

VARIACIÓN ANGULAR DE LA EMISIVIDAD: UN ESTUDIO EXPERIMENTAL

J. Cuenca, J. A. Sobrino, L. Dempere, H. El Kharraz, N. Raissouni

Juan.Cuenca@uv.es, Jose.Sobrino@uv.es, Laura.Dempere@uv.es, Naoufal.Raissouni@uv.es, kharraz@uv.es

Unidad de Cambio Global. Departament de Termodinàmica, Facultat de Física. Universitat de València.

C/ Dr. Moliner 50. 46100 Burjassot, Spain.

RESUMEN: En el presente trabajo se ha llevado a cabo una investigación experimental de la emisividad para algunas muestras representativas en la banda del infrarrojo térmico (8-14 μm). Las medidas se tomaron con ángulos entre 0° y 65° con respecto a la normal a la superficie terrestre, con incrementos de 5°. Los resultados muestran un descenso de la emisividad con ángulos de visión crecientes, siendo el agua la sustancia que muestra la mayor dependencia angular (aproximadamente 7% desde 0° a 65°). Arcilla, arena, limo y gravilla muestran variaciones de alrededor del 1-3% para el mismo rango angular, mientras que una cubierta homogénea de hierba no mostró dependencia angular.

PALABRAS CLAVE: Emisividad, variación angular, temperatura, ATSR

ABSTRACT: In this work an experimental investigation of the angular variation of the emissivity in the thermal infrared (8-14 μm) band of some representative samples was made at angles of 0°-65° (at 5° increments) to the surface normal. The results show a decrease of the emissivity with increasing viewing angle, with water showing the highest angular dependence (about 7% from 0° to 65° views). Clay, sand, slime and gravel show variations of approximately 1-3% for the same range of views, whereas a homogeneous grass cover does not show angular dependence.

KEY WORDS: Emissivity, angular variation, temperature, ATSR

INTRODUCCIÓN

El conocimiento exacto de la emisividad de la superficie es necesario para una estimación precisa de la temperatura de la superficie en la banda del infrarrojo térmico (TIR). La mayor parte de los trabajos relacionados con la determinación desde satélite de la temperatura de la superficie han considerado valores de emisividad medidos al nadir con el método de la caja (Nerry *et al.*, 1990). Tal actuación puede ser una buena aproximación para la determinación de la temperatura de la superficie por métodos split-window (Sobrino *et al.*, 1994). Con el lanzamiento el 17 de julio de 1991 del satélite ERS-1 se abre una nueva perspectiva de trabajo. El ERS-1 es portador del sensor ATSR, primero que opera en modo biangular para la toma de datos. Esta nueva técnica permite el uso de algoritmos biangulares para obtener la temperatura de la superficie. Por este motivo hemos llevado a cabo una investigación experimental de la variación angular de la emisividad infrarroja de seis muestras (arena, arcilla, limo, grava, agua y césped) en la banda espectral del infrarrojo térmico (8-14 μm).

TEORÍA

La teoría para obtener la variación angular de la emisividad de las superficies naturales puede consultarse en Sobrino y Cuenca (1999). En este trabajo, se distingue entre la emisividad absoluta y relativa, de acuerdo a:

Emisividad direccional absoluta

$$\epsilon_{\theta} = \frac{\exp(-\alpha/T_B) - 1.3 \exp(-\alpha/T_{\text{atm0}})}{\exp(-\alpha/T_s) - 1.3 \exp(-\alpha/T_{\text{atm0}})} \quad (1)$$

donde T_B es la temperatura de brillo o radiométrica de la muestra, T_s es su temperatura termométrica, T_{atm0} es la temperatura de la atmósfera medida al nadir, y α se ha definido por simplicidad como $\alpha=C_2/\lambda$, donde $C_2=14388 \text{ K}\mu\text{m}$ es la segunda constante de la ley de Planck y λ es la longitud de onda.

Emisividad direccional relativa.

$$\epsilon_{r,\theta} = \frac{\exp(-\alpha/T_B) - 1.3 \exp(-\alpha/T_{\text{atm0}})}{\exp(-\alpha/T_{B0}) - 1.3 \exp(-\alpha/T_{\text{atm0}})} \quad (2)$$

donde T_{B0} es la temperatura radiométrica de la muestra tomada al nadir.

Nótese que para calcular la emisividad relativa no es necesario medir temperaturas de superficie, como ocurría con los valores absolutos referidos al nadir.

