

La utilidad del infrarrojo térmico en el estudio de la degradación de la superficie de la tierra. Primeros resultados de los proyectos EFEDA, HAPEX-SAHEL y DEMON

V. Caselles, C. Badenas, C. Coll, E. Rubio, J. A. Sobrino, E. Valor

Departament de Termodinàmica. Facultat de Física
Universitat de València

RESUMEN

El infrarrojo térmico es el dominio espectral menos utilizado en teledetección. No obstante, presenta un enorme potencial en estudios integrados al combinarlo con otros índices del dominio óptico o/y microondas. La razón de ello es, a nuestro modo de entender, la ausencia de modelos operativos que permitan determinar la temperatura de la superficie de la tierra a partir únicamente de datos de satélite. En este trabajo presentamos el modelo operativo que hemos desarrollado y mostramos algunas aplicaciones del mismo en zonas experimentales bien distintas, en las que tuvieron lugar los proyectos EFEDA, HAPEX-Sahel y DEMON de Comunidades Europeas. Se concluye apuntando algunas ideas sobre posibilidades del infrarrojo térmico en el estudio de la degradación de la superficie de la tierra.

ABSTRACT

Thermal infrared is the spectral domain less used in remote sensing. Nevertheless, it presents a big potential for integrated studies when it is combined with optical and microwaves indices. According to our opinion, the reason of that is the absence of operative models which permit us to determine land surface temperature using satellite data only. In this work we present the operative model developed by us and show some applications in different experimental areas where the EFEDA, HAPEX-Sahel and DEMON projects supported by the European Communities were carried out. We concluded the work giving some ideas about possibilities of the thermal infrared in land degradation studies.

Introducción

El infrarrojo térmico es, sin duda alguna, el dominio espectral menos utilizado en teledetección. Es curioso comprobar el número de trabajos que se presentan en un congreso de teledetección como éste que utilizan la temperatura, frente a la enorme cantidad de presentaciones en las que aparece el dominio óptico a través, por ejem-

plo, de la reflectividad o del índice de vegetación. La razón de ello está, según nuestra opinión, en la dificultad de la medida radiométrica de la temperatura y en la ausencia de modelos operativos que permitan determinar la temperatura de la superficie terrestre a partir de las medidas realizadas desde satélites. No obstante, el infrarrojo térmico presenta un gran potencial en estudios integrados (como es el caso de la degradación de la superficie de la tierra), al combinarlo con índices propios de otros dominios, como el óptico y/o las microondas.

El objetivo del presente trabajo es mostrar las posibilidades que tiene el infrarrojo térmico en estudios relacionados con la degradación de la superficie terrestre, como un ejemplo bien claro de cómo debe usarse la temperatura en estudios de tipo integrado. La exposición de esta comunicación la hemos dividido en tres partes bien diferentes: primero daremos a conocer un modelo operativo de cálculo de la temperatura de la superficie terrestre que usa únicamente datos del satélite NOAA, que ha sido desarrollado en nuestro grupo en los últimos años; en segundo lugar mostraremos algunas aplicaciones del mismo en zonas climáticas bien distintas (Valencia, La Mancha y el Níger), donde se llevaron a cabo tres proyectos de investigación subvencionados por Comunidades Europeas (DEMON, EFEDA y HAPEX-Sahel); y finalmente apuntaremos algunas ideas sobre cómo deben combinarse los tres dominios espectrales –óptico, térmico y microondas– cuando se realizan estudios integrados como en el caso de la degradación superficial de la tierra.

Modelo operativo desarrollado

El modelo que hemos desarrollado en nuestro grupo es un método de tipo bicanal o split-window, que se basa en la ecuación clásica:

$$T = T_1 + A(T_1 - T_2) + B \quad (1)$$

donde T_1 y T_2 son las temperaturas medidas por el satélite en dos canales espectrales diferentes, como los canales 4 y 5 del AVHRR del NOAA o del ATSR del ERS-1, T es la temperatura de la superficie del suelo, y A y B son dos coeficientes que evalúan, respectivamente, el efecto de la atmósfera y de la emisividad y que vienen dados por (Caselles et al., 1994):

