

Una ecuación simple para la determinación de la Emisividad de la Superficie del Mar en el Infrarrojo Térmico

Raquel Niclòs, Vicente Caselles, César Coll, Enric Valor, Juan M. Sánchez y Joan M. Galve

Dep. Termodinámica. Universidad de Valencia. Valencia. C/. Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia.
Raquel.Niclos@uv.es.

Resumen

Los trabajos relativos a la determinación experimental de la Emisividad de la Superficie del Mar (ESM) en el infrarrojo térmico resultan escasos, siendo insuficientes las medidas angulares realizadas hasta el momento. La validez de los estudios y modelos desarrollados a nivel teórico fue analizada en comparación con medidas realizadas con tal propósito por Niclòs et al. [1], concluyendo que el modelo de Wu y Smith [2] reproduce adecuadamente las dependencias presentadas por dicha ESM. Sin embargo estos modelos, basados en una caracterización física de la emisión por parte de esta superficie rugosa, presentan una elevada complejidad matemática. En este trabajo se propone una ecuación simple para obtener la variación angular de la ESM en función de la velocidad del viento en superficie generadora de rugosidad.

1. Introducción

La Emisividad de la Superficie del Mar (ESM), magnitud necesaria para la determinación de la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) a partir de observaciones radiométricas, presenta unas dependencias que, de no estar bien caracterizadas, comportarían errores importantes en dicha TSM.

Si bien existen diversos modelos teóricos para la determinación de la ESM en el infrarrojo térmico (IRT) [2]-[5], en lo experimental se encuentran pocas referencias [6]-[8] que permitan el uso de estos valores tanto en la corrección de emisividad para la obtención de la TSM a partir de cualquier condición de observación radiométrica, como en el estudio de la validez de estos modelos teóricos. Por ello, Niclòs et al. [1] partieron de la realización de medidas angulares de ESM en condiciones de mar abierto y un amplio intervalo de velocidades de viento en superficie y, por tanto, grado de rugosidad de ésta. La obtención de la TSM con una precisión de $\pm 0,3$ K, valor fijado como meta para las actuales misiones espaciales, requiere de un error máximo en la ESM de $\pm 0,5\%$ [2]. Usando como referencia esta base experimental, se llegó a la conclusión de que el

modelo de Masuda et al. [4] estima de forma adecuada la ESM para ángulos inferiores a 50° , pero la subestima para ángulos superiores [1]. Por contra, el modelo de Wu y Smith [2], incorporando el efecto de la emisión reflejada por parte de la propia superficie, consigue reproducir con mayor exactitud la ESM para cualquier geometría de observación y rugosidad de ésta [1] (Fig. 1). Comprobada la bondad de este modelo, pero teniendo en cuenta su complejidad matemática, nos planteamos la necesidad de obtener una ecuación más simple, aunque igualmente precisa, para la determinación de la ESM en función del ángulo de observación y de la velocidad del viento. En este trabajo presentamos el estudio realizado para desarrollar esta ecuación mediante ajuste de los valores teóricos ofrecidos por el modelo de Wu y Smith [2], seleccionado como óptimo.

2. Propuesta de una ecuación simple para la obtención de la ESM

La variación espectral de la ESM (Fig. 2), función inversa de la dependencia espectral del índice de refracción del agua, no parece fácilmente reproducible mediante una función matemática simple. La dependencia angular, sin embargo, presenta una forma más sencilla, tal y como se observa en la Fig. 1. Dicha dependencia nos sugirió una posible parametrización en términos de una función coseno, pero con un decrecimiento más suavizado con el ángulo de observación. Para ello introducimos parámetros adicionales, considerados en principio dependientes tanto espectralmente como respecto de la velocidad del viento, U .

Usando como referencia los resultados del modelo de Wu y Smith [2] con U entre 0 y 15m/s, obtuvimos las ESM correspondientes a los canales de tres sensores con bandas representativas dentro del IRT: el radiómetro comercial CIMEL Electronique CE 312, de cuatro bandas; el *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) en *Meteosat Second Generation* (MSG), usando cuatro de sus bandas; y el *MODerate resolution Imaging*

Spectrometer (MODIS) en EOS Aqua/Terra, con sus 16 bandas en el IRT.

