

## Corrección por emisividad de imágenes térmicas

J.A. SOBRINO y V. CASELLES

### RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un modelo para la determinación de la temperatura y emisividad efectivas de una superficie rugosa y heterogénea, como es el caso de las superficies cultivadas.

Así mismo se dan los valores de estos parámetros efectivos para el caso de observación radiométrica vertical en un campo de naranjos, y se estudia su aplicación al caso de las heladas por radiación.

Por último se analizan las variaciones que experimenta la emisividad efectiva en el caso de observación inclinada, calculándose su valor para diferentes cultivos y distintos tipos de suelos agrícolas.

### 1.- INTRODUCCION

En la radiometría del infrarrojo

térmico, las medidas tienen por objetivo la determinación de la emisividad de la superficie y/o de su temperatura. Pero, dependiendo de la naturaleza de la superficie objeto de estudio, la radiancia observada adopta expresiones bien diferentes (Becker, 1978).

Así para el caso de una superficie homogénea, la radiancia espectral medida,  $L_{\lambda}(\theta, \phi, T)$ , será:

$$L_{\lambda}(\theta, \phi, T) = \epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) L_{\lambda}^{\circ}(T) + [1 - \epsilon_{\lambda}(\theta, \phi)] L_{\lambda}(T_A) \quad (1)$$

donde  $\epsilon_{\lambda}(\theta, \phi)$  es la emisividad de la superficie observada,  $L_{\lambda}^{\circ}(T)$  es la radiancia de Planck a la temperatura  $T$ , y  $L_{\lambda}(T_A)$  es la radiancia atmosférica.

En la expresión 1, el primer término de la derecha indica la emisión propia de la superficie y el segundo la reflexión en ella de la radiancia atmosférica.

Como la medida de la temperatura realizada desde un satélite o avión se hace suponiendo que el medio observado se comporta como un cuerpo negro, es decir, que su emisividad sea la unidad, lo cual no es rigurosamente cierto, ya que la emisividad en la banda espectral de los 8 - 14  $\mu\text{m}$  para los distintos tipos de superficies observadas varía desde el 0'80 de un suelo arenoso al 0'98 de la vegetación, pasando por el 0'97 del agua y el 0'95 del suelo arcilloso (Caselles, 1983). Y como por cada 1% en que la emisividad difiere de la unidad, la diferencia entre la temperatura real y la suministrada por el satélite es de 0'6  $^{\circ}\text{C}$  (Becker, 1980). La importancia de que se corrijan las imágenes térmicas de este efecto es del todo evidente.

Ahora bien si el medio es heterogéneo, que es el caso más frecuente en teledetección, la emisividad y la temperatura pierden su significación en la medida, pues ya no podemos hablar de valores únicos debido a que el pixel observado está formado por la yuxtaposición de N medios homogéneos caracterizados por sus emisividades y temperaturas respectivas, ocupando cada uno una superficie,  $A_i$ , y emitiendo una radiancia  $L_{i\lambda}$ , dada por la expresión 1. En estas condiciones la radiancia emitida por el pixel observado desde el radiómetro bajo un ángulo sólido  $d\alpha$  viene dada por:

$$L_{\lambda} = \sum_{i=1}^N L_{i\lambda} \frac{d\alpha_i}{d\alpha} \quad (2)$$

siendo ( figura 1)  $d\alpha_i$  el ángulo sólido bajo el cual cada elemento de superficie,  $A_i$ , es visto por el radiómetro.

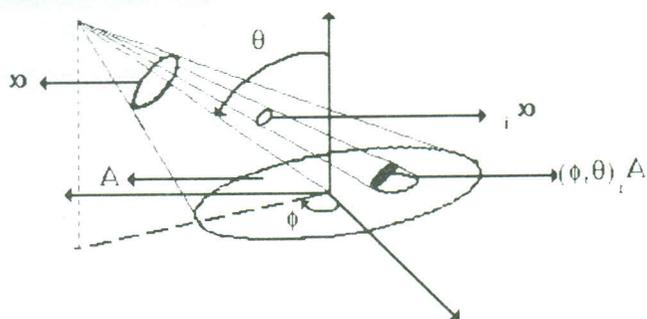


Figura 1.- Sistema de observación radiométrica desde el satélite.