El error introducido por las limitaciones experimentales de los instrumentos utilizados ha sido calculado según la teoría de errores. Aplicando sus reglas a las ecuaciones (1) y (2), se obtiene como resultado: $\delta\epsilon_{\theta} = \delta\epsilon_{r,\theta} = 0.005$. En los cálculos se han utilizado los siguientes valores típicos:

$T_{\text{rad}} = T_{\text{rad}0} = 281 \text{ K}$, $T_s = 282 \text{ K}$, y $T_{\text{atm}0} = 223 \text{ K}$, en todos los casos $\delta T_i = 0.1 \text{ K}$ ($i = \text{rad}, \text{rad}0, s, \text{atm}0$).

MÉTODO EXPERIMENTAL

Los materiales básicos utilizados para la realización del presente trabajo son los siguientes

a) Radiómetro

El instrumento utilizado es un radiómetro de infrarrojos Omega OS86 que dispone de un IFOV de 2° y de un modo de operación con valor de emisividad ajustable. Además, el radiómetro dispone de un rayo laser que ayuda a localizar el blanco para tomar las medidas. El rayo laser se reveló como una herramienta esencial en la tarea anterior. El radiómetro opera en la banda espectral de $8\text{-}14 \mu\text{m}$, con una precisión en la temperatura de $0,1 \text{ K}$.

b) Sistema goniométrico

Este sistema consiste en una estructura semicircular metálica con un soporte móvil para el radiómetro. El radio de la semicircunferencia es de $1,5 \text{ metros}$.

c) Termopar y termistor

El termopar utilizado es un TES 1310 Type K. Tiene una sensibilidad de $0,1 \text{ K}$ y fue utilizado para medir la temperatura del agua debido a la posibilidad de sumergirlo en ella. Fue calibrado en nuestro laboratorio con la ayuda de un termómetro de mercurio de precisión Siebert&Kuhn con una sensibilidad de $0,05 \text{ K}$.

d) Muestras

Se utilizaron muestras de arena, arcilla y limo, grava compuesta de cuerpos de $8\text{-}10 \text{ mm}$, y césped de $8\text{-}10 \text{ cm}$ de altura.

Tomamos diferentes series de medidas en días despejados y bajo distintas condiciones con la

intención de tener valores medios representativos de las emisividades.

Otra importante condición experimental que debió ser tenida en cuenta es que las muestras necesitan estar térmicamente estabilizadas. En relación con esta condición está presente la necesidad de no tomar medidas a las muestras expuestas al sol o al viento.

Otro aspecto del procedimiento experimental seguido es el de la condición de simultaneidad de las medidas. Realizamos las tomas de medidas en un tiempo inferior a dos minutos, aproximadamente el tiempo entre la adquisición de datos forward-nadir por parte del ATSR, comenzando en nadir (ángulo 0°) hasta 65° sobre la vertical de la superficie (con incrementos de 5°) - a esto lo denominamos una "serie" de datos. Antes y después de tomar cada serie de datos se medía la temperatura "del cielo" al nadir.

RESULTADOS

Para mostrar los resultados hemos construido las Figuras 1 y 2, que muestran, en cada caso, la dependencia de la emisividad angular, para las emisividades relativa al nadir y absoluta, respectivamente. Los valores mostrados son las medias aritméticas de las diferentes series de medidas.

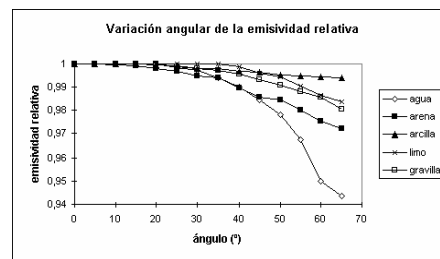


Figura 1: Variación angular de la emisividad relativa al nadir.

En la Figura 1 podemos observar tres tipos fundamentales de comportamientos de las muestras: hay un grupo de 3 materiales (arena, limo y grava) que muestran un descenso de la emisividad similar, aunque la arena presenta la mayor caída del grupo, arcilla es la muestra con menor dependencia angular, y, finalmente, el agua es la sustancia con mayor variación angular de emisividad. También es evidente que el cambio en la emisividad con ángulos crecientes se hace significativa a partir de los 30° .

No hemos incluido en las gráficas el caso del césped porque no hemos observado ninguna variación de emisividad (i. e., $\epsilon_{r,0} = 1$ para todos los ángulos). La explicación a esta independencia de la geometría de observación está basada en la naturaleza de la cubierta vegetal, que muestra una estructura análoga para las diferentes condiciones geométricas de observación.

