

ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE A PARTIR DE DATOS ATSR-2

J. A. SOBRINO^(*), G. SÒRIA^(*), F. PRATA^(**) y S. REILLO^(*).

sobrino@uv.es, guillem.soria@uv.es

^(*)Unidad de Cambio Global, Dept de Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València
c/ Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot (València)

^(**)CSIRO Atmospheric Research, PMB 1 Aspendale, Vic. 3195, Australia.

RESUMEN: Ha sido llevado a cabo un estudio usando simulaciones MODTRAN 3.5 de datos del sensor Along-Track Scanning Radiometer-2 (ATSR-2) con el fin de obtener un amplio rango de algoritmos para estimar la temperatura de la superficie terrestre y del mar (LST y SST). Se han considerado algoritmos⁸ basados en estructuras de split-window y biangulares. Los resultados indican que, en general, los algoritmos biangulares ofrecen mejores resultados que los split-window, estimando la LST con una desviación estándar inferior a 0,6 K si los datos de satélite están libres de error. La dependencia con el vapor de agua supone una mejora en la precisión de los resultados. Los algoritmos propuestos han sido validados utilizando datos *in situ* obtenidos por el CSIRO en Australia. Los resultados corroboran el mejor comportamiento de los algoritmos biangulares.

ABSTRACT: A study has been carried out using MODTRAN 3.5 simulations of the Along-Track Scanning Radiometer-2 (ATSR-2) data to give a great range of algorithms for estimating sea and land surface temperature (SST and LST). Algorithms based on split-window, dual-angle and mixed structure have been considered. The results show that, in general, dual-angle algorithms give better results than split-window ones, retrieving LST with a standard deviation less than 0.6 K if the satellite data are error free. Water vapour dependence supposes an improvement of the accuracy of the results. The proposed algorithms have been applied to *in situ* data acquired by the CSIRO in Australia. The results corroborate the better behaviour of the dual angle algorithms.

Palabras clave: ATSR-2, temperatura, split-window, dual-angle, vapor de agua, emisividad.

INTRODUCCIÓN

El ATSR es un instrumento de nueva generación que incorpora mejoras tecnológicas respecto al AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Las características técnicas del ATSR permiten el uso de la técnica multiangular y, aunque comparte con el AVHRR la resolución espacial y espectral de los canales térmicos, mejora en cambio la precisión radiométrica (0,05 K del ATSR frente a los 0,12 K del AVHRR). El principal objetivo de este trabajo es presentar algoritmos para la estimación de la temperatura de superficie a partir de datos ATSR-2 con el fin de obtener el algoritmo más preciso en cada situación. Para tal efecto, se ha creado una amplia base de datos de simulaciones con la ayuda del código MODTRAN 3.5 para obtener los coeficientes de los algoritmos propuestos y, finalmente, evaluar y validar los mismos usando la teoría de errores y datos *in situ* de una región de Australia.

ALGORITMOS

La estructura de los algoritmos se ha obtenido a partir de la ecuación de transferencia radiativa donde, para una atmósfera libre de nubes en equilibrio termodinámico local, se tiene:

$$T_s = T_i + A(T_i - T_j) - B_0 + (1 - \epsilon_j)B_1 - \Delta\epsilon_0 B_2 \quad (1)$$

siendo *i* y *j* dos diferentes canales observados bajo el mismo ángulo, técnica split-window, o el mismo canal con dos ángulos de observación diferentes, técnica biangular, de acuerdo a Sobrino *et alii*. (1996). De entre todas las combinaciones evaluadas mostramos en la Tabla 1 aquellos algoritmos de tipo SW y biangular que presentan los mejores resultados. Con el fin de simplificar su lectura usaremos la siguiente notación: n: Vista nadir; SW: método Split-window; DA: método biangular para el canal 2 del ATSR-2, centrado en los 11µm; QUAD: algoritmo que incluye una dependencia cuadrática de (T_i-T_j); W: algoritmo que incluye la

DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN
SW n, QUAD.	$T_s = T_{2n} + a_1(T_{2n} - T_{1n}) + a_2(T_{2n} - T_{1n})^2 + a_3$
SW n, QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + a_1(T_{2n} - T_{1n}) + a_2(T_{2n} - T_{1n})^2 + a_3 + a_4(1 - \epsilon)$
SW n, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + a_1(T_{2n} - T_{1n}) + a_2(T_{2n} - T_{1n})^2 + a_3 + a_4(1 - \epsilon) + a_5\Delta\epsilon$
SW n, W, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (a_0 + a_1 W)(T_{2n} - T_{1n}) + (a_2 + a_3 W) + (a_4 + a_5 W)(1 - \epsilon) + (a_6 + a_7 W)\Delta\epsilon$
SW n, W, QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + (a_0 + a_1 W)(T_{2n} - T_{1n}) + (a_2 + a_3 W)(T_{2n} - T_{1n})^2 + (a_4 + a_5 W) + (a_6 + a_7 W)(1 - \epsilon)$
SW n, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ (W)	$T_s = T_{2n} + a_0(T_{2n} - T_{1n}) + a_1(T_{2n} - T_{1n})^2 + a_2 + (a_3 + a_4 W)(1 - \epsilon) + (a_5 + a_6 W)\Delta\epsilon$
SW n, W, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (a_0 + a_1 W)(T_{2n} - T_{1n}) + (a_2 + a_3 W)(T_{2n} - T_{1n})^2 + (a_4 + a_5 W) + (a_6 + a_7 W)(1 - \epsilon) + (a_8 + a_9 W)\Delta\epsilon$
DA QUAD	$T_s = T_{2n} + a_0(T_{2n} - T_{2f}) + a_1(T_{2n} - T_{2f})^2 + a_2$
DA QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + a_0(T_{2n} - T_{2f}) + a_1(T_{2n} - T_{2f})^2 + a_2 + a_3(1 - \epsilon_{2n})$
DA QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + a_0(T_{2n} - T_{2f}) + a_1(T_{2n} - T_{2f})^2 + a_2 + a_3(1 - \epsilon_{2n}) + a_4\Delta\epsilon\theta$
DA W, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (a_0 + a_1 W)(T_{2n} - T_{2f}) + (a_2 + a_3 W) + (a_4 + a_5 W)(1 - \epsilon_{2n}) + (a_6 + a_7 W)\Delta\epsilon\theta$
DA W, QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + a_0(T_{2n} - T_{2f}) + a_1(T_{2n} - T_{2f})^2 + a_2 + (a_3 + a_4 W)(1 - \epsilon_{2n})$
DA QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ (W)	$T_s = T_{2n} + a_0(T_{2n} - T_{2f}) + a_1(T_{2n} - T_{2f})^2 + a_2 + (a_3 + a_4 W)(1 - \epsilon_{2n}) + (a_5 + a_6 W)\Delta\epsilon\theta$
DA W, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (a_0 + a_1 W)(T_{2n} - T_{2f}) + (a_2 + a_3 W)(T_{2n} - T_{2f})^2 + (a_4 + a_5 W) + (a_6 + a_7 W)(1 - \epsilon_{2n}) + (a_8 + a_9 W)\Delta\epsilon\theta$

Tabla 1. Algoritmos split-window y biangulares propuestos para la estimación de la temperatura de la superficie terrestre a partir de los datos ATSR-2.

dependencia con el contenido en vapor de agua; ϵ : algoritmo que incluye la dependencia con la emisividad; y $\Delta\epsilon$: algoritmo que incluye la variación angular o espectral de la emisividad.

En la Tabla 2 se presentan los algoritmos operativos obtenidos. La determinación de los valores ha sido realizada mediante el uso de simulaciones debido a que aún no existe un volumen importante de medidas *in situ* de calidad de las temperaturas LST y SST coincidentes con las temperaturas ATSR-2. Las simulaciones se han realizado mediante el código MODTRAN 3.5 para un amplio rango de temperaturas, formado por cinco temperaturas de superficie T-5, T, T+10 y T+20, (donde T es la temperatura del primer nivel de radiosondeo), durante el día y tres temperaturas de superficie T-5, T, T+5 durante la noche, y cuatro ángulos (0°, 11°2', 24°7' y 53°8'). Además, hemos usado 9 emisividades diferentes obtenidas de la base de datos de emisividad espectral de Salisbury, representativas del 90% de la cobertura de la superficie terrestre (limo, arena, agua, coníferas, etc.). También se ha tenido en cuenta la dependencia angular de la emisividad de las superficies. Las emisividades de los canales 1, 2 y 3 en la vista forward han sido calculadas a partir de las emisividades en la vista nadir dadas por Labeled y Stoll (1991) y Sobrino y Cuenca (1999).