Se hace necesario por tanto introducir, en observación desde satélites, donde el área de los pixeles va desde los 900  $\text{m}^2$  del Landsat-TM a los 25  $\text{km}^2$  del Meteosat, unos parámetros efectivos de emisividad y temperatura en orden a poder describir las superficies heterogéneas como si fueran homogéneas (Becker et al., 1981).

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo que permita determinar los parámetros efectivos de las superficies agrícolas, las cuales son además de heterogéneas rugosas. Por tanto, el modelo que aquí proponemos se basa en dos modelos previos, el de Sutherland y Bartholic (1977), desarrollado para superficies homogéneas en temperatura pero rugosas, y el de Becker y colaboradores (1981) que se aplica al caso de una superficie llana pero heterogénea en emisividades y temperatura.

## 2.- MODELO

Si suponemos al igual que Sutherland y Bartholic (1977), que la rugosidad superficial se puede aproximar por una sucesión de cajas lambertianas de longitud infinita, de anchura F, altura H y separación S, tal y como se indica en la figura 2. Se obtiene que la radiancia total medida cuando se observa una superficie de estas características desde una altura h sobre el suelo, con un radiómetro de campo de visión instantáneo  $\alpha$ , bajo la dirección  $(\theta, \phi)$ , es la suma ponderada de las radiancias procedentes de cada una de las partes constituyentes: el suelo,  $L_S(\theta, \phi)$ , la pared,  $L_P(\theta, \phi)$ , y el techo de la rugosidad,  $L_T(\theta, \phi)$ , en la forma :

$$L(h, \alpha, \theta, \phi) = P_S(h, \alpha, \theta, \phi) L_S(\theta, \phi) + \\ + P_P(h, \alpha, \theta, \phi) L_P(\theta, \phi) + \\ + P_T(h, \alpha, \theta, \phi) L_T(\theta, \phi) \quad (3)$$

donde  $P_S(h, \alpha, \theta, \phi)$ ,  $P_P(h, \alpha, \theta, \phi)$  y  $P_T(h, \alpha, \theta, \phi)$  son las proporciones de suelo, pared y techo observadas, que dependen de la geometría de observación y de las características del sensor.

Si despreciamos la reflexión múltiple, la radiancia procedente del suelo viene dada por la expresión (figura 3):

$$L_S(\theta, \phi) = \epsilon_S(\theta, \phi) L^\circ(T_S) + \\ + [1 - \epsilon_S(\theta, \phi)] \epsilon_V(\theta, \phi) L^\circ(T_P) F' \quad (4)$$

donde  $\epsilon_S(\theta, \phi)$  y  $\epsilon_V(\theta, \phi)$ , son las emisividades del suelo y la vegetación,  $F'$  es un factor de forma que nos proporciona la fracción de la radiancia que procedente de la pared llega al suelo (Caselles y Sobrino, 1988).  $T_S$ ,  $T_P$  son las temperaturas del suelo y pared de la rugosidad. Siendo el primer miembro del segundo término la radiancia emitida por el suelo y el segundo término, la radiancia que procedente de la pared se refleja en el suelo (figura 3).

Análogamente, la radiancia procedente de la pared viene dada por:

$$L_P(\theta, \phi) = \epsilon_V(\theta, \phi) L^\circ(T_P) + \\ + [1 - \epsilon_V(\theta, \phi)] \epsilon_V(\theta, \phi) L^\circ(T_P) F'' + \\ + [1 - \epsilon_V(\theta, \phi)] \epsilon_S(\theta, \phi) L^\circ(T_S) G \quad (5)$$

siendo el primer término del segundo miembro la radiancia emitida directamente por la pared, el segundo término la que procedente de una pared se refleja en la otra y el tercer término la radiancia que procedente del suelo se refleja en la pared.  $F''$  y  $G$  nos dan respectivamente las fracciones de radiación que procedente de una pared llega a la otra o del suelo a la pared (Caselles y Sobrino, 1988). Siendo por último, la radiancia procedente del techo simplemente :

