

Desarrollo de una ecuación operativa para el cartografiado de la emisividad

V. Caselles, E. Valor, C. Coll, E. Rubio, M.M. Artigao, R. Niclòs y L. Martínez

Correo electrónico: Vicente.Caselles@uv.es

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

RESUMEN

Basándose en el Método de la Cobertura Vegetal, desarrollado por Valor y Caselles (1996), se propone una expresión operativa para el cartografiado de la emisividad de la superficie terrestre. Esta ecuación fue validada para tres sensores diferentes (AVHRR, TM y DAIS) y cuatro zonas experimentales distintas (Turco en Bolivia, Barrax en Albacete, Bunyol en Valencia y Alpillen en Francia); obteniéndose un error de estimación de la emisividad de 0,011 para la región espectral 10,5-12,5 μm y de 0,02 para la banda 8-9 μm . Estos resultados confirman la efectividad del Método de la Cobertura Vegetal a la vez que establecen el límite superior de su error.

PALABRAS CLAVE: emisividad, 8-9 μm , 10,5-12,5 μm , temperatura, AVHRR, TM, DAIS.

ABSTRACT

We propose an operational expression to map the land surface emissivity, based on the Vegetation Cover Method, developed by Valor and Caselles (1996). The equation was validated for three different sensors (AVHRR, TM and DAIS) and four experimental zones (Turco in Bolivia, Barrax in Albacete, Bunyol in Valencia and Alpillen in France). Estimation errors of 0.011 for the 10.5-12.5 μm spectral region and of 0.02 for the 8-9 μm band were obtained. These results confirm the Vegetation Cover Method effectiveness at the same time as they establish the upper limit of its error.

KEYWORDS: emissivity, 8-9 μm , 10.5-12.5 μm , temperature, AVHRR, TM, DAIS.

INTRODUCCIÓN

La obtención de medidas precisas de temperatura de la superficie terrestre por teledetección exige el conocimiento de la emisividad de las superficies bajo observación. En concreto, cualquier método de corrección atmosférica y de emisividad, sea monocanal o split-window, contiene una dependencia explícita de la emisividad, la cual debe ser estimada independientemente.

Ahora bien, tanto la emisividad como la temperatura se encuentran acopladas en la radiancia emitida por una superficie, de modo que un sensor con N canales proporciona N ecuaciones (o medidas), para un problema de N+1 incógnitas (N emisividades más la temperatura). La consecuencia es que el sistema de ecuaciones a resolver resulta indeterminado, y de ahí la necesidad de introducir algún tipo de hipótesis que permita la separación de ambas variables. Para resolver esta cuestión se han propuesto diferentes alternativas, tanto de tipo cualitativo, mediante técnicas de procesamiento de imágenes (Soha y Schwartz, 1978; Gillespie et al., 1986), como cuantitativos, donde es posible obtener el valor relativo o absoluto de la emisividad. Éstos requieren el uso de hipótesis adicionales: (1) consideración de emisividad constante temporal o espectralmente (Watson, 1992a; Kahle et al., 1980), (2) relación entre cocientes de radiancias y emisividades entre bandas contiguas (Watson, 1992b), (3) cálculo de la diferencia de emisividad

entre bandas en base a radiosondeos (Coll et al., 1994), (4) combinación de los anteriores en el algoritmo TES (Gillespie et al., 1998), (5) uso de índices espectrales térmicos, como el TISI (Li y Becker, 1993) y las alfas residuales (Kealy y Hook, 1993) y (6) búsqueda de relaciones entre la información obtenida en las regiones visible/infrarrojo próximo, e infrarrojo térmico. En esta última línea, podemos considerar la relación empírica entre la emisividad y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Van de Griend y Owe, 1993), la simulación de sistemas a nivel microscópico (Anton y Ross, 1990; Olioso, 1995) y la relación de la emisividad con el porcentaje de cobertura vegetal observado en la superficie, base del Método de la Cobertura Vegetal (MCV) (Valor y Caselles, 1996). En este trabajo se presenta una formulación operativa del MCV en la que se propone el uso de coeficientes medios para determinar la emisividad, y se aborda su validación en las regiones espectrales 10,5-12,5 μm y 8-9 μm , llevada a cabo con datos tomados en distintas áreas con instrumentos diferentes.

