

VARIACIÓN ANGULAR DE LA EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE DEL MAR. COMPARACIÓN CON UN MODELO TEÓRICO.

R. Niclòs, E. Valor, V. Caselles y C. Coll.

Raquel.Niclos@uv.es

*Departamento de Termodinámica. Facultad de Física. Universidad de Valencia.
C/ Doctor Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia).*

RESUMEN.- El requerimiento de una precisión mínima de $\pm 0,3$ K en la temperatura de la superficie del mar (TSM) como magnitud de entrada a modelos climáticos y el uso de ángulos de observación elevados en las actuales misiones espaciales, exige una determinación precisa y exacta de la emisividad de la superficie del mar (ESM) en el infrarrojo térmico (IRT), así como un análisis de su variación angular. En este trabajo presentamos valores experimentales de la ESM, medidos en condiciones de mar abierto, en función del ángulo de observación y de la velocidad del viento para cuatro bandas espectrales ubicadas dentro del IRT, resultado de la campaña WISE 2000 (WInd and Salinity Experiment).

ABSTRACT.- The requirement of a minimum accuracy of ± 0.3 K in sea surface temperature (SST) as input to climate models and the use of high observation angles in the current space missions, need a precise and reliable determination of sea surface emissivity (SSE) in the thermal infrared region (TIR), as well as an analysis of its angular variability. In this paper we present SSE measurements, obtained under open sea conditions, as a function of the observation angle and the surface wind speed, in four spectral channels placed within the TIR, as a result of the WISE 2000 campaign (WInd and Salinity Experiment).

PALABRAS CLAVE: emisividad, temperatura, superficie del mar, infrarrojo térmico, variación angular.

INTRODUCCIÓN

La demanda actual de una precisión mínima de $\pm 0,3$ K en la determinación de la temperatura de la superficie del mar (TSM) para el estudio de procesos climáticos (Webster y Fieux, 1988), y el uso de ángulos de observación elevados en las presentes misiones, como la visión a 55° del AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer, Llewellyn-Jones et alii. 2001), requiere de un análisis exhaustivo de las dependencias espectrales y angulares de la emisividad de la superficie del mar (ESM). Presentamos en este trabajo valores experimentales de la ESM medidos en condiciones de mar abierto en función del ángulo de observación, en diferentes bandas espectrales, y para diferentes condiciones de rugosidad de la superficie marina definidas por el viento superficial. Dichas medidas son resultado de la campaña WISE 2000 (WInd and Salinity Experiment, Camps et alii. 2002), desarrollada dentro de la Misión SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) de la ESA en la plataforma petrolífera Casablanca, situada a 40 km frente a la costa de Tarragona.

METODOLOGÍA

La señal medida por un radiómetro que observa la superficie del mar es la suma de tres contribuciones: (i) emisión directa de la superficie, atenuada por su paso a través de la atmósfera, (ii) reflexión de la radiación atmosférica descendente, también atenuada por la atmósfera, y (iii) radiancia atmosférica ascendente a lo largo de la dirección de observación, según:

$$R_i(\theta, \phi, h) = R_{s,i}(\theta, \phi, 0) \tau_i(\theta, 0, h) + L_i^{\uparrow atm}(\theta) \quad (1)$$

$$R_{s,i}(\theta, \phi, 0) = \varepsilon_i(\theta, \phi) B_i(TSM) + R_{\rho,i} \quad (2)$$

$$R_{\rho,i} = [1 - \varepsilon_i(\theta, \phi)] L_i^{\downarrow atm}(\bar{\theta}_r, \phi) \quad (3)$$

donde $R_i(\theta, \phi, h)$ es la radiancia medida por el canal i del sensor; $B_i(TSM)$ es la función de Planck para una TSM dada; $\varepsilon_i(\theta, \phi)$ es la emisividad superficial; $\tau_i(\theta, 0, h)$ y $L_i^{\uparrow atm}(\theta)$ son la transmisividad y la radiancia emitida por la capa atmosférica situada entre superficie y sensor; y $\bar{\theta}_r$ es un ángulo efectivo tal que $L_i^{\downarrow atm}(\bar{\theta}_r, \phi)$ sea igual a la integración angular de la radiancia atmosférica