$$L_T(\theta, \phi) = \epsilon_V(\theta, \phi) L^\circ(T_T) \quad (6)$$

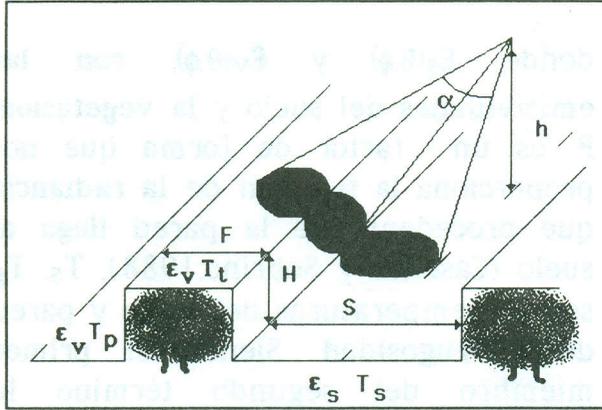


Figura 2.- Esquema de la observación de una superficie rugosa cuya geometría se ha simplificado por medio de cajas paralelepédicas de longitud infinita (Caselles y Sobrino, 1988).

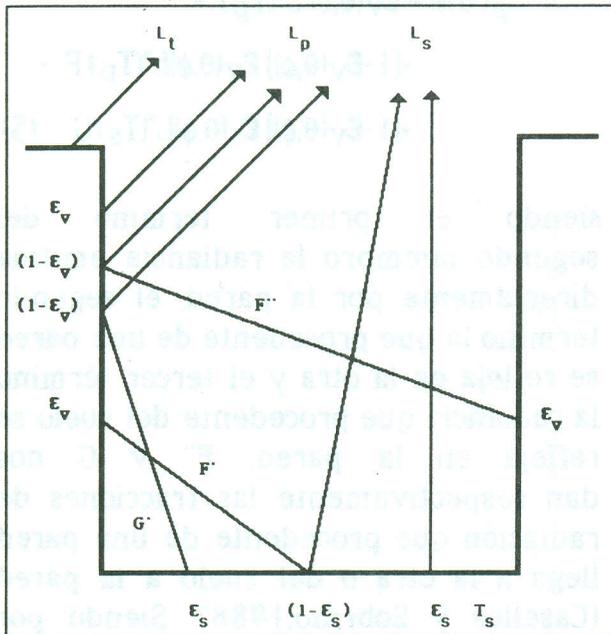


Figura 3.- Esquema de las diferentes contribuciones a la radiancia medida

Por tanto, si sustituimos las expresiones (4), (5) y (6) en la (3), y desarrollamos en serie de Taylor la expresión de la radiancia de Planck para cada componente, quedándonos únicamente en primera aproximación, se obtiene (Caselles et al, 1988):

$$L_{\lambda}(h, \alpha, \theta, \phi) = \epsilon_{\lambda}(h, \alpha, \theta, \phi) L'_{\lambda}(T) + [1 - \epsilon_{\lambda}(h, \alpha, \theta, \phi)] L_{\lambda}(T_A) + \Delta L_{\lambda} \quad (7)$$

donde  $L_{\lambda}(T_A)$  es la radiancia atmosférica, e  $\Delta L_{\lambda}$  estima la heterogeneidad del medio, siendo  $\epsilon_{\lambda}$  y  $T$  la emisividad y temperatura efectivas de la superficie, dadas por:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\lambda}(h, \alpha, \theta, \phi) = & P_S(h, \alpha, \theta, \phi) (\epsilon_S(\theta, \phi) + \\ & + \epsilon_V(\theta, \phi) [1 - \epsilon_S(\theta, \phi)] F') + \\ & + P_P(h, \alpha, \theta, \phi) (\epsilon_V(\theta, \phi) [1 + \\ & (1 - \epsilon_V(\theta, \phi)) F''] + \\ & + \epsilon_S(\theta, \phi) [1 - \epsilon_V(\theta, \phi)] G') + \\ & + P_t(h, \alpha, \theta, \phi) \epsilon_V(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T = & [\alpha_S P_S(h, \alpha) + (1 - \alpha_P) P_P(h, \alpha)] T_S + \\ & [\alpha_P P_P(h, \alpha) + (1 - \alpha_S) P_S(h, \alpha)] T_P + \\ & + P_t(h, \alpha) T_t \end{aligned} \quad (9)$$

con  $P_S(h, \alpha)$ ,  $P_P(h, \alpha)$  y  $P_t(h, \alpha)$  valores hemisféricos de  $P_S(h, \alpha, \theta, \phi)$ ,  $P_P(h, \alpha, \theta, \phi)$  y  $P_t(h, \alpha, \theta, \phi)$  y  $\alpha_S$  y  $\alpha_P$  parámetros que estiman, la influencia del suelo y de la pared de la vegetación.