En la Tabla 2 se incluyen también los errores siguientes: σ_{mod} , error del modelo debido a la minimización realizada mediante el método de Levenberg-Marquardt, que proporciona una idea de la precisión en la determinación de ST, $\sigma_{\Delta T}$, error debido al error instrumental,

asumiendo un valor de 0,05 K para el error en la temperatura de los canales del ATSR-2, σ_w , error asociado con la determinación de la columna de vapor de agua considerando una incertidumbre en el contenido total del vapor de agua atmosférico de 0.5 g·cm⁻² y por último el error asociado con la indeterminación del valor de la emisividad, asumiendo una incertidumbre en la emisividad de 0.005. El error total ha sido calculado de acuerdo a la teoría de errores. Se observa claramente (véase Tabla 2) como el error del modelo considerado es menor a medida que el algoritmo tiene más grados de libertad. De todas formas, en algunas ocasiones, cuando se consideran los errores asociados a W, ϵ y T_f , el error total puede ser mayor que el obtenido en aquellos algoritmos con menor número de parámetros de entrada. El algoritmo biangular del canal 2 ofrece una mejor precisión que el de tipo split-window que presenta la misma estructura (ver Tabla 1). Además, hay un interesante aspecto a destacar en los valores ofrecidos en esta Tabla: los algoritmos que presentan una dependencia explícita con el vapor de agua ofrecen mejores resultados que el resto, aún en el caso en que se considere el error en el contenido de vapor de agua.

Estos resultados se corroboran en la Figura 1. Cuando se considera el algoritmo con menor número de parámetros de entrada el resultado es similar para ambos modelos, split-window y biangular, en cambio las diferencias entre ellos crecen a medida que aumenta el número de parámetros. La figura también muestra el efecto debido a la incertidumbre en los parámetros de entrada que pueden ascender a 0.7 K

Nombre del algoritmo	Expresión	σ_{mod} (K)	σ_{noise} (K)	σ_e (K)	σ_{wv} (K)	σ_{total} (K)
SW n, QUAD	$T_s = T_{2n} + 0,5(T_{2n} - T_{1n}) + 0,42(T_{2n} - T_{1n})^2 + 2,34$	1,72	0,16	-	-	1,73
SW n, QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + 0,80(T_{2n} - T_{1n}) + 0,38(T_{2n} - T_{1n})^2 + 0,27 + 56,9(1-\epsilon)$	1,15	0,18	0,20	-	1,18
SW n, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + 0,97(T_{2n} - T_{1n}) + 0,35(T_{2n} - T_{1n})^2 + 0,02 + 46,37(1-\epsilon) - 66,82\Delta\epsilon$	1,03	0,18	0,50	-	1,16
SW n, W, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (1,19 + 0,6W)(T_{2n} - T_{1n}) + (0,3 - 0,89W) + (64,5 - 7,3W)(1-\epsilon) - (124 - 20,3W)\Delta\epsilon$	0,65	0,16	0,76 (0,25)	-0,45 (0,47)	1,11 (0,95)
SW n, W, QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + 1,05(T_{2n} - T_{1n}) + 0,36(T_{2n} - T_{1n})^2 - 0,056 + (73 - 6,3W)(1-\epsilon)$	1,12	0,19	0,47 (0,19)	-0,16 (0,39)	1,24 (1,21)
SW n, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ (W)	$T_s = T_{2n} + 1,46(T_{2n} - T_{1n}) + 0,29(T_{2n} - T_{1n})^2 - 0,576 + (60,9 - 5,8W)(1-\epsilon) - (120,6 - 18,9W)\Delta\epsilon$	0,96	0,22	0,91 (0,61)	-0,39	1,40 (1,21)
SW n, W, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (2,18 + 0,23W)(T_{2n} - T_{1n}) - (0,33 - 0,1W) + (T_{2n} - T_{1n})^2 - (0,03 + 0,7W) + (63,8 - 7,06W)(1-\epsilon) - (158 - 30,56W)\Delta\epsilon$	0,57	0,16	0,92 (0,24)	-0,63 (0,49)	1,27 (1,01)
DA QUAD	$T_s = T_{2n} + 0,82(T_{2n} - T_{2f}) + 0,26(T_{2n} - T_{2f})^2 + 1,64$	1,66	0,17	-	-	1,67
DA QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + 1,24(T_{2n} - T_{2f}) + 0,21(T_{2n} - T_{2f})^2 - 0,745 + 52,96(1-\epsilon_2n)$	1,02	0,19	0,19	-	1,06
DA QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + 1,46(T_{2n} - T_{2f}) + 0,19(T_{2n} - T_{2f})^2 + 0,047 + 42,7(1-\epsilon_2n) - 63,3\Delta\epsilon_\theta$	0,87	0,19	0,62	-	1,09
DA W, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (1,36 + 0,4W)(T_{2n} - T_{2f}) + (0,47 - 0,63W) + (62,7 - 8,6W)(1-\epsilon_2n) - (97,2 - 18,2W)\Delta\epsilon_\theta$	0,45	0,16	0,77 (0,22)	0,09 (0,45)	0,92 (0,68)
DA W, QUAD, ϵ	$T_s = T_{2n} + 1,4(T_{2n} - T_{2f}) + 0,2(T_{2n} - T_{2f})^2 - 1,02 + (62,43 - 3,7W)(1-\epsilon_{2n})$	1,01	0,19	0,04	-0,06	1,03
DA QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ (W)	$T_s = T_{2n} + 1,77(T_{2n} - T_{2f}) + 0,14(T_{2n} - T_{2f})^2 - 0,256 + (62,8 - 8,6W)(1-\epsilon_{2n}) - (128,3 - 26,9W)\Delta\epsilon_\theta$	0,69	0,19	0,93 (0,49)	0,09	1,17 (0,87)
DA W, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	$T_s = T_{2n} + (2,6 + 0,04W)(T_{2n} - T_{2f}) - (0,29 - 0,08W) + (T_{2n} - T_{2f})^2 - (0,24 + 0,41W) + (64,1 - 9W)(1-\epsilon_{2n}) - (115,4 - 23,9W)\Delta\epsilon_\theta$	0,39	0,17	0,86 (0,22)	0,05 (0,46)	0,96 (0,64)