LA EXPRESIÓN OPERATIVA DEL MCV

El MCV define la emisividad efectiva de una superficie heterogénea y rugosa, modelando tal superficie como una distribución regular de ele-

mentos vegetales sobre un determinado suelo (Valor, 1997). Cada elemento vegetal se representa mediante una caja de paredes lambertianas, con longitud L , altura H , y separadas una distancia S . La radiancia emitida por el sistema es un promedio de las radiancias emitidas por cada elemento, bien directamente, bien a través de reflexiones entre los elementos del sistema. Teniendo en cuenta estas hipótesis, la emisividad efectiva para el canal i es (Valor y Caselles, 1996):

$$e_i = e_{i0} + de_i \tag{1}$$

donde e_{i0} se relaciona con la radiancia directamente emitida por los elementos de la superficie,

$$e_{i0} = e_{iv} P_v + e_{ig} (1 - P_v) \tag{2}$$

siendo e_{iv} y e_{ig} las emisividades de vegetación y suelo en el canal i respectivamente, y P_v la cobertura vegetal en el píxel. El término de cavidad, de_i , toma en cuenta la radiancia emitida indirectamente por la superficie, a través de reflexiones (de primer orden) que tienen lugar en las cavidades definidas por la superficie rugosa, como consecuencia de que las superficies naturales no son cuerpos negros perfectos,

$$de_i = (-e_{ig}) e_{iv} F (1 - P_v) + e_{ig} (1 - P_v) + [(1 - e_{iv}) e_{ig} G + (1 - e_{iv}) e_{iv} F'] P_s \tag{3}$$

en el que P_s es la proporción lateral de los elementos vegetales observada por el sensor, y F , G , y F' son los factores de forma, que representan la fracción de radiación que emitida por la vegetación alcanza el suelo, la proporción que emitida por el suelo alcanza el lateral de los elementos vegetales, y la fracción que llega a un elemento vegetal desde otro elemento contiguo a él. Dichos factores de forma dependen de la geometría de la superficie a través del cociente H/S (Valor y Caselles, 1996). Estas ecuaciones permiten la obtención de la emisividad térmica en cualquier canal espectral, empleando para ello una estimación de la cobertura vegetal a escala de píxel, magnitud que puede obtenerse mediante medidas realizadas en el dominio óptico.

Para poder efectuar un cálculo preciso del término de cavidad se necesita una buena descripción de la geometría de la superficie, información que no siempre se encuentra disponible. Por ello resulta conveniente buscar una simplificación de dicho término, de modo que dependa de menos parámetros y cuya aplicación sea más sencilla. Con este objetivo, se ha analizado el valor del término de cavidad considerando un amplio intervalo de estructuras y emisividades que engloben el mayor número de casos posibles: (i) emisividad del suelo entre 0,95 y 0,98, y emisividad de la vegetación fija en 0,985, como consecuencia del comportamiento espectral observado en las superficies vegetales (Salisbury y D'Aria, 1992); (ii) estructuras

geométricas diversas, considerando desde hierba hasta bosques; y (iii) ángulos de observación desde 0° a 60° . Los cálculos se han realizado con el modelo geométrico de la Figura 1 (Valor, 1997).

La Figura 2 muestra la variación del término de cavidad con el porcentaje de cobertura vegetal, para diferentes tipos de estructuras de la superficie. Este resultado sugiere una posible aproximación para el término de cavidad mediante el uso de una función parabólica dotada de un valor promedio para describir el valor máximo del término de cavidad. Con esto, la emisividad de canal quedaría:

$$e_i = e_{iv} P_v + e_{ig} (1 - P_v) + 4 \langle de_i \rangle P_v (-P_v) \tag{4}$$

donde $\langle de_i \rangle$ es el término de cavidad máximo para cada estructura superficial considerada. Físicamente, esta aproximación sustituye una superficie heterogénea por una estructura vegetal media con un máximo del término de cavidad dado por $\langle de_i \rangle$, y con una separación entre sus elementos variable con P_v .