Así a partir de las expresiones (8) y (9), se podrá definir el sistema radiante, caracterizado por su rugosidad y heterogeneidad, en función de su temperatura y emisividad efectivas, determinadas por las temperaturas y emisividades de las distintas partes que lo componen.

### 3.- RESULTADOS

El modelo propuesto se ha verificado en un campo de naranjos, realizando únicamente medidas en observación vertical ( $P_p=0$ ). En estas condiciones las ecuaciones 8 y 9 pasan a ser:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\lambda}(h, \alpha, \theta, \phi) = & P_s(h, \alpha, \theta, \phi) (\epsilon_s(\theta, \phi) + \\ & + \epsilon_v(\theta, \phi) [1 - \epsilon_s(\theta, \phi)] F') + \\ & + P_t(h, \alpha, \theta, \phi) \epsilon_v(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T = & P_s(h, \alpha) [\alpha_s T_s + (1 - \alpha_s) T_p] + \\ & + P_t(h, \alpha) T_t \end{aligned} \quad (11)$$

La determinación de los valores de la emisividad y temperatura efectivas, pasa necesariamente por evaluar cada uno de los diferentes parámetros que intervienen en las expresiones (10) y (11). Para ello realizamos medidas con un radiómetro AGA Thermopoint 80, que opera en la banda espectral de los 8-14  $\mu\text{m}$  con un campo de visión instantáneo de 2°, que permite medir la temperatura con un error de 0.3°C, situado en un sistema de barrido como muestra la figura 4, (Sobrino, 1986).

#### 3.1.- Emisividad efectiva de un campo de naranjos

El problema de la medida de las emisividades del suelo y de la vegetación, en el propio campo, se ha resuelto aplicando el método de la caja, desarrollado por Buettner y Kern (1965). Para ello hemos construido una caja en cuya base se situa la muestra de la que se quiere conocer su emisividad, de dimensiones (30 x 30 x 70) cm, con dos techos intercambiables (figura 5), en los que hemos practicado sendos orificios con la finalidad de acoplar en ellos el radiómetro, uno de aluminio pulido, al igual que las paredes laterales interiores de la caja, de emisividad 0.02, y otro de aluminio anodizado rugoso pintado de negro con el fin de conseguir una emisividad de 0.98 (Sobrino, 1986), de esta forma se consiguen temperaturas del orden de los 50 °C, utilizando para ello la radiación solar directa, lo que posibilita la medida "in situ" de las emisividades sin necesidad de acudir a fuentes de alimentación externas.

De esta forma podemos determinar, con sólo tres medidas, la emisividad sin más que aplicar la expresión:

$$\epsilon_s = (L_{t1}^{obs} - L_s^{obs}) / (L_{t1}^{obs} - L_{t1}^{2obs}) \quad (12)$$

donde  $L_{t1}^{obs}$  es la radiancia del techo de aluminio anodizado,  $t_1$ .

$L_s^{obs}$  es la radiancia de la muestra cuando se utiliza como tapa de la caja el techo de aluminio anodizado,  $t_1$ , y

$L_{obs_s}$  es la radiancia de la muestra cuando se utiliza como tapa de la caja el techo de aluminio pulido, t2.

Procediendo de esta forma hemos obtenido para la emisividad del suelo un valor de 0'96 y para la emisividad de la vegetación de 0'99 (Caselles et al, 1986), valores que están de acuerdo con los obtenidos por otros autores para suelo agrícola y vegetación (Idso y Jackson, 1969), (Klaassen y Nieuwenhuis, 1978).

Si tenemos en cuenta que en un campo de naranjos, el porcentaje medio de cobertura arbórea es del 60 %, lo que implica tomar  $P_s=0'4$  y  $P_v=0'6$ , y  $H/S=1'5$ , con lo que  $F'=0'23$ , se obtiene que la emisividad efectiva de un campo de naranjos en observación vertical es de 0'98.