descendente para todas las direcciones que contribuyan a la señal medida en una dirección θ , debido al efecto de la rugosidad de la superficie, para el que aproximamos $\overline{\theta_r} = \pi - \theta$ (Sidran, 1981). Teniendo en cuenta la distancia entre radiómetro y superficie (de 35 a 76 m), puede considerarse que la capa atmosférica entre ambos es básicamente transparente y con una emisión despreciable. Sin embargo, la radiancia atmosférica descendente, contribución de todo el espesor atmosférico, no puede despreciarse (Nicolòs et alii. 2002). Así, la ESM se obtiene de (1) – (3) según:

$$\varepsilon_i(\theta, \phi) = \frac{R_{s,i}(\theta, \phi, 0) - L_i^{\downarrow am}(\pi - \theta, \phi)}{B_i(TSM) - L_i^{\downarrow am}(\pi - \theta, \phi)} \quad (4)$$

Para obtener la radiancia atmosférica descendente Nicolòs et alii. (2003) efectuaron observaciones cuasi-simultáneas de mar y cielo, con ángulos θ y $\theta - \pi$, respectivamente. Además, se precisa de medidas de la TSM para la determinación de la ESM según la ecuación (4). Dicha temperatura se tomó mediante sondas térmicas situadas en boyas oceanográficas. La buena concordancia encontrada entre la temperatura medida por dichas sondas de contacto a 20 cm de profundidad y la temperatura determinada mediante la metodología de Nicolòs et alii. (2003) en base a las observaciones radiométricas ($0,0 \pm 0,2$ K), descarta un efecto superficial considerable (Robinson et alii., 1984).

Las observaciones radiométricas se realizaron mediante el uso del radiómetro CE 312, con cuatro bandas en el IRT: (1) 8 – 14 μm , (2) 11,5 – 12,5 μm , (3) 10,5 – 11,5 μm , y (4) 8,2-9,2 μm . La cabeza óptica del CE 312 se colocó sobre un pedestal móvil situado en una terraza externa de la plataforma, a unos 32 m sobre el nivel del mar, y en condiciones de cielo abierto, por lo que se introdujo en una caja protectora, observando la superficie del mar a través de una ventana de ZnSe, material elegido por su elevada transmisión en el IRT. Por ello, se sometió el sistema completo a un proceso de calibrado donde se tuvieron en cuenta las propiedades ópticas del cristal (Nicolòs et alii. 2003).

Las principales fuentes de error en la determinación de la ESM son: (i) el error radiométrico del sensor y de calibrado del sistema, (ii) errores en el direccionamiento del sistema, (iii) el error en la determinación de la TSM, (iv) la existencia de posibles gradientes térmicos en la temperatura del mar, tanto verticales como horizontales, y (v) la variabilidad en las condiciones

atmosféricas, factor significativo en aquellos casos en los que la temperatura atmosférica es cercana a la TSM (por ejemplo cuando hay nubes bajas). Para minimizar esta última fuente de error, nos limitamos a medir bajo condiciones de cielo totalmente despejado, o con nubes altas y frías, poco influyentes.

RESULTADOS

En la fase de preparación de la campaña WISE 2000 realizamos una precampaña en octubre de 2000, donde el radiómetro CE 312 observó la superficie del mar desde una escollera de la costa de El Puig (Valencia), considerando ángulos superiores a 30° para evitar la influencia de la misma. Se determinó la ESM para ángulos de observación de 35° a 75° con paso de 10° , siguiendo la metodología descrita anteriormente, y para una velocidad del viento superficial media de $U=6,9 \pm 1,8$ m/s, definida a 12,5 m sobre el nivel del mar. En la Figura 1 mostramos la variación angular de la ESM, promedio de los procesos realizados, obtenida para los cuatro canales del CE 312, junto con la ESM teórica correspondiente calculada mediante el modelo de Masuda et alii. (1988) para $U=5$ m/s. El error en la ESM se obtuvo por propagación de errores sobre la ecuación (4), considerando las fuentes de error mencionadas, con un error en TSM de $\pm 0,1$ K, proporcionado por la sensibilidad de la sonda externa del CE 312. Las barras de error mostradas en la Figura 1 corresponden al máximo entre el error medio calculado de este modo y la desviación estándar obtenida para los diferentes procesos.

En este caso, la posible influencia de la costa en la rugosidad de la superficie, no disponiendo de condiciones de mar abierto, podría poner en duda la validez de la densidad de probabilidad asociada a la distribución de pendientes para las caras del oleaje propuesta por Cox y Munk (1955), base del modelo de Masuda et alii. (1988). Sin embargo, se observa buena concordancia entre la ESM teórica y experimental.