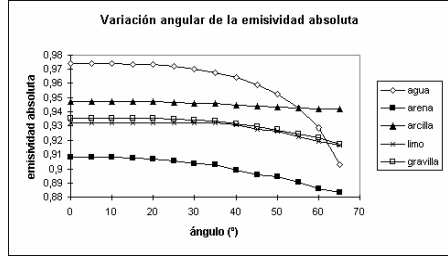


Figura 2: Variación angular de la emisividad absoluta.

La Figura 2 confirma lo mostrado en la Figura 1. La arcilla es la sustancia con menor variación angular de emisividad. El agua es la que muestra una caída en su valor más pronunciada, y arena, grava y limo muestran descensos entre los de la arcilla y el agua. Estos resultados confieren credibilidad a nuestro método experimental. Otro importante aspecto al que hemos de hacer mención es que los valores de emisividad al nadir obtenidos están en concordancia con los presentes en la bibliografía.

Como aplicación de estos resultados al modo de operación del ATSR, podemos resumir en la Tabla 1 los resultados previamente mostrados. Obsérvese que los descensos en las emisividades van referidos entre los ángulos 0° (nadir) y 55°, los ángulos de toma de datos en los modos de operación nadir y forward, respectivamente, del ATSR.

Tabla 1: Decrecimiento de las emisividades absoluta y relativa aplicados al caso del ATSR. En ambos casos los decrecimientos han sido considerados entre los ángulos 0° y 55°.

Muestra	Descenso absoluto de la emisividad (%)	Descenso de la emisividad relativa (%)
agua	3.3	3.3
arena	1.9	2.0

arcilla	0.5	0.5
limo	0.9	0.9
gravilla	1.2	1.2
césped	0	0

Como ha sido mencionado previamente, en la bibliografía se encuentran muy pocos ejemplos de estudios en esta línea. Las Figuras 3 y 4 muestran una comparación entre los resultados obtenidos por Rees & James y nosotros para el agua, y por Labed & Stoll y nosotros para la arena.

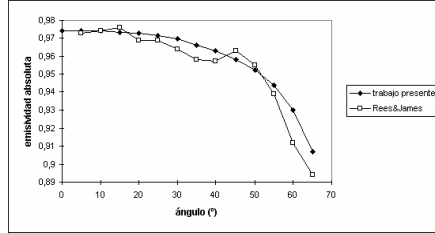


Figura 3: Comparación entre los resultados de Rees & James y los nuestros para el caso del agua.

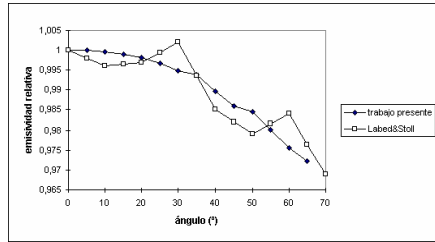


Figura 4: Comparación entre los resultados de Labed & Stoll y los nuestros para el caso de la arena.

En ambas gráficas (Figuras 3 y 4) puede observarse que nuestros resultados están en concordancia con los publicados por Rees & James y por Labed & Stoll. Respecto a los resultados de Rees & James, cabría decir que el primer valor de emisividad que presentan corresponde a un ángulo de 5°, que coincide substancialmente con el nuestro. Las evoluciones de las curvas muestran que nuestros valores decaen de forma más regular, pero ambas curvan decrecen juntas y las diferencias de los valores no son mayores del 1% desde 0° a 55°. Además, el comportamiento obtenido de la emisividad del agua se ajusta muy bien a la predicción teórica basada en los coeficientes de reflexión de Fresnel, para un índice de refracción real puro de 1.4. Esto es debido al hecho que el agua

puede ser considerada razonablemente como una substancia homogénea y que su superficie es plana. Una discusión más profunda en esta cuestión puede ser encontrada por el lector interesado en Rees (1992) y en Rees and James (1992).

Respecto a los resultados de Labed & Stoll cabría decir que a pesar del hecho de que el intervalo de longitudes de onda por ellos utilizado es diferente al nuestro (10-12.5 μm vs. 8-14 μm), observamos que sus resultados no están lejos de los nuestros, existe una pequeña oscilación respecto a nuestra curva y las diferencias de valores no es mayor que el 1%. Aquí también se observa que nuestros resultados son más regulares en el descenso de la emisividad.