### 3.2.-Temperatura efectiva de un campo de naranjos

Las temperaturas radiométricas del sistema compuesto por suelo y naranjo, la de la copa del naranjo, y la de la cavidad (espacio comprendido entre los naranjos de dos filas consecutivas) se determinaron, para tres noches en las que se dió un enfriamiento típicamente radiativo (cielo despejado y viento en calma), realizando un barrido, usando para ello el sistema de medida diseñado a tal efecto (figura 4).

Las temperaturas radiométricas del suelo y de la pared del naranjo se determinaron usando la caja construida para la medida de las emisividades, cuando ésta tenía como techo el de

aluminio pulido, para de esta forma prescindir de la influencia del ambiente.



Ver Foto color n.º 15 en página 368

Figura 4.-Sistema de barrido construido para la determinación de los parámetros efectivos de emisividad y temperatura en un campo de naranjos

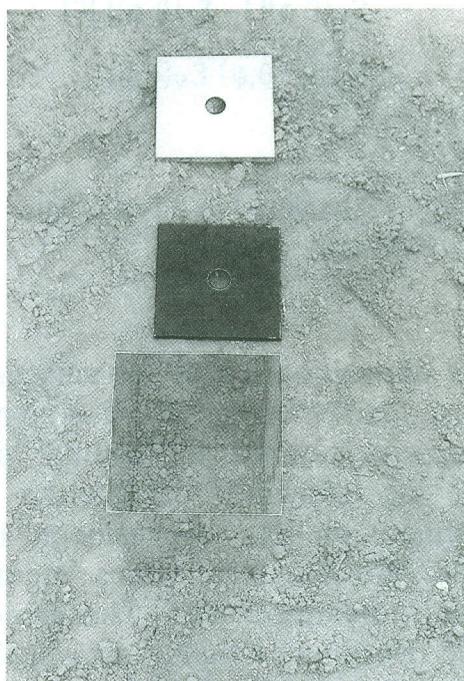


Figura 5.-Caja construida para la determinación de las emisividades del naranjo y del suelo.

Ver Foto color n.º 16 en página 368

El cálculo de las temperaturas reales, a partir de las radiométricas, se realizó de manera distinta según el sistema utilizado en la determinación de las temperaturas radiométricas (sistema de barrido o caja). Así la determinación de la temperatura reales para aquellas medidas radiométricas realizadas con el sistema de barrido se determinaron sin más que despejar la temperatura real,  $T_i$ , de la siguiente expresión :

$$L^\circ(T_i^R) = \epsilon_i L^\circ(T_i) + (1-\epsilon_i) L^\circ(T_{AR}) \quad (13)$$

Las temperaturas reales para aquellas medidas realizadas con la caja, se obtienen simplemente de :

$$L^\circ(T_i^R) = \epsilon_i L^\circ(T_i) \quad (14)$$

Asimismo, y con el objeto de determinar la influencia cuantitativa de la temperatura del suelo en la temperatura efectiva del sistema, hemos determinado para esas tres noches el valor del parámetro  $\alpha_s$  resultando ser 0'6 (Caselles et al,1988), de esta forma podemos expresar la ecuación 9 en función de las temperaturas reales, como:

$$T = 0'60 T_t + 0'16 T_p + 0'24 T_s \quad (15)$$

### 3.3.- Aplicación a la predicción de heladas

A la vista de los valores de las temperaturas reales del sistema suelo-naranja, el suelo, la pared y el techo de la vegetación (figura 6), si suponemos constantes las diferencias de temperaturas entre suelo y techo de

la vegetación con la pared de la misma, la ecuación (15) queda (Caselles et al,1988) :

$$T = T_p + 0'6 \Delta T_t + 0'24 \Delta T_s \quad (16)$$

como  $\Delta T_s = T_s - T_p = (5'5 \pm 0'6) ^\circ C$ , e  $\Delta T_t = T_t - T_p = (1'4 \pm 0'6) ^\circ C$ , la ecuación (14) puede expresarse en la forma:

$$T = T_p + C \quad (17)$$

con  $C = (2'2 \pm 0'4) ^\circ C$

Si comparamos los valores experimentales medidos al realizar un barrido radiométrico del sistema suelo-naranja con los obtenidos al sustituir la temperatura de la pared de la vegetación en la expresión (17), se obtiene una desviación cuadrática media entre ellos de  $0'7 \pm 0'5 ^\circ C$  (Caselles y Sobrino,1988), con lo que el modelo se cumple con una precisión del 1.2%. Lo cual es suficiente en la mayoría de las aplicaciones agronómicas.