Tabla 2. Coeficientes numéricos y errores para los algoritmos split-window y biangulares dados en la Tabla 1. Los errores (en K) han sido calculados para un contenido en vapor de agua de 1 g cm⁻². Entre paréntesis se presentan aquellos para un contenido de 3 g cm⁻².

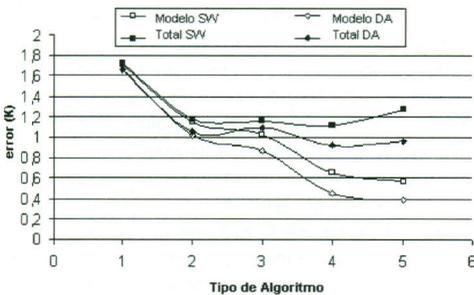


Figura 1. Análisis comparativo de los algoritmos split-window y biangulares, siguiendo el criterio:

- 1: "SW n, QUAD" y "DA(2), QUAD";
- 2: "SW n, QUAD, ϵ " y "DA(2), QUAD, ϵ ";
- 3: "SW n, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ " y "DA(2), QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ ";
- 4: "SW n(W), $\epsilon, \Delta\epsilon, W$ " y "DA(2), (W), $\epsilon, \Delta\epsilon, W$ ";
- 5: "SW n, QUAD(W), $\epsilon, \Delta\epsilon, W$ " y "DA(2), QUAD(W), $\epsilon, \Delta\epsilon, W$ ".

VALIDACIÓN

En la sección previa, se han obtenido las expresiones matemáticas de los algoritmos que permiten estimar la temperatura de la superficie terrestre a partir de datos de simulación. En la práctica aplicamos los algoritmos propuestos a datos reales con el fin de comprobarlos. Dichos datos consisten en medidas *in situ* de temperatura, radiosondeos atmosféricos y datos de satélite (ATSR-2), adquiridos por el CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation of Australia). El área estudiada está situada en Nueva Gales del sur. La latitud y longitud del punto central es de 34.392° S y 143.305° E respectivamente a 110 m de altitud. El emplazamiento consta de una región uniforme (aproximadamente 900 km²) en el interior de Australia. Los datos fueron obtenidos entre enero y noviembre de 1999.