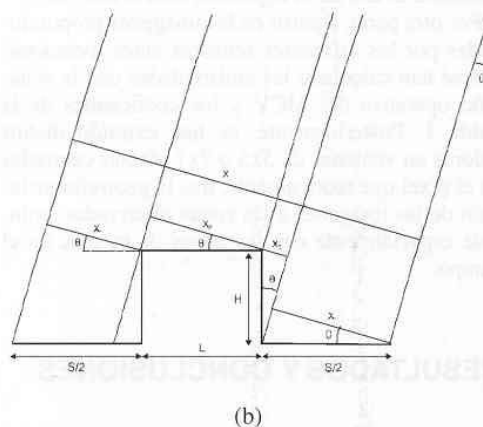
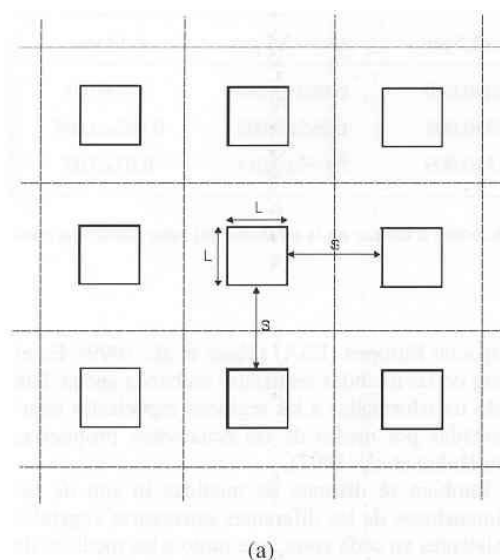


Figura 1. Modelo geométrico de la superficie terrestre usado para el análisis del término de cavidad: (a) visión nadir, (b) sección de la celda unidad

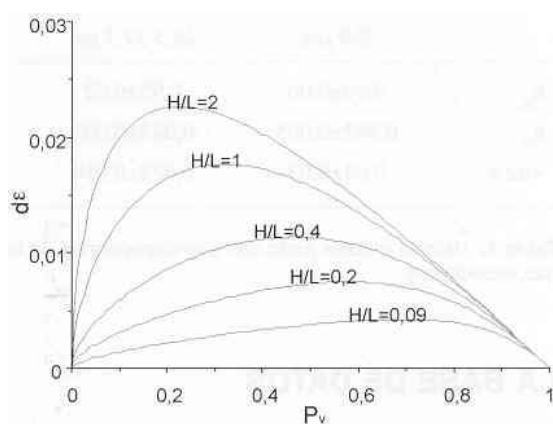


Figura 2. Dependencia del término de cavidad con la cobertura vegetal para distintas estructuras de la superficie (H/L), considerando visión nadir y emisividades $\epsilon_g=0,960$ y $\epsilon_v=0,985$.

Los coeficientes de la ecuación anterior dependen de: (i) el tipo de vegetación y el tipo de suelo sobre el que se encuentra, a través de sus emisividades; (ii) la geometría de las superficies, a través del término de cavidad máximo; y (iii) el canal empleado, por la variación espectral de las emisividades de las superficies naturales. Estos coeficientes pueden ser ajustados para cada canal y tipo de superficie, si las geometrías son conocidas y si se dispone de emisividades de campo de los diferentes tipos de suelo y vegetación para el área estudiada. Si no es el caso, pueden usarse valores medios para dichos coeficientes, que serán específicos para cada banda térmica considerada.

Para calcular estos valores medios se ha tomado como referencia tanto la base de espectros de emisividad de Salisbury y D'Aria (1992) como las medidas de campo que hemos realizado en diferentes campañas experimentales (Rubio et al., 1997). Para eig se ha calculado el promedio y desviación estándar de emisividades de rocas y suelos conjuntamente, mientras que para eiv se ha considerado un cuerpo gris de emisividad 0,985. El término de cavidad máximo ha sido elegido en función del canal para cada par eig-eiv, calculándolo bajo el análisis de diferentes tipos de vegetación, y considerando el valor promedio de todos ellos. La Tabla 1 muestra los coeficientes medios, así obtenidos, para su uso con la ecuación (4) en los canales que utilizan los sensores térmicos existentes.