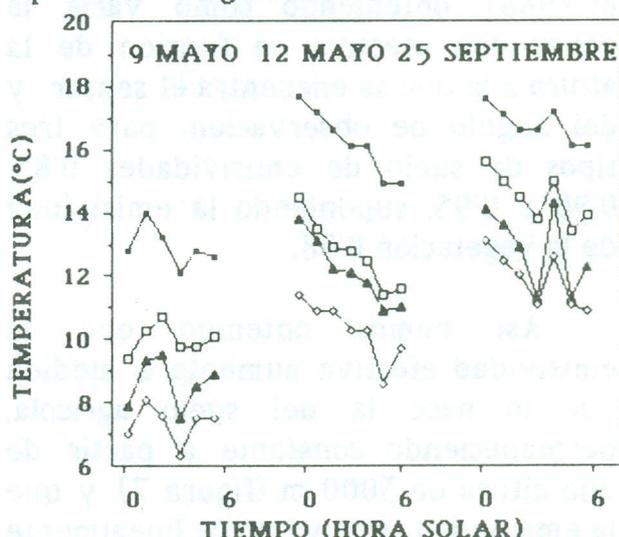


Figura 6.- Valores de la temperatura del sistema (-□-), techo (-▲-), pared de la vegetación (-○-) y suelo (-■-), para tres noches típicas de enfriamiento radiativo (Caselles et al., 1988).

Por otra parte y debido a que la temperatura del sistema radiante suelo-naranja, simula la temperatura tomada por el satélite,  $T_{sat}$ , se obtiene finalmente:

$$T_p = T_{sat} - C' \quad (18)$$

con  $C' = (2.9 \pm 0.6) ^\circ C$

y debido a que el fruto del naranja se hiela a  $(-2.3 \pm 0.4) ^\circ C$  (Gandía et al, 1987), podemos establecer, de acuerdo con el modelo propuesto, un límite de seguridad para la naranja siempre que la temperatura que mida el satélite sea mayor o igual que  $1^\circ C$ .

### 3.4.- Análisis de la emisividad efectiva

Hemos realizado así mismo un estudio teórico del comportamiento de la emisividad efectiva para el caso de observación inclinada (Sobrino et al, 1988), obteniendo como varía la emisividad efectiva en función de la altura a la que se encuentra el sensor y del ángulo de observación, para tres tipos de suelo de emisividades 0.85, 0.90 y 0.95, suponiendo la emisividad de la vegetación 0.98.

Así hemos obtenido que la emisividad efectiva aumenta a medida que lo hace la del suelo agrícola, permaneciendo constante a partir de una altura de 5000 m (figura 7), y que la emisividad efectiva crece linealmente con el ángulo de observación del satélite hasta llegar a un valor constante que coincide con el de la vegetación, así en el caso de que el satélite utilizado sea un NOAA esta constancia se observa a partir de los  $35^\circ$  (figura 8).

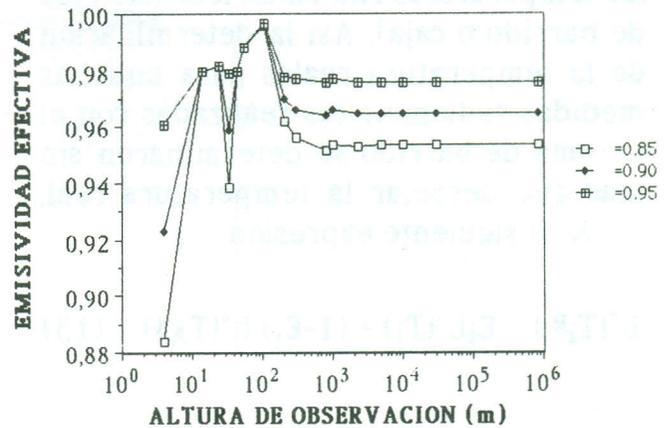


Figura 7.- Valores de la emisividad efectiva para diferentes alturas del sensor del satélite y para tres suelos agrícolas distintos.