Por su parte, el gran número de medidas realizadas dentro de la campaña WISE 2000, nos permite obtener la ESM para diferentes valores de U , posibilitando el análisis de la influencia de la rugosidad de la superficie en la ESM.

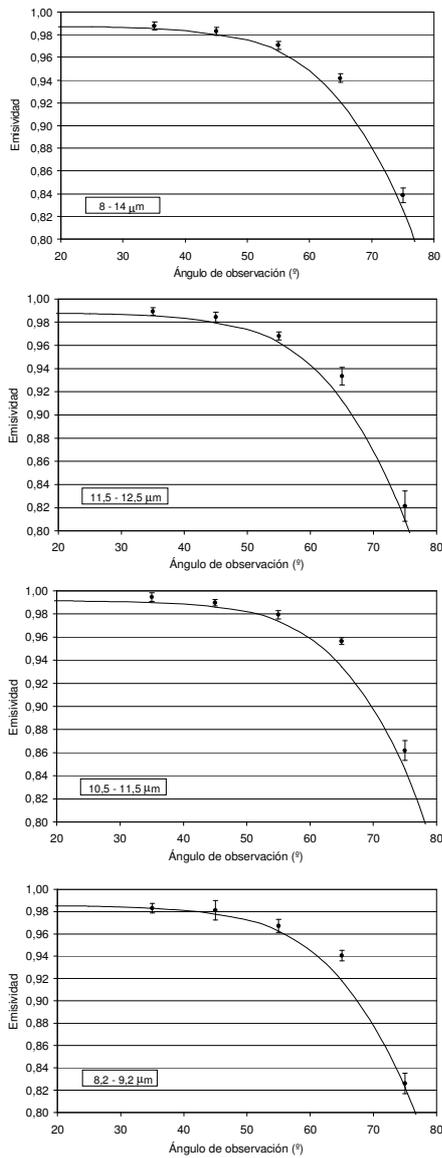


Figura 1.- Variación angular de la ESM. Comparación entre los valores experimentales de la precampaña de El Puig (puntos) y la ESM teórica de Masuda et alii. (1988) para $U = 5\text{ m/s}$ (línea).

Siguiendo la metodología expuesta, se determinó la ESM para ángulos entre 25° y 65° con paso de 10° . En este caso, la TSM fue medida con sondas térmicas de precisión ($\pm 0,002\text{ K}$) situadas en

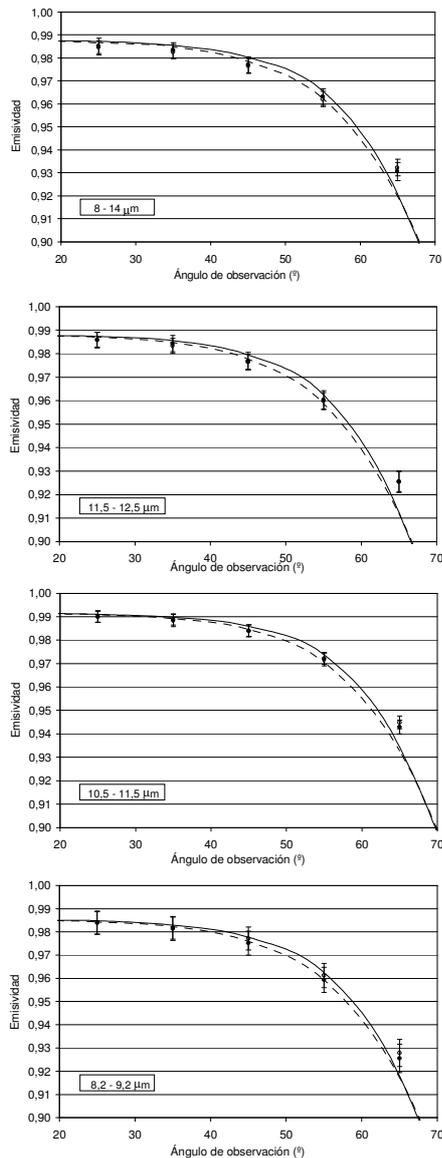


Figura 2.- Variación angular de la ESM. Comparación entre los valores experimentales de la campaña WISE 2000 para $U \approx 5\text{ m/s}$ (puntos sólidos) y $U \approx 10\text{ m/s}$ (puntos huecos), y la ESM teórica de Masuda et alii. (1988) para $U = 5\text{ m/s}$ (línea continua) y $U = 10\text{ m/s}$ (línea discontinua).

boyas oceanográficas a 20 cm de profundidad. La Figura 2 presenta la variación angular de la ESM para los cuatro canales del CE 312 como promedio

de todos los procesos desarrollados bajo una velocidad de viento superficial cercana a los 5 m/s (con un valor medio de $4,5 \pm 0,9$ m/s) y 10 m/s (promedio de $10,3 \pm 1,1$ m/s). Con fin comparativo se dibuja también la ESM resultante del modelo de Masuda et alii. (1988) para $U = 5$ m/s y $U = 10$ m/s.