$$A = 1.0 + 0.58 (T_1 - T_2) \quad (2)$$

$$B = 0.51 + 40 (1 - \epsilon) - \beta \Delta \epsilon \quad (3)$$

donde ϵ es la emisividad en la banda espectral 10.5-12.5 μm , $\Delta \epsilon$ es la diferencia entre las emisividades de los canales 1 y 2 ($\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$), y β es un parámetro que depende

de las condiciones atmosféricas y se determina de dos posibles formas: (1) estimando el vapor de agua atmosférico a través de un radiosondeo meteorológico clásico o mediante los datos del sensor TOVS (ver figura 1), o bien (2) calculando el cociente entre covarianzas de T_1 y T_2 y la varianza de T_1 sobre matrices de 20 píxeles x 20 píxeles (ver Sobrino et al., 1993 para más detalles) y aplicando la relación dada en la figura 2.

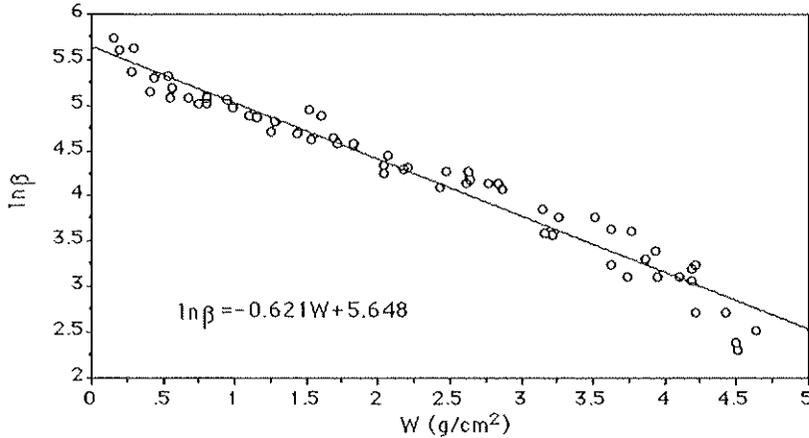


Figura 1
Variación del coeficiente b de la ecuación (3) en función del contenido en vapor de agua atmosférico, W

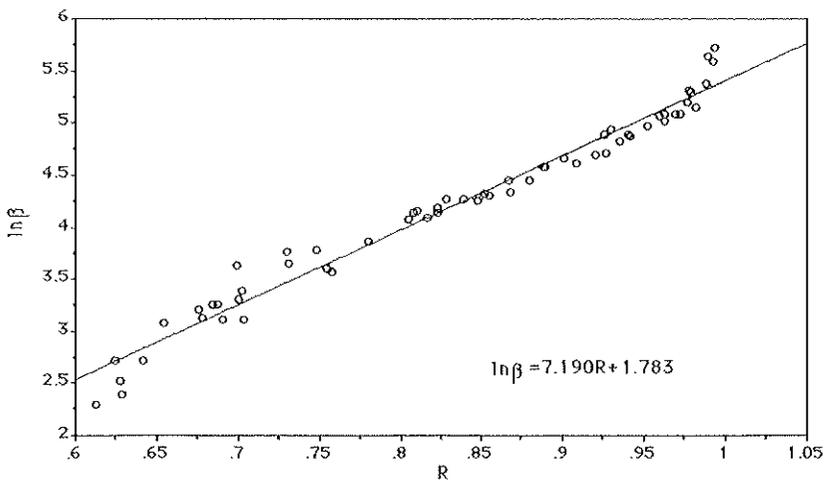


Figura 2
Variación del logaritmo del coeficiente b de la ecuación (3) en función del cociente entre la covarianza de T_1 y T_2 y la varianza de T_1 es decir

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N (T_{1k} - T_{10})(T_{2k} - T_{20})}{\sum_{k=1}^N (T_{1k} - T_{10})^2}$$

donde T_{10} y T_{20} son dos temperaturas de referencia.