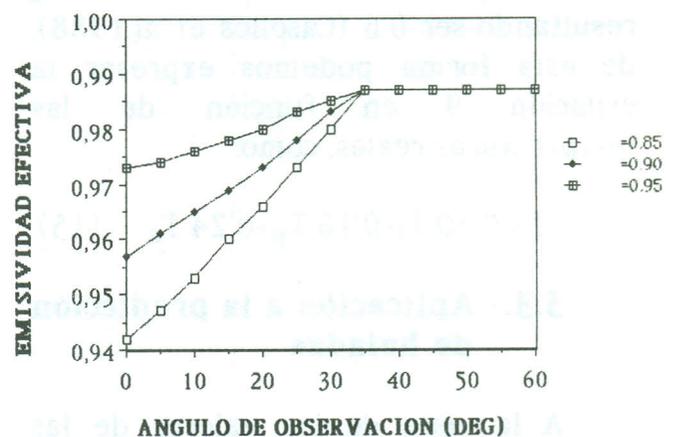


Figura 8.- Emisividad efectiva frente al ángulo de observación para tres suelos agrícolas diferentes.

#### 4.- AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud al Profesor F. Becker de la Universidad de Estrasburgo (Francia) por la ayuda prestada en el desarrollo del modelo, al Profesor V. Gandía por las facilidades dadas para la utilización del campo de naranjos y a la DGICYT por la ayuda económica concedida (Proyecto nº A-172/85).

#### 6.- BIBLIOGRAFIA

BECKER, F., 1978. Principes physiques et mathématiques de la télédétection. C.N.E.S., Toulouse (Francia).

BECKER, F., 1980. Thermal infra-red remote sensing principles and applications (In: Remote Sensing Application in Agriculture and Hidrology). Balkema, Rotterdam. (Holanda).

BECKER, F., NAGAI, W. and STOLL, M. P., 1981. An active method for measuring thermal infrared effective emissivities: implications and perspectives for remote sensing. Adv. Space Res. 1, 193-210.

BUETTNER, K. J. K. and KERN, C. D., 1965. The determination of infrared emissivities of terrestrial surfaces. J. Geophys. Res. 70, 1329-1337.

CASELLES, V., 1983. Estudio de las medidas radiométricas realizadas desde satélites

artificiales. Aplicación a la agrometeorología. Tesis Doctoral, Universitat de València.

CASELLES, V., SOBRINO, J. A. and MELIA, J., 1986. Thermal infrared images from satellites compared to shelter temperature. Application to frost nowcasting in a citrus orchard. Proceedings of the ESA/EARSeL Symposium: "Europe from Space", ESA SP-258, Lyngby, p. 253.

CASELLES, V. and SOBRINO, J. A., 1988. Significado físico de la medida de temperatura obtenida por teledetección. Anales de Física (B). (en prensa).

CASELLES, V., SOBRINO, J. A. and BECKER, F., 1988. Determination of the effective emissivity and temperature under vertical observation of a citrus orchard. Application to frost nowcasting. Int. J. Remote Sensing (en prensa).

GANDIA, V., SERRADELL, M., and GANDIA, S., 1987. Freezing temperatures of a citrus leaves. Proceedings of the First International Meeting on Agriculture and Weather Modification. Consejería de Agricultura de la Junta de Castilla y León, León, p. 287.

IDSO, S. B. and JACKSON, R. D., 1969. Comparison of two methods for determining infrared emittances of bare soils. J. Appl. Meteor. 8, pp. 168-169.

KLAASSEN, W. and NIEUWENHUIS, G. J. A., 1978. Estimation of the regional evapotranspiration from remotely sensed crop surfaces temperatures. Part II: arable land, Report n. 1057, Institute for Land and Water Management Research, Wageningen NL.

SOBRINO, J. A., 1986. Determinación de los parámetros efectivos de emisividad y temperatura en un campo de naranjos. Tesis de Licenciatura, Universitat de València, 145 pp.

SOBRINO, J. A., CASELLES, V. and BECKER, F., 1988. A Theoretical model for interpreting remotely sensed thermal infrared measurements obtained over agricultural areas. ESA SP. 287 (en prensa).

SUTHERLAND, R. A. and BARTHOLIC J. F., 1977. Significance of vegetation in interpreting thermal radiation from a terrestrial surface. *J. Appl. Meteor.* 16, 759-763.