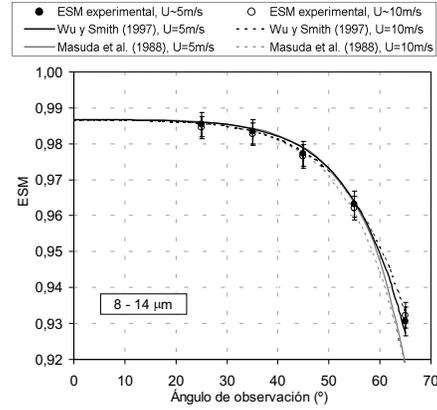


Figura 1: Variación angular de la ESM. Comparación entre valores experimentales [1] y teóricos de los modelos de Masuda et al. [4] y Wu y Smith [2] para dos velocidades del viento, U .

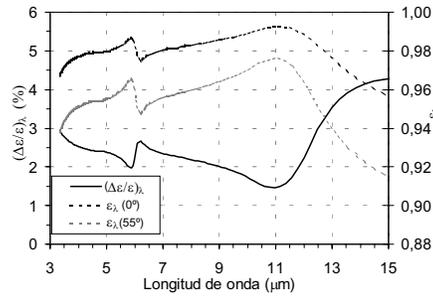


Figura 2: Variación espectral de la ESM calculada con el modelo de Wu y Smith [2]. En el eje principal se muestra el decrecimiento relativo de la emisividad entre 0° y 55° , y en el eje secundario la ESM para dos ángulos de observación y $U=0\text{m/s}$.

Con estas emisividades de canal, probamos diferentes funciones de ajuste y finalmente concluimos que la ecuación que permitía reproducir la dependencia angular de la ESM con mayor exactitud, tenía la forma [9]:

$$\varepsilon_i(\theta, U) = \varepsilon_i(0^\circ) [\cos(\theta^{cU+d})]^{b_i} \quad (1)$$

donde $\varepsilon_i(\theta, U)$ representa la ESM integrada dentro de una banda espectral i , función del ángulo de observación, θ (radianes), y la velocidad del viento en superficie, U (m/s); y $\varepsilon_i(0^\circ)$ es el valor de dicha

ESM en nadir, donde ésta no depende de U . Únicamente el parámetro b_i es función de la banda espectral considerada, mientras que los coeficientes c y d son constantes para cualquier canal y velocidad del viento, y toman valores de $c = -0,037 \pm 0,003 \text{ s/m}$ y $d = 2,36 \pm 0,03$ respectivamente.

El ajuste de los valores de ESM de canal a la ec. (1) se realizó usando el algoritmo no lineal de ajuste por mínimos cuadrados de Levenberg-Marquardt [10], obteniéndose errores estándar de estimación, $\sigma_{ajuste,\lambda}$, menores que $\pm 0,0009$, y coeficientes de determinación, r_x^2 , superiores a 0,9987 para las diversas bandas térmicas probadas. Como ejemplo, la Fig. 3 muestra la dependencia angular de la ESM proporcionada por la ecuación (1) para U de 0m/s y 15m/s y las bandas térmicas del SEVIRI-MSG.

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 recoge, a modo de ejemplo, los coeficientes b_i obtenidos para las bandas térmicas de tres radiómetros actualmente a bordo de satélite: *Advanced Along Track Scanning Radiometer* (AATSR) a bordo de ENVISAT, MODIS en EOS/Terra, y el SEVIRI en MSG. Cabe destacar que solamente se incluyen los coeficientes para las bandas situadas dentro de las ventanas espectrales existentes en el IRT, donde tiene sentido una determinación de la ESM que permita la obtención posterior de la TSM. Los errores asociados a estos coeficientes en la Tabla 1, $\sigma(b_i)$, son sus desviaciones estándar dentro del intervalo de velocidades de viento consideradas, siendo tales valores siempre superiores a los errores estándar de estimación obtenidos. Los valores de $\varepsilon_i(0^\circ)$ han sido determinados con el modelo de Wu y Smith [2], pero en cualquier caso pueden obtenerse a partir de bases de emisividades espectrales como la base ASTER (<http://speclib.jpl.nasa.gov/>) o por medida directa. Los errores asociados a esta magnitud son de nuevo desviaciones estándar de los valores determinados para diferentes valores de U . Finalmente, con el objetivo de comprobar la exactitud de la ecuación propuesta, determinamos la $\varepsilon_i(\theta, U)$ para θ entre 0° y 65° y U de 0 a 15 m/s, utilizando los valores tabulados para b_i y $\varepsilon_i(0^\circ)$. Estos resultados fueron comparados con las ESMs calculadas con el modelo de Wu y Smith [2], obteniéndose los errores estándar de estimación y coeficientes de determinación mostrados en las dos últimas columnas de la Tabla 1. Así, considerando como válido el modelo de Wu y Smith [2] para la determinación de la ESM, vemos que el error de estimación comportado por la ecuación propuesta, ec. (1), es menor a $\pm 0,10 \%$, inferior al $\pm 0,5 \%$ requerido como mínimo para

