

METODOLOGIA DE EVALUACION DE HELADAS EN CITRICOS BASADA EN LA EVOLUCION TEMPORAL DE UN INDICE DE VEGETACION

M.A. GILABERT, D. SEGARRA & J. MELIA

Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València. 46100 Burjassot. València

RESUMEN

La comparación de dos imágenes TM, una anterior a una helada y la otra posterior, ha permitido desarrollar un algoritmo para la identificación de superficies cítricas afectadas por una helada. Se ha construido el índice de vegetación IV (4-3) para las dos fechas en cuestión a partir de los valores de reflectividad corregidos de la dispersión atmosférica. En el espacio de fases $IV_{\text{ENERO}} / IV_{\text{MARZO}}$ es posible definir una recta, denominada LINEA CERO, que ajusta los puntos representativos de las parcelas no heladas y de modo que la distancia de los puntos representativos de cualquier parcela a esta línea es una medida del grado de afectación por el frío.

Palabras clave: Cultivos cítricos, Heladas, Índice de vegetación, Evolución temporal

ABSTRACT

The comparison of two TM-images, one before a frost and another after it, has permitted us to develop an algorithm for identifying citric surfaces affected by a frost. By using a simple method to estimate atmospheric scattering and converting digital counts into reflectance values, we have constructed the normalized difference IV (4-3) for both dates. The Vegetation Index (January) / Vegetation Index (March) scattergram for non-frost parcels permits to define a line called NON-FROST LINE, in such a way that distance from the point representative of any parcel to this line is a measure of the degree of affectation by cold.

Key words: Citrus orchards, Frost, Vegetation index, Temporal evolution

1. INTRODUCCION

Una de las posibles aplicaciones de la teledetección a la agricultura es la identificación y el seguimiento de las alteraciones acontecidas en un cultivo como consecuencia de un factor externo que ha actuado sobre el mismo. Es en este contexto donde cabe situar este trabajo (el cultivo en estudio serán los cítricos y el factor externo una helada), en el que se persigue diseñar una metodología que, de forma sistemática a través de imágenes de satélite y con la menor utilización posible de datos de campo, permita detectar y valorar los efectos del frío en una zona cítrica.

Ya que el fondo de las parcelas (suelo desnudo o suelo cubierto por vegetación baja) es bastante resistente a las bajas temperaturas y es impensable contar con la influencia de los frutos, cuando los hay, en las medidas efectuadas desde satélite, hay que comenzar planteándose si, efectivamente, como consecuencia de una helada se produce una alteración física en las hojas tal que desemboque en una alteración espectral de las mismas. Sólo entonces tendrá sentido trasladar el problema a otra escala más propia de la teledetección desde satélite.

1.1. EFECTO DEL HIELO EN UNA HOJA DE CITRICOS. ALTERACION DE SU RESPUESTA ESPECTRAL

Como consecuencia de una helada se alteran profundamente la estructura interna de las hojas, el contenido en agua y su pigmentación o nivel de clorofila (Díaz, 1983; Fuentes, 1983). Debido a que todos estos factores influyen en la reflectividad de las hojas (Cariolis & Amodeo, 1983) es de esperar, pues, que se pueda plasmar el efecto de una helada a través de la alteración espectral sufrida por la hoja. En la figura 1 se da la respuesta espectral, medida en laboratorio utilizando un monocromador, de una hoja sana (no afectada por el frío) y de una hoja afectada por las bajas temperaturas una semana después de que tuvieron lugar. Se observa una disminución

en el infrarrojo cercano que se atribuye al menor vigor de la hoja y a la modificación irreversible sufrida en su estructura interna, y un aumento en el visible —zona de absorción por clorofila— que se atribuye a la menor actividad fotosintética.

1.2.EVOLUCION TEMPORAL DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LOS CRITICOS. INDICE DE VEGETACION "DIFERENCIA NORMALIZADA"

Sin embargo, en lo que respecta a la teledetección desde satélites (en nuestro caso el Landsat-5 TM) lo que medimos no es la reflectividad de una hoja sino la de una cubierta vegetal, que constituye un sistema reflectante mucho más complejo (Colwell, 1974; Curran, 1980).

