológica del cultivo correspondiente al periodo anterior a cuando se alcanza el LAI máximo, es decir, aproximadamente hasta mediados de Agosto. Se ha representado también la curva logarítmica resultante del ajuste de los datos experimentales

de los resultados obtenidos a una zona más extensa, donde se pudieran encontrar diversos tipos de suelo presentando, además, distintos grados de humedad, no sería inmediata dado que se ha encontrado que el NDVI de un cultivo resulta todavía sensible a las propiedades ópticas del suelo de fondo (Huete, 1988; Bausch, 1993). En este sentido, se han desarrollado nuevos índices de vegetación que parecen normalizar mejor el efecto del suelo. Tal es el caso, por ejemplo del SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), debido a Huete (1988) y utilizado por Bausch (1993) para estudiar el maíz. Sin embargo, este índice tiene menos poder normalizante en cuanto a las condiciones de iluminación se refiere. Esta discusión trata de poner de manifiesto que, según el tipo de estudio a realizar convendría comprobar la idoneidad del índice de vegetación a utilizar. En este sentido, y en el contexto de la aplicación que se ilustra en este trabajo, se está probando la validez de otros índices basados en bandas anchas, como el SAVI, y otros obtenidos de la alta resolución espectral, como el límite rojo (*red edge*) de los espectros (Gilabert & Meliá, 1994).

Cabe puntualizar, además, que las correlaciones encontradas en el trabajo son útiles, básicamente, en la primera etapa del ciclo fenológico, hasta un LAI  $\approx 3$ , dado que a partir de ese momento se produce una saturación en los valores del índice de vegetación. Precisamente Bausch (1993) ha encontrado que, para el cultivo del maíz, la reflectividad del suelo afecta a los valores del NDVI hasta valores de LAI  $\approx 3$ , lo que

significa que el intervalo de validez de las correlaciones coincide con la región donde los efectos debidos al fondo de la parcela son más importantes. De ahí el comentario anterior de las posibles restricciones que habría que efectuar antes de la extrapolación de los resultados a una zona extensa. En este trabajo, donde se estudia sólo una parcela, este hecho reviste menos importancia.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto EFEDA (EPOC-CT90-0030 LNBE). Agradecemos al grupo de trabajo de la Universidad Castilla-La Mancha, integrante del mismo proyecto, la toma de los parámetros biofísicos y el tratamiento de dichas medidas.

### **Bibliografía**

- Baret, F., Guyot, G. & Major, D.J.:** 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria (PRS)*, 43: 241-256.
- Bausch, W.C.:** 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment*, 46: 213-222.
- Colwell, J.E.:** 1974. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 3: 175-183.
- Gilabert, M.A.:** 1990. Caracterización radiométrica, en el intervalo espectral solar, de cultivos cítricos. Modelo geométrico de reflectividad de aplicación en teledetección. Tesis Doctoral, Facultat de Física, Universitat de València.
- Gilabert, M.A. & Meliá, J.:** 1993. Solar angle and sky-light effects on ground reflectance measurements in a citrus canopy. *Remote Sensing of Environment*, 45: 281-293.
- Gilabert, M.A. & Meliá, J.:** 1994. High spectral resolution spectroscopy for monitoring corn growth at EFEDA site (Spain). En *Sixth International Symposium 'Physical Measurements and signatures in Remote Sensing'*, January 17-21, 1994, Val d'Isère, France (en prensa).
- Hanway, J.J.:** 1971. How a corn plant develops. Iowa Coop. Ext. Serv. Spec. rep 48 (rev).
- Huete, A.R.:** 1988. A soil Adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- Jackson, R.D., Clarke, T.R. & Moran, M.S.:** 1992. Bi-directional calibration results for 11 molded halon and 16 BaSO<sub>4</sub> reference reflectance panels. *Remote Sensing of Environment*, 40: 231-239.
- LI-COR:** 1992. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Operating Manual. LI-COR, Inc., April 1992, Lincoln, Nebraska, USA.
- López-Baeza, E., Meliá, J., Caselles, V., Coll, C., Fortea, M.A., Gilabert, M.A., Moreno, J., Núñez, M., de la Rubia, J., Segarra, D., Sobrino, J.A., Tamayo, J., Valiente, J.A., & Valor, E.:** (1994). Seguimiento mediante teledetección de áreas amenazadas por la desertificación: Proyecto EFEDA. En *5ª Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección "Ordenación del territorio y Medio Marino"*, 10-12 Noviembre 1993, Las Palmas de Gran Canaria (en estos proceedings).
- Milton, E.J.:** 1987. Principles of field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 8 (12): 1807-1827.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. & Harlan, J.C.:** (1974). Monitoring

the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, pp: 371.

**Sellers, P.J.:** 1989. Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes, cap. 8 de *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, editado por G. Asrar, John Wiley and Sons, New York, 733 páginas.

**Tucker, C.J., Elgin, J.H. & Mc Murtrey, J.E.:** 1979. Temporal spectral measurements of corn and soybean crops. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 45: 643-653.

**Wiegand, C.L., Maas, S.J., Aase, J.K., Hatfield, J.L., Pinter Jr, P.J., Jackson, R.D., Kanemasu, E.T. & Lapitan, R.L.:** 1992. Multisite analysis of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sensing of Environment*, 42: 1-21.