Los mapas de ε y $\Delta\varepsilon$ necesarios para poder aplicar la relación (3) se calculan siguiendo las ecuaciones:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) \quad (4)$$

$$\Delta\varepsilon = b_1 (T_a^* - T_s^*) - b_2 (1 - \varepsilon) \quad (5)$$

donde la cobertura vegetal, P_v , se estima a partir de una imagen de NDVI renormalizado (cuya definición aparece en el apéndice), las emisividades del suelo y de la vegetación, ε_v y ε_s , se miden en el campo utilizando el método de la caja (Caselles et al. 1993), los coeficientes b_1 , b_2 , T_a^* y T_s^* de la ecuación (5) se calculan con el programa de simulación atmosférica LOWTRAN y el perfil atmosférico del vapor de agua obtenido clásicamente o mediante el TOVS (ver Coll et al., 1993 para más detalles).

El software desarrollado por nuestro grupo permite la determinación de la temperatura de forma automática, lo ponemos a disposición del lector que pueda estar interesado en utilizarlo para su investigación.

Validación y aplicación del modelo

En los dos últimos años hemos realizado validaciones del modelo propuesto, tanto en mar como en tierra, en distintas latitudes. La figura 3 muestra a modo de ejemplo dos de las experiencias de validación llevadas a cabo en Australia y el Mediterráneo.

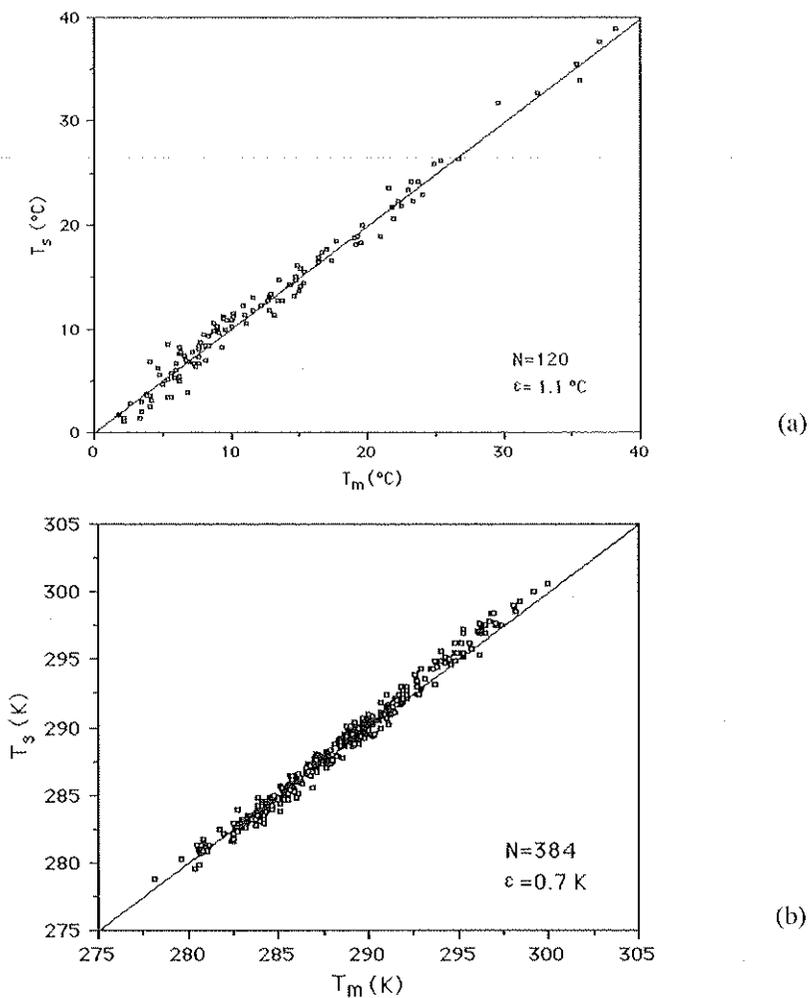


Figura 3

Valores medidos, T_s , frente a calculados según el modelo, T_m , para dos experiencias de validación realizados en Australia (a) y el Mediterráneo (b)

La tabla I muestra los errores de nuestro modelo junto a los de otros modelos tipo split-window, obtenidos en otra experiencia también llevada a cabo en Australia. Se observa que el nuestro es el que menor error proporciona de los seis analizados.