posibilitar la determinación de la TSM con un error de $\pm 0,3$ K [2].

4. Conclusiones

La ecuación propuesta en este trabajo (ec. (1) con los parámetros mostrados en la Tabla 1) permite una simple pero exacta determinación de la ESM para cualquier ángulo de observación y velocidad del viento en superficie, pudiendo ser usada incluso para la corrección de radiancias medidas bajo ángulos elevados por radiómetros térmicos a bordo de satélite.

La aplicación de esta ecuación con el uso de imágenes de velocidad del viento en superficie, permitiría la producción de mapas de ESM para cada banda térmica requerida. Además, los valores serían calculados píxel por píxel teniendo en cuenta así la posible variación del ángulo de observación en las

imágenes de radiancia a corregir con dicho mapa de ESM. Utilizando estas imágenes de ESM, la determinación de la TSM resultaría mucho más precisa. Por otra parte, esta parametrización podría implementarse en futuros algoritmos para la determinación de la TSM, tomando como base tanto métodos multicanal como multiangular.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MCyT (Acción Especial REN 2002-11605-E/CLI; Proyecto REN 2001-3116/CLI, y el Contrato de Investigación "Ramón y Cajal" del Dr. E. Valor), el MEC (Proyecto CGL2004-06099-C03-01/CLI, Acción Complementaria CGL2004-0166-E y Beca FPU de R. Nicolòs) y la Universitat de València (Beca "V Segles" de J.M. Sánchez).

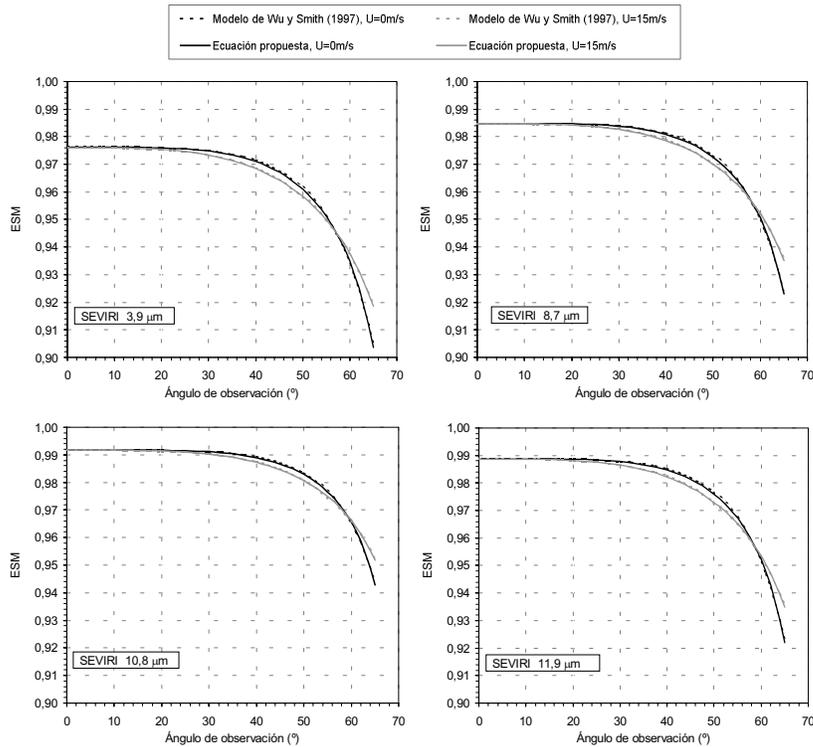


Figura 3: Comparación entre los valores de ESM calculados con el modelo de Wu y Smith [2] y los determinados mediante la ec. (1) con los coeficientes correspondientes a cada canal del SEVIRI-MSG.