IMPACTO DE LA VARIACIÓN ANGULAR

Nuestro objetivo principal en el estudio de la variación angular de la emisividad es proporcionar una mejora en la precisión de los algoritmos biangulares utilizados para determinar la temperatura de la superficie. Con este propósito hemos aplicado nuestros resultados al algoritmo propuesto por Sobrino *et al.* (1996) para la determinación de la temperatura de la superficie con ATSR. A partir de este algoritmo, la expresión del error en la estimación de la temperatura de la superficie cuando no se considera la variación angular de la emisividad viene dada por:

$$\Delta T_{se} = (57-7W) (1-\epsilon_0) + (84-15W) (\epsilon_0 - \epsilon_\theta) \quad (3)$$

siendo W el contenido vertical de vapor de agua, y ϵ_0 y ϵ_θ las emisividades en las vistas nadir y forward, respectivamente. Para poder observar mejor el efecto de la variación angular de la emisividad hemos construido la Tabla 2, en la que se han considerado tres valores diferentes de vapor de agua atmosférico.

Tabla 2: Error en la estimación de la temperatura de la superficie, ΔT_{se} , $\Delta T_{se} = T_{se}(\Delta\epsilon=0) - T_{se}(\Delta\epsilon_{55^\circ})$, cuando no se considera la variación angular de la emisividad.

Muestra	ϵ_0	$\Delta\epsilon_\theta(55^\circ)$ (%)	W (g/cm ²)	ΔT_{se} (K)
Agua	0.974	3.3	1	2.2
			3	1.3
			5	0.3
Arena	0.908 (0.96)	1.9	1	5.8 (3.3)
			3	4.0 (2.2)

			5	2.2 (1.1)
Grava	0.936	1.2	1	4.0
			3	2.7
			5	1.5

Los cálculos para $\epsilon_0(\text{arena})=0.96$ han sido incluidos en la Tabla 2. De este modo hemos tenido en cuenta la variación que sufre la emisividad de la arena en el intervalo 10-12 μm .

De la Tabla 2 podemos extraer varias conclusiones. Primero, el impacto de la variación angular de la emisividad al determinar la temperatura de la superficie decrece conforme aumenta el contenido de vapor de agua en la atmósfera. Segundo, la influencia más apreciable es observada para la arena en condiciones de atmósfera de latitudes medias invernales ($W \approx 1 \text{ g cm}^{-2}$). El no considerar la variación angular de la emisividad puede conllevar a errores que excedan en 2 K en la determinación de la temperatura de la superficie, lo cual es inaceptable en estudios climáticos (0,3 K constituye el requerimiento de precisión necesario para las aplicaciones climáticas de programa internacional TOGA (Sobrino *et al.*, 1996).

CONCLUSIONES

En el trabajo presente se ha estudiado el comportamiento de la emisividad de distintas muestras bajo diferentes ángulos de visión. Hemos podido comprobar que, en general, este parámetro decrece cuando aumenta el ángulo de observación. Parte de nuestros resultados confirman los escasísimos preexistentes, y los nuevos restantes son introducidos ahora en la literatura científica. El trabajo muestra que es necesario tener en cuenta la variación angular de la emisividad para la determinación de la temperatura terrestre cuando se utiliza un método biangular. Particularmente, el método de trabajo es útil para el sensor ATSR, que opera con un ángulo de 53° en relación a la vista nadir.

REFERENCIAS

Nerry, F., Labed, J. and Stoll, M. P., 1990, "Spectral Properties of Land Surfaces in the Thermal Infrared, 1: Laboratory Measurements of Absolute Spectral Emissivity Signatures". Journal of Geophysical Research, 95: pp. 7027-7044.

Rees, W. G., 1990, "Physical Principles of Remote Sensing". Cambridge University Press, Cambridge.

Rees, W. G. and James, S. P., 1992, "Angular Variation of the Infrared Emissivity of Ice and Water Surfaces". International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, No. 15, pp. 2873-2886.

Sobrino, J. A., Li, Z-L., Stoll, M. P. and Becker, F., 1994, "Improvements in the Split-Window Technique for the Land Surface Temperature Determination". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32 No. 2, pp. 243-253.

Sobrino, J. A., Li, Z-L., Stoll, M. P. and Becker, F., 1996, "Multi-Channel and Multi-Angle Algorithms for Estimating Sea and Land Surface Temperature with ATSR Data". International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 11, pp. 2089-2114.

Sobrino, J. A. and Cuenca, J., 1999, "Angular Variation of Thermal Infrared Emissivity for some Natural Surfaces from Experimental Measurements". Applied Optics (en prensa).

AGRADECIMIENTOS: Los autores quieren mostrar sus agradecimientos a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) (Project No. CLI96-2018) y a la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) (Project No. AECI 98-1590) por la ayuda económica recibida.