| Autor | Error medio (K) | Máximo | Mínimo |
|------------------------------|-----------------|--------|--------|
| Price (1984) | -2,2±0,3 | -1,5 | -3,0 |
| Ulivieri y Cannizzaro (1985) | -1,7±0,2 | -1,1 | -2,4 |
| Becker y Li (1990) | 1,4±0,2 | 1,9 | 0,8 |
| Prata y Pratt (1991) | -0,7±0,2 | -0,2 | -1,3 |
| May et al. (1992) | -1,6±0,2 | -1,0 | -2,2 |
| Caselles et al. (1994) | 0,2±0,1 | 0,1 | -0,4 |

Tabla I

Comparación del algoritmo propuesto con otros. Se indica el valor medio del error en la determinación de la temperatura de la superficie, expresado como diferencia entre el valor del modelo y la medida "in situ"; se han indicado también los valores máximo y mínimo del error

Como resultado de las diferentes experiencias de validación se ha obtenido que el modelo proporciona la medida de la temperatura de la superficie con un error en torno al grado, el cual es más que suficiente para la mayor parte de las aplicaciones.

A modo de ejemplo, en la figura 4 hemos dado algunos resultados en forma de mapas de las diferentes aplicaciones del modelo que hemos llevado a cabo hasta el momento. Así la figura 4a muestra el mapa de emisividades de la zona de Barrax (proyecto EFEDA), un área de 10 x 10 km² situada en las proximidades de Al-bacete. La comprobación de los resultados del mapa se hizo por comparación con medidas tomadas "in situ", siendo la diferencia media entre valores calculados y medidos inferior a 0.005, cifra que coincide con el error de medida. La figura 4b representa un mapa de $\Delta\epsilon$ correspondiente a la zona experimental del proyecto DEMON, que se obtuvo a partir de los radiosondeos realizados en Mallorca, Murcia y Barrax. Finalmente, la figura 4c es un mapa de temperatura de la superficie terrestre correspondiente al área experimental del proyecto HAPEX-Sahel, de 100 x 100 km² situada en la zona africana de transición entre el desierto y la savana (Níger).

Estudio de la degradación

Una vez desarrollado el método operativo de cálculo de la temperatura, estamos en condiciones de aplicarlo al estudio de la degradación de la superficie del suelo. Como en la mayoría de los estudios integrados, pensamos que la combinación de la temperatura con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) podría ser