Tabla 1: Parámetros de la ec. (1) asociados a las bandas térmicas de diversos sensores a bordo de satélite. Las bandas espectrales vienen definidas por su etiqueta y su longitud de onda efectiva, $\lambda_{ef,i}$.

Radiómetro	Canal	$\lambda_{ef,i}$ (μm)	$\varepsilon_i(0)$	$\sigma(\varepsilon_i(0))$	b_i	$\sigma(b_i)$	$\sigma_{ajuste,i}$	r_i^2
AATSR (ENVISAT)	IR 3,7	3,74	0,97468	0,00006	0,0550	0,0019	0,0010	0,997
	IR 11	10,86	0,99199	0,00003	0,0343	0,0015	0,0008	0,996
	IR 12	12,05	0,98778	0,00005	0,0508	0,0019	0,0009	0,997
SEVIRI (MSG)	4	3,92	0,97613	0,00006	0,0539	0,0019	0,0010	0,997
	7	8,71	0,98482	0,00005	0,0449	0,0017	0,0008	0,997
	9	10,79	0,99176	0,00005	0,0347	0,0015	0,0008	0,996
	10	11,94	0,98875	0,00003	0,0483	0,0018	0,0009	0,997
MODIS (TERRA)	20	3,78	0,97535	0,00006	0,0546	0,0019	0,0010	0,997
	21	3,99	0,97694	0,00006	0,0532	0,0019	0,0010	0,997
	22	3,97	0,97681	0,00006	0,0533	0,0019	0,0010	0,997
	23	4,04	0,97725	0,00006	0,0530	0,0018	0,0010	0,997
	24	4,47	0,97897	0,00006	0,0514	0,0018	0,0009	0,997
	25	4,55	0,97911	0,00006	0,0512	0,0018	0,0009	0,997
	29	8,53	0,98432	0,00005	0,0456	0,0017	0,0008	0,997
	31	11,02	0,99229	0,00003	0,0342	0,0015	0,0008	0,996
32	12,03	0,98823	0,00005	0,0506	0,0019	0,0009	0,997	

6. Referencias

- [1] Niclòs, R., Valor, E., Caselles, V., Coll, C., y Sánchez, J. M., "In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity – Validation of models", *Remote Sens. Environ.*, 94/1, 83-93, 2005.
- [2] Wu, X., y Smith, W.L., "Emissivity of rough sea surface for 8-13 μm : modelling and verification", *App. Optics*, 36, 2609-2619, 1997.
- [3] Saunders, P., "The temperature at the ocean-air interface", *J. Atmos. Sci.*, 24: 267-273, 1967.
- [4] Masuda, K., Takashima, T., y Takayama, Y., "Emissivity of pure sea waters for the model sea surface in the infrared window regions", *Remote Sens. Environ.*, 48, 302-308, 1988.
- [5] Watts, P. D., Allen, M. R., y Nightingale, T. J., "Wind speed effects on sea surface emission and reflection for the along track scanning radiometer", *J. of Atmos. and Oceanic Technology*, 13, 126-141, 1996.
- [6] Liu, W.-Y., Field, R. T., Gantt, R. G., y Klemas V., "Measurement of the surface emissivity of turbid waters", *Remote Sens. Environ.*, 21, 97-109, 1987.
- [7] Salisbury, J.W., y D'Aria, D.M., "Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window", *Remote Sens. Environ.*, 42, 83-106, 1992.
- [8] Smith, W. L., Knuteson, R.O., Revercomb, H. E., Feltz, W., Howell, H. B., Menzel, W. P., Nalli, N. R., Brown, O., Brown, J., Minnett, P., y McKeow, W., "Observations of the infrared radiative properties of the ocean – Implications for the measurement of sea surface temperature via satellite remote sensing", *Bull. American Meteorological Society*, 77(1), 41-50, 1996.
- [9] Niclòs, R. y Caselles, V., "Angular variation of the sea surface emissivity", *Recent Research Developments in Thermal Remote Sensing* (Chapter 3), Research Signpost Press, Kerala, 2005.
- [10] Moré, J.J., "The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory. Numerical Analysis", G. A. Watson (Ed.), *Lecture Notes in Mathematics* 630, 105-116. Springer Verlag, 1977.