El objetivo de este trabajo es comprobar la validez de la ecuación operativa del MCV junto con los coeficientes medios dados en la Tabla 1, así como estimar el error con que el método proporciona la emisividad. Esta validación determina el límite superior del error de estimación de la emisividad con el MCV (ya que el uso de coeficientes ajustados a casos concretos o del término de cavidad exacto llevaría a mejores resultados), y muestra la eficacia real de esta formulación mucho más operativa.

LA BASE DE DATOS

Para llevar a cabo la validación, se necesita una base de medidas de emisividad de campo coincidentes con el paso de instrumentos situados a bordo de aviones o de satélites artificiales, así como zonas de estudio de características variadas. En concreto, se han usado datos obtenidos en cuatro áreas enmarcadas en diferentes proyectos, en las que se disponía de este tipo de medidas. Turco (Bolivia) es una región de estepa árida caracterizada por la existencia de matorrales distribuidos sobre el suelo, y en la que se dispone de datos del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Bunyol (Valencia) es un territorio heterogéneo donde se encuentra tanto vegetación natural (matorral y coníferas, principalmente) como campos cultivados (frutales, olivos y viñedos), y en la que se tienen imágenes del sensor Thematic Mapper (TM). Una tercera zona es la de Barrax (Albacete), extensa área agrícola donde se cultiva esencialmente cebada de secano y de regadío, maíz, alfalfa y trigo. Existen también grandes superficies de suelo sin vegetación correspondientes a campos en barbecho. De ésta existen datos del TM y del Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS). Por último, Alpillles (Francia) es una región agrícola extensa (se cultiva maíz, girasol, trigo y alfalfa), donde también se usaron los datos del instrumento DAIS.

Las medidas in situ de la emisividad se efectuaron con el método de la caja (Rubio et al., 1997) en las variantes de 1 tapa (Turco y Bunyol) y 2 tapas (en los otros casos). Como instrumental se usó un radiómetro monocanal que opera en 8-14 μm (Turco, Bunyol y Barrax/TM), un radiómetro multi-banda que mide en 8-14 μm , 8,2-9,2 μm , 10,5-11,5 μm y 11,5-12,5 μm (Barrax/DAIS) y un espectralradiómetro (Alpillles). El empleo del radiómetro de bandas y el espectralradiómetro posibilita la validación del MCV tanto en la región de 8-9 μm como en la de 10,5-12,5 μm , intervalos en los que se encuentran las dos combinaciones de canales propuestas para el instrumento PRISM de la Agencia Espacial Europea (ESA) (Valor et al., 1999). En el caso de las medidas realizadas en banda ancha, han sido transformadas a las regiones espectrales mencionadas por medio de las ecuaciones propuestas por Rubio et al. (1997).

También se dispone de medidas in situ de las dimensiones de las diferentes estructuras vegetales existentes en cada zona, que junto a las medidas de emisividad de cada uno de los componentes de la superficie (distintos tipos de vegetación y suelo), permiten determinar la emisividad efectiva medida, mediante el uso de la expresión exacta del MCV.

Por otra parte, a partir de las imágenes proporcionadas por los diferentes sensores antes mencionados se han calculado las emisividades con la ecuación operativa del MCV y los coeficientes de

la Tabla 1. Posteriormente, se han extraído dichos valores en ventanas de 5x5 o 7x7 píxeles centradas en el píxel que teóricamente, tras la georreferenciación de las imágenes a las zonas observadas, coincide espacialmente con las zonas de medida en el campo.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las Tabla 2 y Tabla 3 presentan los resultados de la validación en las regiones espectrales 10,5-12,5 μm y 8-9 μm , respectivamente. En cada una de ellas se muestra, para cada zona y tipo de superficie, el valor medido en el campo, el valor calculado con la expresión operativa propuesta (ec. 4), y la diferencia entre ambos. El cálculo del valor medio y la desviación estándar de dicho conjunto de valores muestra que:

- En la región 10,5-12,5 μm la ecuación operativa (ec. 4) proporciona la emisividad sin desviación sistemática y con un error de $\pm 0,011$.
- En el intervalo 8-9 μm la ecuación determina la emisividad con una desviación sistemática de 0,01 y una incertidumbre de $\pm 0,02$.