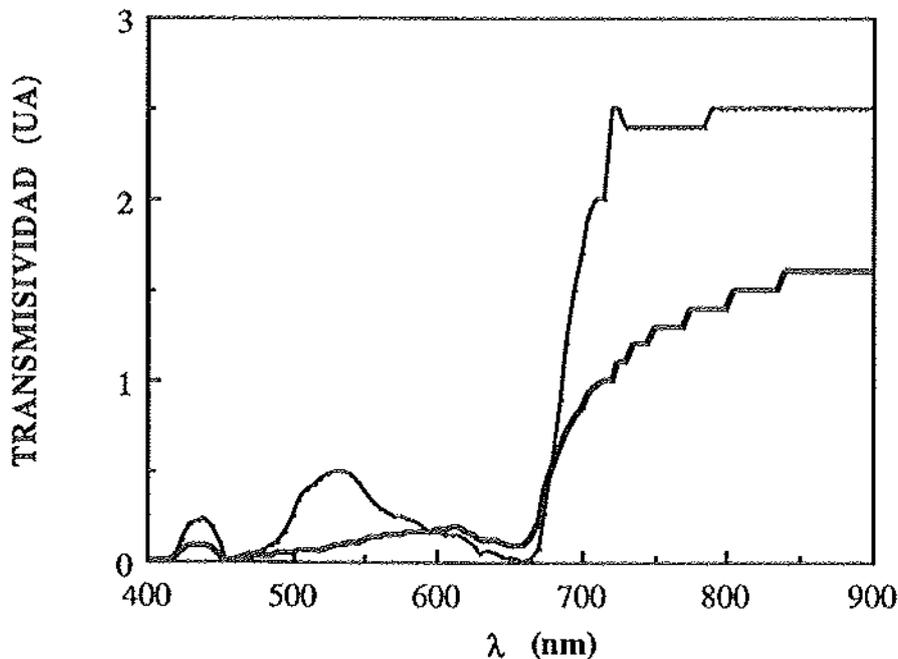


Figura 1.— Respuesta espectral de una hoja sana (en trazo fino), es decir, de un naranjo no afectado por bajas temperaturas, y de una hoja helada (en trazo grueso) medida una semana después del descenso de temperatura.

Ciertamente el estudio de la reflectividad de los cítricos, utilizando imágenes Landsat-5 TM, que venimos realizando en los últimos años, ha puesto de manifiesto la no existencia de una signatura espectral típica para este cultivo, puesto que dentro de una misma imagen hay, para la "clase cítricos", varias signaturas espectrales que vienen determinadas, principalmente, por el grado de cobertura de la plantación (Gilabert & Meliá, 1989). Además, los cítricos muestran un comportamiento temporal altamente variable y dependiente de la época del año (Gilabert et al., 1986, Gilabert & Meliá, 1989). Por esto último es necesario realizar un estudio multitemporal con vistas a detectar cualquier anomalía en la cosecha ya que, si bien una imagen de satélite posterior a la helada acusa los efectos de la misma, éstos aparecen apantallados por otras fluctuaciones de la reflectividad ajenas al propio acontecimiento de la helada.

El parámetro espectral utilizado para realizar el estudio multitemporal ha sido el índice de vegetación IV (4-3), por reunir las siguientes condiciones:

- Elimina en parte la influencia del fondo en la reflectividad de la parcela, realizando la del árbol, que es el foco de nuestro estudio (Clevers, 1988). Además, los índices de vegetación compensan, en parte, las condiciones de iluminación y los efectos atmosféricos (Tucker, 1979).
- Por otra parte, se ha comprobado, para el caso de cultivos cítricos, que:
 - La evolución temporal de este índice es menor que la presentada por otros (Segarra, et al., 1988).
 - Está muy correlacionado con el grado de cobertura de las parcelas (Gilabert & Meliá, 1989).

Las dos últimas características hacen posible establecer, en función del grado de cobertura, la evolución temporal de dicho índice, de forma que se pueda poner de manifiesto mediante la misma cualquier alteración anormal sufrida en la respuesta espectral de las parcelas. Esto no sería posible utilizando otros índices de vegetación debido al carácter más aleatorio de su evolución temporal.

Se va a plantear, pues, la búsqueda de un parámetro que nos dé cuál sería la evolución del índice de vegetación considerado para el caso ideal en que no hubiera habido ninguna helada entre las dos fechas que estudiaremos en el trabajo. Cualquier anomalía sufrida como consecuencia del frío se podrá valorar utilizando tal parámetro.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para realizar dicho estudio se escogió como área piloto una zona de unos 60 km² situada al Sur de la ciudad de Castellón (costa mediterránea). Esta zona, en la cual predomina el cultivo de cítricos, fue afectada por una intensa helada de advección en Enero de 1985. Los efectos de esta helada fueron nefastos para la agricultura de la Comunidad Valenciana, especialmente para los cultivos de invierno, y más concretamente para los cítricos.