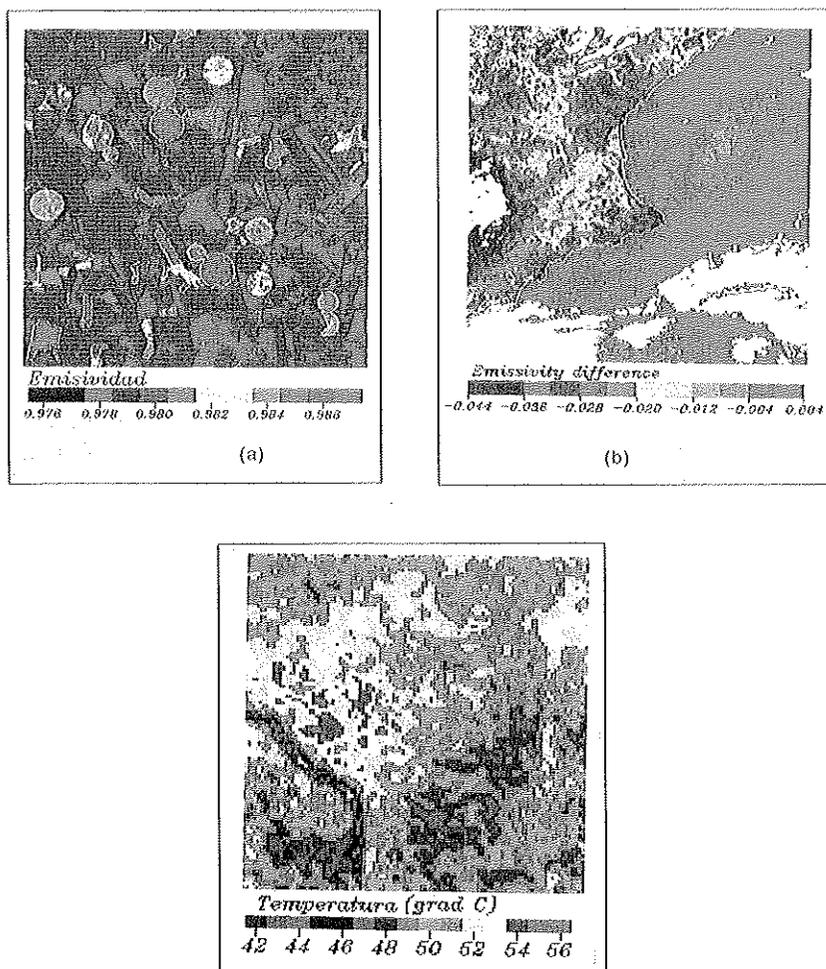


Figura 4

Ejemplos de aplicación del modelo:(a) mapa de emisividades de Barrax, (b) mapa de De de la región valenciana,(c) mapa de temperaturas del Níger. (A. 92)

una buena solución. Ahora bien, creemos que este ajuste debe realizarse normalizando previamente tanto la temperatura como el índice de vegetación, pues de lo contrario la relación no sería universal (ver detalles matemáticos en el apéndice); y que habrá que introducir además un parámetro clasificador que podría ser la humedad del suelo, el cual se obtendría a partir de las medidas realizadas en el dominio de las microondas. Un esquema de esta idea viene dado en la figura 5, donde hemos representado como sería el camino (o caminos) hacia la degradación superficial utilizando como parámetros susceptibles de ser medidos por teledetección espacial la temperatura,

el NDVI y la humedad del suelo. El resultado es por el momento únicamente teórico, y que tomará total validez una vez que lo podamos comprobar con datos experimentales de los tres proyectos en los que estamos participando. No se ha podido hacer aún, pues las bases de datos se están completando ahora por los diferentes grupos participantes. Confiamos poder presentar estos resultados en la reunión de Valladolid de 1995.

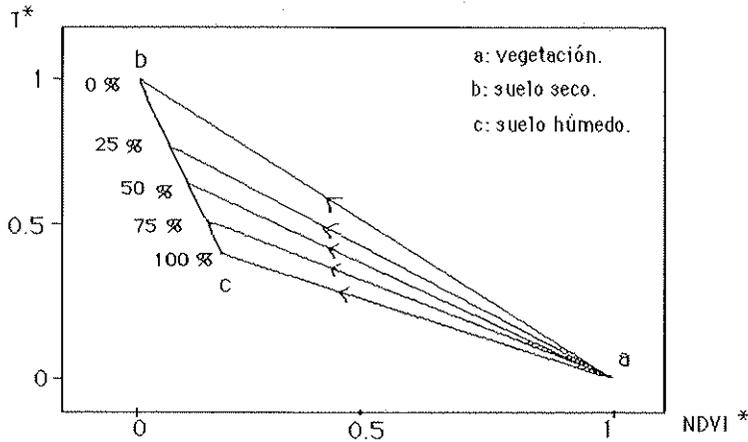


Figura 5
Esquema de la evolución de la degradación del suelo

Conclusiones

Se ha desarrollado un método operativo que permite determinar la temperatura de la superficie utilizando únicamente datos del satélite NOAA, siendo su error del orden del grado (suficiente para la mayoría de las aplicaciones). La validación y aplicación del método se ha realizado en zonas de características atmosféricas y de emisividad bien diferentes, como es el caso del mar, la región valenciana, La Mancha, o la región de Sahel. En todas ellas se han obtenido resultados satisfactorios, lo que nos ha animado a realizar aplicaciones en otras zonas. Finalmente, se ha apuntado la idea de la combinación de la temperatura con el NDVI (ambos normalizados), utilizando la humedad del suelo como parámetro adicional, para estudiar la degradación del suelo. La comprobación de esta idea teórica es el objetivo inmediato de nuestro grupo.