El resultado obtenido para la región de 10,5-12,5 μm es razonablemente bueno si se tiene en cuenta la simplicidad de la formulación propuesta, el hecho de que se emplean coeficientes medios, y si se considera, además, que el límite inferior del error de medida experimental de la emisividad es de (0,005). Por tanto se confirma que los coeficientes para esta región espectral son adecuados al no introducir desviación sistemática en la estimación de la emisividad.

En el caso de la región 8-9 μm disponemos de una base de datos poco extensa ya que sólo tenemos medidas de diversos experimentos con el sensor DAIS. Aquí la ecuación (4) subestima la emisividad, lo que probablemente se deba a la gran variabilidad en la emisividad que presentan los diferentes tipos de suelos y rocas en esta región espectral, lo cual limita la aplicación de la expresión propuesta. Sin embargo, el uso de coeficientes ajustados a cada región sí que podría ofrecer mejores resultados.

En resumen, los resultados de la validación confirman la efectividad de la ecuación (4), al mismo tiempo que definen el límite superior en el error de estimación de la emisividad con el Método de la Cobertura Vegetal en ambas regiones espectrales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la Agencia Espacial Europea por la financiación proporcionada para el estudio aquí presentado (ESTEC Contrato No. 14236/00/NL/DC).

BIBLIOGRAFÍA

- ANTON, Y.A. y ROSS, Y.K. 1990. Emissivity of a soil vegetation system. *Sovietic Journal Remote Sensing*. 7(5): 859-869.
- COLL, C., CASELLES, V. y SCHMUGGE, T.J. 1994. Estimation of land surface emissivity differences in the split-window channels of AVHRR. *Remote Sensing of Environment*. 48: 127-134.
- GILLESPIE, A.R., KAHLE, A.B. y WALKER, R.E. 1986. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HIS contrast stretches. *Remote Sensing of Environment*. 20: 209-235.
- GILLESPIE, A., RO K U G AWA, S., MATSUNAGA, T., STEVEN COTHERN, J., HOOK, S. y KAHLE, A. B. 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 36 (4): 1113-1126.
- KAHLE, A.B., MADURA, D.P. y SOHA, J.M. 1980. Middle infrared multispectral aircraft scanner data: analysis for geologic applications. *Applied Optics*. 19: 2279 - 2290.
- KEALY, P.S. y HOOK, S.J. 1993. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 31 (6): 1155-1164.
- LI, Z.L. y BECKER, F. 1993. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*. 43: 67-85.
- OLIOSO, A. 1995. Simulating the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing*. 16 (16): 3211-3216.
- RUBIO, E., CASELLES, V. y BADENAS, C. 1997. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 mm wave band: analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*. 59: 490-521.
- SALISBRY, J.W. y D'ARIA, D.M. 1992. Emissivity of terrestrial materials in 8-14 mm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*. 42: 83-106.
- SOHA, J.M. y SCHWARTZ, A.A. 1978. Multispectral histogram normalization contrast enhancement, en *Proceedings of the Fifth Canadian Symposium on Remote Sensing*, Victoria, British Columbia, Canada, 86-93.
- VALOR, E. 1997. Determinación de la emisividad de la superficie terrestre a partir de imágenes de satélite. *Tesis doctoral. Dep. de Termodinàmica. Universitat de València*, 166 pp.
- VALOR, E. y CASELLES, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African and South American areas. *Remote Sensing of Environment*. 57: 167-184.
- VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., RUBIO, E. Y SOSPEDRA, F. 1999. Selección de las bandas térmicas del instrumento PRISM. *R evista de Teledetección*. 11: 23 - 27.
- VAN DE GRIEND, A.A. y OWE, M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*. 14: 1119-1131.