2.1. IMAGENES UTILIZADAS

Como se ha indicado en la introducción del trabajo, para poner de manifiesto una posible alteración de la respuesta espectral de los cítricos como consecuencia de la helada, es necesario recurrir al estudio multitemporal. Por este motivo se han utilizado dos imágenes Landsat-5 TM correspondientes a las fechas:

- 11 de Enero 1985 (unos días anterior a la helada), y
- 16 de Marzo 1985 (2 meses posterior a la misma).

En estas imágenes se seleccionaron una serie de parcelas patrón de cítricos (11 en total), de edades y grado de afectación por el frío distintos. A cada una de estas parcelas se le asignará como medida espectral el valor medio del valor de cada uno de los pixels que contiene, y como error la desviación típica de dicha medida.

2.2. CORRECCION ATMOSFERICA

En los estudios donde la comparación temporal de imágenes es pieza fundamental, es imprescindible convertir las cuentas digitales (DCs) en los correspondientes valores de reflectividad teniendo en cuenta, además, la perturbación introducida por la atmósfera en la radiancia medida por el sensor. De esta forma se consigue normalizar los efectos producidos por cambios en la iluminación de las escenas de satélite y los debidos a la propia atmósfera. En el proceso de conversión de la imagen TM inicial (en DCs) a imagen de reflectividad corregida, se ha introducido un algoritmo sencillo que permite valorar la dispersión atmosférica, que constituye un componente aditivo a la radiancia que llega al sensor. Si bien este método de corrección no es exacto, sí que normaliza, en parte, los efectos atmosféricos sobre las imágenes. La absorción atmosférica no se ha corregido; no obstante su efecto es despreciable si se trabaja con el índice de vegetación considerado en este trabajo (Holben, 1986).

En la determinación de la dispersión correspondiente a cada banda espectral hemos utilizado el método propuesto por Chavez (1988), que propone una mejora de la técnica tradicional basada en los pixels de radiancia mínima de la imagen.

En la Tabla 1 se resumen los valores para la dispersión atmosférica encontrados para las dos fecha de estudio y para las bandas espectrales que se van a utilizar, así como las condiciones atmosféricas.

Una vez determinadas las dispersiones se han transformado las imágenes de DCs a las correspondientes al índice de vegetación, calculado a partir de la expresión 1:

$$IV (4 - 3) = \frac{\rho_{TM4} - \rho_{TM3}}{\rho_{TM4} + \rho_{TM3}} \quad (1)$$

Valores de dispersión (en DCs) encontrados para las dos fechas de estudio en las bandas TM3 Y TM4. Se especifican, además, las condiciones atmosféricas de cada fecha en cuestión, según la nomenclatura utilizada por (Chávez, 1988).

TABLA 1

Banda Espectral	Valor Dispersión	
	11 Enero 1985 (Atmósfera muy clara)	16 Marzo 1985 (Atmósfera clara)
TM3	10	23
TM4	5	15

donde la reflectividad en cada banda espectral viene dada por la expresión 2:

$$\rho_{\lambda} = \frac{k\pi (L_{\lambda} - L_{0\lambda})}{E_{0\lambda} \cos \theta - \pi L_{0\lambda}} \quad (2)$$

siendo:

k = Factor corrector de la distancia Tierra-Sol.

$E_{0\lambda}$ = La irradiancia extraterrestre.

θ = Angulo cenital solar.

L_{λ} = La radiancia medida por el sensor, calculada de las cuentas digitales utilizando las funciones de calibrado (Price, 1987).

$L_{0\lambda}$ = La radiancia correspondiente a los valores de dispersión (Tabla 1) calculada a través de las mismas expresiones de calibrado (Price, 1987).

Tal como se observa en la expresión 2, se ha supuesto que la superficie es un reflector lambertiano, que la atmósfera está estratificada horizontalmente y que el ángulo de elevación solar es constante en toda la imagen.