Del conjunto inicial de medidas, hemos seleccionado una media de 6 imágenes por mes y hemos filtrado cuidadosamente los datos para eliminar aquellos con nubosidad. El proceso de validación consiste en calcular la temperatura de superficie para cada uno de los días analizados a través de los algoritmos propuestos anteriormente usando datos de satélite, y comparando estos valores con los medidos *in situ*. Para cada algoritmo, mostramos en la Tabla 3 la desviación estándar y la media de la diferencia ente la temperatura de superficie estimada y la medida *in situ*, junto la desviación estándar teórica y el RMSD. Se han realizado varias medidas de la emisividad espectral en la zona a partir de las cuales se han adoptado los siguientes valores de emisividad: $\epsilon_{11}=0.967$, $\epsilon_{12}=0.958$; $\epsilon_{21}=0.961$ y $\epsilon_{22}=0.952$. La Tabla corrobora los resultados obtenidos en el estudio teórico: el algoritmo biangular ofrece unos errores menores en la estimación de la ST que los ofrecidos por el split-window. Además, el impacto de De en el algoritmo no resulta relevante.

El presente trabajo permite, gracias a la semejanza entre los sensores ATSR-2 y AATSR, preparar el camino para la estimación de la LST y SST mediante la plataforma ENVISAT, cuyo lanzamiento está previsto para junio del 2001, si bien es evidente que los algoritmos de prelanzamiento para el AATSR deberán ajustarse tras su puesta en órbita.

Nombre del algoritmo	$\sigma_{teórica}$ (K)	$\sigma_{validac.}$ (K)	Bias (K)	RMSD (K)
SW n, QUAD.	1.73	1.53	1.13	1.90
SW n, QUAD, ϵ	1.18	1.64	0.91	1.88
SW n, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	1.16	1.69	0.87	1.90
SW n, W, $\epsilon, \Delta\epsilon$	1.11	2.08	0.78	2.22
SW n, W, QUAD, ϵ	1.24	1.77	0.77	1.93
SW n, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ (W)	1.40	1.94	0.64	2.04
SW n, W, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	1.27	2.17	0.55	2.24
DA QUAD	1.67	1.15	0.99	1.52
DA QUAD, ϵ	1.06	1.23	0.74	1.43
DA QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	1.09	1.22	0.74	1.43
DA W, $\epsilon, \Delta\epsilon$	0.92	1.21	0.41	1.28
DA W, QUAD, ϵ	1.03	1.27	0.63	1.42
DA QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$ (W)	1.17	1.35	0.32	1.39
DA W, QUAD, $\epsilon, \Delta\epsilon$	0.96	1.30	0.35	1.35

Tabla 3. Validación de los algoritmos propuestos en este trabajo

CONCLUSIONES

En este trabajo, se han propuesto una serie de algoritmos split-window y biangulares para la determinación de la temperatura de la superficie terrestre usando datos ATSR-2. Los coeficientes de estos algoritmos han sido obtenidos con MODTRAN 3.5. Una minuciosa comparación usando datos reales de superficie sugiere que el algoritmo biangular funciona mejor que el algoritmo split-window. De todas formas, nuestros resultados pertenecen a situaciones con un relativamente bajo contenido en vapor de agua (< 3 cm de agua precipitable) y regiones homogéneas. La homogeneidad de la superficie tendrá un mayor impacto en el algoritmo biangular que en el split-window, debido a que el campo de visión de las vistas nadir y forward en ATSR-2 son diferentes. Los efectos de la variación de la emisividad con el ángulo de visión han sido incorporados en los algoritmos y el alcance de dicho efecto está actualmente bajo investigación (Sobrino y Cuenca, 1999; McAtee y Prata, comunicación personal).

BIBLIOGRAFÍA

- LABED J. and STOLL, M. P. "Spatial variability of land surface emissivity in the thermal infrared band: spectral signature and effective surface temperature," *Remote Sensing of Environment*, 38, pp. 1-17, 1991.
- MCATEE B. and PRATA, A. J. "The angular behaviour of emitted infrared radiation (8-12 μm) at a semi-arid site in Australia: Implications for land surface temperature retrieval using wide field-of-view satellite instruments," en preparación.

SALISBURY J. W. and D'ARIA, D. M. "Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window", *Remote Sensing of Environment*, 42, pp. 83-106, 1992.

SOBRINO, J. A., LI, Z.-L., STOLL, M. P. and BECKER, F. "Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data", *International Journal of Remote Sensing*, 17, pp. 2089-2114, 1996

SOBRINO J. A. and CUENCA, J., "Angular variation of thermal infrared emissivity for some natural surfaces from experimental measurements," *Applied Optics*, 38, pp. 3931-3936, 1999.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la UE (Proyecto WATERMED, Contrato ICA3-ct-1999-00015) y a la ESA (Proyecto: AO-ID 384) por su soporte financiero.