WATSON, K. 1992a. Two-temperature method for measuring emissivity. *Remote Sensing of Environment*. 42:117-121.

WATSON, K. 1992b. Spectral ratio method for measuring emissivity. *Remote Sensing of Environment*. 42: 113-116.

	8-9 μm	10,5-11,5 μm	11,5-12,5 μm	10,5-12,5 μm	8-14 mm
ϵ_{ig}	0,90 \pm 0,06	0,95 \pm 0,02	0,970 \pm 0,010	0,960 \pm 0,014	0,93 \pm 0,03
ϵ_{iv}	0,985 \pm 0,005	0,985 \pm 0,007	0,985 \pm 0,008	0,985 \pm 0,005	0,985 \pm 0,005
$\langle d\epsilon_i \rangle$	0,04 \pm 0,03	0,022 \pm 0,014	0,013 \pm 0,009	0,017 \pm 0,011	0,03 \pm 0,02

Tabla 1. Valores medios junto con sus dispersiones de los coeficientes a utilizar en la ecuación (4) para diferentes bandas espectrales.

Muestra	Medido	Calculado	Diferencia
<i>AVHRR/Bolivia</i>			
Estepa árida	0,975	0,973	0,002
<i>TM/Barrax</i>			
Cebada reg. (30 mayo)	0,977	0,990	-0,013
Cebada reg. (12 junio)	0,979	0,991	-0,012
Cebada sec. (30 mayo)	0,985	0,989	-0,004
Cebada sec. (12 junio)	0,974	0,985	-0,011
Maíz (30 mayo)	0,976	0,967	0,009
Maíz (12 junio)	0,982	0,974	0,008
Maíz (25 junio)	0,994	0,983	0,011
Alfalfa (30 mayo)	0,989	0,988	0,001
Alfalfa (12 junio)	0,989	0,987	0,002
Alfalfa (25 junio)	0,989	0,99	-0,002
Suelo (30 mayo)	0,977	0,965	0,012
Suelo (12 junio)	0,977	0,965	0,012
Suelo (25 junio)	0,977	0,962	0,015
<i>TM/Bunyol</i>			
Alborache	0,978	0,967	0,011
Montro	0,983	0,977	0,006
<i>DAIS97/Alpilles</i>			
Maíz 500	0,993	0,989	0,004
Girasol 121	0,987	0,992	-0,005
Girasol 102	0,985	0,987	-0,002
Trigo (cosechado) 120	0,951	0,984	-0,033
Alfalfa 203	0,991	0,986	0,005
<i>DAIS98/Barrax</i>			
Suelo S1	0,963	0,966	-0,003
Suelo S3	0,967	0,965	0,002
Maíz C5	0,992	0,986	0,006
Alfalfa A4	0,980	0,986	-0,006
<i>DAIS99/Barrax</i>			
Suelo S10	0,968	0,965	0,003
Cebada V27	0,952	0,97	-0,025
Maíz SV3	0,984	0,979	0,005

Tabla 2. Resultados de la validación de la ecuación (4) en la región espectral 10,5-12,5 μm

Muestra	Medido	Calculado	Diferencia
<i>DAIS97/Alpilles</i>			
Maíz 500	0,993	0,991	0,002
Girasol 121	0,978	0,991	-0,013
Girasol 102	0,985	0,988	-0,003
Trigo 120 (cosechado)	0,955	0,967	-0,012
Alfalfa 203	0,991	0,987	0,004
<i>DAIS98/Barrax</i>			
Suelo S1	0,944	0,915	0,029
Suelo S3	0,959	0,912	0,047
Maíz C5	0,992	0,987	0,005
Alfalfa A4	0,981	0,987	-0,006
<i>DAIS99/Barrax</i>			
Suelo S10	0,955	0,914	0,041
Cebada V27	0,957	0,945	0,012
Maíz SV3	0,972	0,95	0,022

Tabla 3. Resultados de la validación de la ecuación (4) en la región espectral 8-9 μm .