Sustituyendo los valores de la reflectividad de cada banda corregidos atmosféricamente en la expresión 1 se obtiene finalmente la expresión 3, utilizada para transformar las dos imágenes expresadas en DCs a imágenes de Índices de Vegetación.

$$IV (4 - 3) = \frac{\frac{L_4 - L_{04}}{E_{04} \cos \theta - \pi L_{04}} - \frac{L_3 - L_{03}}{E_{03} \cos \theta - \pi L_{03}}}{\frac{L_4 - L_{04}}{E_{04} \cos \theta - \pi L_{04}} + \frac{L_3 - L_{03}}{E_{03} \cos \theta - \pi L_{03}}} \quad (3)$$

2.3. CORRECCION GEOMETRICA

Cuando tengamos que aplicar el algoritmo diseñado para identificar y evaluar las zonas heladas en la imagen (apartado 3), hará falta superponer las imágenes de las dos fechas consideradas, para lo cual es necesario, previamente, aplicarles una corrección geométrica.

Para determinar el valor de la función de transformación de coordenadas (ecuaciones 4 y 5) de una fecha respecto a la otra se han utilizado 20 puntos de control distribuidos uniformemente en toda la imagen.

$$X_{\text{MARZO}} = 0,439 + 0,998 * X_{\text{ENERO}} \quad (4)$$

$$Y_{\text{MARZO}} = - 0,476 + 0,999 * Y_{\text{ENERO}} \quad (5)$$

Para lograr la superposición de las dos imágenes se ha deformado radiométricamente una con respecto a la otra utilizando una interpolación bilineal.

3. RESULTADOS

3.1. RESPUESTA ESPECTRAL DE LAS PARCELAS PATRON

En las imágenes correspondientes al índice de vegetación construidas según se ha indicado en el apartado 2, se ha medido la respuesta espectral de cada una de las parcelas patrón. En la figura 2 se muestra el resultado de tales medidas mediante un diagrama IV_{MARZO} (eje vertical) / IV_{ENERO} (eje horizontal). Con representación clara aparecen las parcelas patrón que no se helaron, y en oscuro las que fueron atacadas intensamente por el frío, que presentan una disminución de su valor en Marzo.

El comportamiento de las parcelas heladas es físicamente justificable de acuerdo con el proceso que experimentan las hojas en tales condiciones: al disminuir el contenido en clorofila, disminuye la absorción por este pigmento y aumenta, por tanto, la reflectividad en TM3. Asimismo, al haber muerto las hojas, su actividad vegetal prácticamente ha desaparecido y disminuye la reflectividad en TM4. El efecto neto es, por tanto, una disminución del índice de vegetación. No cabe esperar un aumento demasiado brusco del valor del índice de Marzo, puesto que si bien las parcelas de cítricos en esta época gozan de un mayor vigor por encontrarse a principio del "spring bloom" (primeros brotes), previo al período de floración que culminará en Abril, disminuye la cantidad de sombras con respecto a Enero (una disminución de sombras hace disminuir el valor del índice (Ranson, 1987; Gilabert & Meliá, 1989)).

3.2. LINEA CERO: ALGORITMO DE IDENTIFICACION Y EVALUACION DE LAS ZONAS HELADAS

En la figura 2 se podía observar que los puntos representativos de las parcelas no heladas se pueden ajustar mediante una recta, también representada en la misma figura, denominada en este trabajo LINEA CERO¹. El significado físico de esta recta en este espacio de fases es el de proporcionar la evolución temporal de las parcelas de cítricos desde Enero a Marzo para el caso ideal en que no hubieran sido afectadas por la helada. La ecuación correspondiente a esta recta viene dada por la expresión 6:

$$y = (2,1 \pm 1,3) + (1,24 \pm 0,22)x \quad (6)$$

donde "y" representa los valores del índice en Marzo, y "x" los de Enero. Según esta interpretación geométrica la "distancia vertical" de los puntos representativos de parcelas heladas a esta línea es, por tanto, una medida del grado de afectación del frío en dicha parcela.

Dicha recta nos permite diseñar el algoritmo buscado en este trabajo de la siguiente forma: si no hubiera habido ninguna helada, la imagen de Marzo que se obtendría, teóricamente, sería la correspondiente a transformar la imagen de Enero utilizando la ecuación de la LINEA CERO (denominamos a esta imagen IV_{MARZO}^*). Si construimos una nueva imagen que sea igual a la diferencia de IV_{MARZO}^* y de la imagen verdadera de Marzo IV_{MARZO} , los pixels pertenecientes a las parcelas cuya respuesta espectral es la misma (las no heladas) adquirirán valores muy bajos, prácticamente nulos, mientras que los pixels afectados por el frío tomarán valores más altos, proporcionalmente a su grado de afectación. Es decir, la diferencia de las dos imágenes (la teórica y la real) valora la distancia de los pixels representativos de las parcelas a la LINEA CERO y es, por tanto, una medida del grado de afectación por el frío (GRAF²), cuya definición matemática se proporciona en la expresión 7:

$$\text{GRAF} = IV_{\text{MARZO}}^* - IV_{\text{MARZO}} \quad (7)$$

¹ En la versión del trabajo en inglés, dicha línea ha sido denominada "NON-FROST LINE".