La Figura 2 pone de manifiesto la validez del modelo de Masuda para ángulos de observación menores a 50° , dentro del error experimental. Sin embargo, se observan mayores discrepancias para ángulos superiores, cosa que también ocurre en la Figura 1. Estas diferencias son más acusadas a mayor velocidad de viento superficial.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan medidas de la ESM para diferentes ángulos de observación y velocidades del viento superficial. La ESM decrece con el ángulo de observación, siendo la disminución del orden de un 2% - 3% para 55° , lo que resulta relevante para instrumentos con posibilidad de medida biangular como el AATSR.

Por otro lado, la ESM aumenta ligeramente con la velocidad del viento superficial, especialmente para ángulos elevados. Es en estos casos donde mayores discrepancias se han encontrado con el modelo de Masuda et alii. (1988). Este modelo obvia la existencia de reflexiones múltiples o efecto de sombras, entendido como la probabilidad de que la radiancia emitida por la superficie del mar sea reflejada en ella misma para el caso de rugosidad y ángulo de observación elevados, a la vez que pudieran producirse dobles reflexiones de la radiancia atmosférica descendente en la superficie contribuyentes en la lectura del sensor. Dicho efecto de sombras explicaría la discrepancia encontrada respecto del modelo de Masuda et alii. (1988) para U y θ elevados, ya apuntada por Watts et alii. (1996) y Wu y Smith (1997).

BIBLIOGRAFÍA

Camps, A., Font, J., Etcheto, J., Caselles, V., et alii. 2002. Sea surface emissivity observations at L-band: First results of the Wind and Salinity Experiment WISE 2000. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 40(10): 2117-2130.

Cox, C., and Munk, W. 1955. Some problems in optical oceanography. *Journal of Marine Research*, 14: 63-78.

Llewellyn-Jones, D., Edwards, M. C., Mutlow, C. T., Birks, A. R., Barton, I. J. and Tait, H. 2001. AATSR: Global-change and Surface-Temperature measurements from ENVISAT. *ESA Bulletin*, February 2001: 11-21.

Masuda, K., Takashima, T., and Takayama, Y. 1988. Emissivity of pure sea waters for the model sea surface in the infrared window regions. *Remote Sensing of Environment*, 48: 302-308.

Niclòs, R., Caselles, V., Rubio, E., Coll, C. and Valor, E. 2003. Precise and reliable sea surface temperature retrieval. *Journal of Applied Meteorology* (en revisión).

Robinson, I. S., Wells, N. C., and Charnock, H. 1984. The sea surface thermal boundary layer and its relevance to the measurement of surface temperature by airborne and space borne radiometers. *International Journal of Remote Sensing*, 5: 19-46.

Sidran, M. 1981. Broadband reflectance and emissivity of specular and rough water surfaces. *Applied Optics*, 20: 3176-3183.

Watts, P. D., Allen, M. R., and Nightingale, T. J. 1996. Wind speed effects on sea surface emission and reflection for the along track scanning radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13: 126-141.

Webster, F., and Fieux, M. 1984. "TOGA overview" in Large-scale Oceanographic Experiments and Satellites, C. Gautier and M. Fieux Eds. (Reidel, Dordrecht, 1984), 17-24.

Wu, X., and Smith, W.L. 1997. Emissivity of rough sea surface for 8-13 μm : modelling and verification. *Applied Optics*, 36: 2609-2619.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Espacial Europea mediante los proyectos WISE 2000 y WISE 2001 (ESTEC Contract 14188/00/NL/DC), el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto SENSOCLIMA (REN2001-3116/CLI) y la Generalitat Valenciana (programa de ayudas a la contratación de doctores). También agradecemos al Ministerio de Educación, Cultura y Deportes la beca de FPU de que disfruta Raquel Niclòs (ref. AP2000-0360).