Agradecimientos

La investigación presentada no hubiera sido posible sin la financiación de la CCE (Proyectos EPOC-CT-90-0030, EV5V-CT-91-0033/0035) y la colaboración de F. Prata (CSIRO, Australia), R. Garrido (INM, Murcia), Le Borgne (CMS, Lannion), E.P.

McClain (NOAA) y el Air Force Geophysics Laboratory (Massachusetts, USA), quienes nos suministraron los datos para la validación del modelo y el programa LOWTRAN, respectivamente. A todos ellos nuestro más sincero agradecimiento.

Apéndice

En un píxel mixto se cumple, en una primera aproximación, que tanto la temperatura como el NDVI son combinaciones lineales ponderadas de las temperaturas e índices de vegetación de la vegetación y el suelo, siendo el coeficiente de peso la proporción de vegetación (la cobertura vegetal). Lo que se expresa mediante las ecuaciones:

$$\text{NDVI} = P_v \text{NDVI}_v + (1 - P_v) \text{NDVI}_s \quad (\text{A.1})$$

$$T = P_v T_v + (1 - P_v) T_s \quad (\text{A.2})$$

combinando ambas ecuaciones se obtiene una relación lineal entre T y NDVI dada por

$$T = a - b \text{NDVI} \quad (\text{A.3})$$

donde $a = T_{\text{máx}} + b \text{NDVI}_{\text{mín}}$ y $b = (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) / (\text{NDVI}_{\text{máx}} - \text{NDVI}_{\text{mín}})$, siendo $T_{\text{máx(mín)}}$ y $\text{NDVI}_{\text{mín(máx)}}$ los valores correspondientes al suelo (vegetación), es decir donde $P_v = 0$ ($P_v = 1$), que se obtienen del histograma de las imágenes de T y NDVI.

La validez del modelo descrito por la ecuación (A.3) ha sido comprobado con los valores experimentales dados por Price (1990) y Nemani et al. (1993).

Si por el contrario despejamos P_v de (A.1) y (A.2), se obtendría la relación normalizada entre T y NDVI, que es:

$$T^* = \text{NDVI}^* \quad (\text{A.4})$$

siendo $\text{NDVI}^* = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{mín}}) / (\text{NDVI}_{\text{máx}} - \text{NDVI}_{\text{mín}})$ y

$T^* = (T_{\text{máx}} - T) / (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})$, los valores normalizados del NDVI y T.

Bibliografía

- Becker, F. and Li, Z.L.: 1990. Towards a local split-window method over land surface. *Int. J. Remote Sens.* 3: 369-393.
- Caselles, V., Sobrino, J.A. and Valor, E.: 1993. A simple method for measuring and mapping thermal infrared emissivities. En *Thermal Remote Sensing*. La Londe Les Maures. The

Pennsylvania State University (USA), CRPE (Francia) and CEMAGREF (Francia). (en prensa)

Caselles, V. et al.: 1994. Estimating the land surface temperature in the split-window channels of AVHRR/2. *Remote Sens. Environ.* (enviado)

Coll, C., Caselles, V. and Schmugge, T.J.: 1993. Estimation of land surface emissivity differences in the split-window channels of AVHRR. *Remote Sens. Environ.* (en prensa)

May D.A. et al.: 1992. A correction for Saharan dust effects on satellite sea surface temperature measurements. *J. Geophys. Res.* 97: 3611-3619.

Nemani, R. et al.: 1993. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *J. Appl. Meteorol.* 32: 548-557.

Prata, A.J. and Pratt, C.M.R.: 1991. Land surface temperature measurements from the AVHRR. En *5th AVHRR Data Users Conference*. Tromso, Norway. pp. 433-438. EUMETSAT, Darmstadt, Germany.

Price, J.C.: 1984. Land surface temperature measurements from the split-window channels of the NOAA-7 AVHRR. *J. Geophys. Res.* 79: 5039-5044.

Price, J.C.: 1990. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evotranspiration. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* 28: 940-948.

Sobrino, J.A. et al.: 1993. Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.* (en prensa)

Ulivieri, C. y Cannizzaro, G.: 1985. Land surface temperature retrievals from satellite measurements. *Acta Astronáutica*, 12: 977-985.