² En la versión del trabajo en inglés, se ha denominado DCD (Degree of Cold Damage).

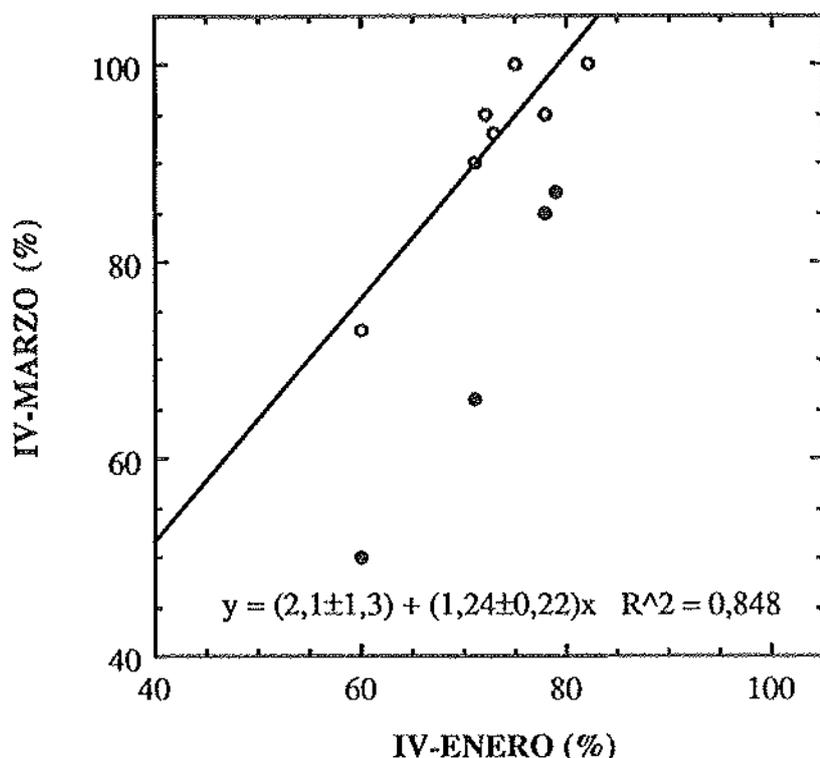


Figura 2.— Diagrama IV_{MARZO} (eje vertical) / IV_{ENERO} (eje horizontal). Con representación clara aparecen las parcelas patrón que no se helaron, y en oscuro las que fueron atacadas en mayor o menor medida por el frío. Se da la representación de la LINEA CERO, cuyo significado se explica en el texto.

4. DISCUSION

Como resultado de aplicar el algoritmo descrito en el apartado anterior se obtiene la imagen que se muestra en la figura 3. La misma se corresponde con la diferencia de las imágenes IV_{MARZO}^* y IV_{MARZO} , habiéndoles aplicado previamente una corrección geométrica relativa para que se solapen. Es, por tanto, la imagen que nos da el grado de afectación por el frío (GRAF) en las zonas citricolas del área en que se ha realizado el estudio.

Con objeto de identificar en dicha imagen el grado de afectación por el frío sólo en las superficies citricolas se ha superpuesto una máscara (en color negro) que elimina el resto de los tipos de uso de suelo. Dicha máscara se ha construido a partir del IV de Enero porque se ha comprobado que es en los meses de invierno cuando se alcanzan los máximos contrastes espectrales entre los cítricos y el resto de las superficies (Segarra, et al., 1988).

En la imagen de la figura 3 se muestran, con distintas tonalidades de colores las zonas ocupadas por cítricos y el grado de afectación por el frío. La asignación de colores se ha realizado en base a distintas particiones efectuadas al histograma de esta imagen. Como consecuencia de tener en cuenta el error de la ordenada en el origen y de la pendiente de la LINEA CERO, el límite de valores de GRAF representativos de los pixels no helados se ha visto ampliado de 0 a 6 por 100. Estos pixels, que apenas se han visto dañados por el frío aparecen de color azul oscuro, y representan 1.300 Ha. El resto de los pixels (1.508 Ha), con valores de GRAF comprendidos entre 6 y 100 por 100 muestran un grado de afectación por el frío creciente a medida que aumenta, obviamente, el valor de GRAF. La gradación de colores desde azul claro hasta rojo muestra este crecimiento en la magnitud del daño sufrido por los pixels.

La ausencia de estadísticas agrarias que evaluaran los daños sufridos en la zona de estudio por esta helada ha dificultado la tarea de verificar cuantitativamente la validez del método propuesto. Sin embargo, el contraste de la imagen-resultado con los datos de que disponía la Consellería de Agricultura y con los recogidos personalmente con las visitas efectuadas a la zona de estudio, ha puesto de manifiesto la potencia de la metodología desarrollada, al alcanzarse porcentajes de aciertos superiores al 90 por 100.

La comparación de la zonificación obtenida en la imagen-resultado con la imagen térmica correspondiente a la fecha anterior a la helada ha permitido comprobar que, en gran medida, las zonas más afectadas por el frío en Enero, mostradas en la figura 3, se corresponden con aquellas en las que la temperatura superficial es menor. Es decir, las zonas de la imagen que, por su peculiar topografía (alejadas del abrigo de la montaña) y por su menor altura (embolsamiento de aire frío), muestran temperaturas más bajas son aquéllas que se vieron más afectadas por la helada. Sin embargo, la correlación entre las dos imágenes no es total debido a la distinta resolución espacial de las bandas visibles y de la térmica, y a la distinta resistencia al frío de las variedades de cítricos.

Acabamos diciendo que la posibilidad de disponer de una metodología tal como la que presentamos en este trabajo es de gran importancia por los elevados costes económicos que supone hacer un reconocimiento directo en el campo de lo daños, que, por otra parte, nunca se realiza de forma completa.



Figura 3.— Imagen construida a partir de la diferencia ($IV_{MARZO}^* - IV_{MARZO}$) que, como se explica en el texto, es una medida del grado de afectación por el frío. En negro: zonas no cítrícolas; en azul oscuro; cítricos no afectados por el frío. La gradación de colores desde azul claro a rojo indica el crecimiento en el grado de afectación por el frío.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado, en parte, por la Consellería d'Agricultura i Pesca de la Generalitat Valenciana y por el proyecto de la CICYT A-172/85.

El Laboratorio de Semiconductores del Departament de Física Aplicada de la Universitat de València puso a nuestra disposición el monocromador Jobin-Yvon H20 por lo que agradecemos su colaboración.

BIBLIOGRAFIA

- Cariolis, C. de & Amodeo, P. 1980. Basic problems in the reflectance and emittance properties of vegetation, **Remote Sensing Applications in Agriculture and Hydrology**, Edited by G. Frayssé. A.A. Balkema, Rotterdam, 69 pp.
- Chávez, P.S. Jr. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data, **Remote Sensing of Environment**, **24**: 459-479.
- Clevers, J.G.P.W. 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index, **Remote Sensing of Environment**, **25**: 53-69.
- Colwell, J.E. 1974. Vegetation Canopy Reflectance, **Remote Sensing of Environment**, **3**: 175-183.
- Curran, P.J. 1980. Multispectral Remote Sensing of vegetation amount, **Progress in Physical Geography**, **4**: 315-341.
- Díaz, F. 1983. En **Práctica de la defensa contra las heladas**. Lérida, Ed. Dilagio: 90-96.
- Fuentes, J.L. 1983. **Apuntes de Meteorología Agrícola**: 159-162. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación,
- Gilabert, A., Gandía, S., Segarra, D & Meliá, J. 1987. Análisis multitemporal de los valores de reflectividad en cultivos cítricos mediante el sensor TM. En **I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección**. Barcelona 10-11 Diciembre.
- Gilabert, M.A. & Meliá, J. 1989. A simple geometrical model for analysing the spectral response of a citric canopy using satellite images, **International Journal of Remote Sensing**. En prensa.
- Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, **International Journal of Remote Sensing**, **7**: 1.417-1.434.
- Price, J.C. 1987. Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices, **Remote Sensing of Environment**, **21**: 15-27.
- Ranson, K.J. 1987. Scene shadow effects on multispectral response, **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **GE-25**, (4): 502-509.
- Segarra, D.; Gilabert, A., Gandía, S. & Meliá, J. 1988. Signature spectrale des agrumes et son evolution - Identification d'index de vegetation de moindre variation temporelle, En **Proceed. of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing**. Aussois, France, 18-22 January 1988 (ESA SP-287, April 1988).
- 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.