

VALIDACIÓN DE LA CALIBRACIÓN Y LA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA DE LA BANDA TÉRMICA DEL LANDSAT 7/ETM+ CON MEDIDAS DE CAMPO

C. Coll (*), J. M. Galve (*), J. M. Sánchez (**), V. Caselles (*), E. Valor (*) y M. Mira (*).

(*)*Dep. Física de la Terra i Termodinàmica, Univ. de València. 50, Dr. Moliner. 46100 Burjassot. cesar.coll@uv.es*

(**)*Dep. Física Aplicada, Univ. Castilla-La Mancha. Av. de España. 02071 Albacete*

RESUMEN

La calibración de la banda térmica del Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) ha sido validada mediante medidas de temperatura y emisividad en una zona homogénea de Valencia. Alrededor de la hora de paso del Landsat 7, se lanzaron radiosondeos atmosféricos desde la zona de validación. Se utilizó el modelo MODTRAN 4 para simular las radiancias de satélite y sus correspondientes temperaturas de brillo, comparándolas con los datos ETM+ sobre la zona. En los casos analizados, la diferencia promedio entre las temperaturas de brillo simuladas y de satélite es de 0.6 K, con una diferencia cuadrática media (rmsd) de ± 0.8 K. Las medidas de campo fueron también usadas para validar la temperatura de superficie (LST) obtenida a partir de datos ETM+ aplicando la corrección atmosférica mediante: (1) radiosondeos locales, y (2) la herramienta operativa de las bandas térmicas Landsat (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>). En el primer caso, las diferencias entre la LST medida en tierra y la de satélite oscilaron entre -0.6 y 1.4 K, con valor medio de 0.7 K y rmsd= ± 1.0 K. En el segundo, las diferencias variaron entre -1.8 y 1.3 K, con valor medio nulo y rmsd= ± 1.1 K. Los resultados son similares entre sí, mostrando la buena calidad de los datos LST de la banda térmica del ETM+.

ABSTRACT

The Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) thermal band calibration was assessed with ground-based radiometric measurements of land surface temperature (LST) and emissivity over a homogeneous site in Valencia. Atmospheric radiosondes were launched at the test site close to Landsat 7 overpasses. The ground-based measurements were used with the MODTRAN 4 model to simulate at-sensor radiances and brightness temperatures, which were compared against calibrated ETM+ observations over the test site. For the cases analyzed here, differences between simulated and ETM+ brightness temperatures showed average bias of 0.6 K and root mean square difference (rmsd) of ± 0.8 K. We also used the ground-based measurements for the validation of LSTs derived from ETM+ data with atmospheric correction based on: (1) local radiosondes profiles and MODTRAN 4, and (2) the operational atmospheric correction parameter calculator available on-line at <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>. For the first case, the differences between the ground and satellite LSTs ranged from -0.6 to 1.4 K, with mean bias of 0.7 K and rmsd= ± 1.0 K. For the second case, differences ranged between -1.8 and 1.3 K, with zero average bias and rmsd= ± 1.1 K. Results are quite similar for both cases and reveal the good LST accuracy that can be achieved from the ETM+ thermal band.

Palabras clave: Landsat7/ETM+, temperatura, calibración, corrección atmosférica.

INTRODUCCIÓN

Desde 1972, la serie de satélites Landsat proporciona medidas multispectrales globales de la superficie terrestre con alta resolución espacial. El Landsat 7, lanzado en 1999, y su instrumento Enhanced Thematic Mapper+ (ETM+) es aún operativo y posee una banda en la región del infrarrojo térmico (banda 6, 10.3-12.4 μm), con una resolución espacial de 60 m. La banda térmica se calibra a bordo, usando un cuerpo negro como punto caliente y un obturador de alta emisividad a la temperatura ambiente (Schott *et al.* 2001). La calibración térmica del ETM+ ha sido controlada continuamente desde 1999 usando medidas de temperatura en lagos (Schott *et al.* 2001, Barsi *et al.*

2003, Hook *et al.* 2004). Los resultados iniciales mostraron una desviación de $+0.31 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ (3 K a 300 K) en la calibración del ETM+, que fue corregida a finales de 2000. A partir de ese momento, la banda 6 del ETM+ es aparentemente estable y bien calibrada con un error ± 0.6 K, de acuerdo con las medidas de calibración sobre lagos entre 1999 y 2007 (Barsi *et al.* 2007).

Los satélites Landsat no proporcionan un producto operativo de temperatura de la superficie (LST) debido a las limitaciones de una sola banda térmica para la corrección de los efectos atmosféricos y de emisividad. Para obtener la LST a partir de las radiancias de satélite necesitamos perfiles atmosféricos de temperatura y vapor de

agua correspondientes al paso del satélite como datos de entrada de un modelo de transferencia radiativa, así como medidas de la emisividad de la superficie. Para mitigar estos problemas, existe una herramienta operativa de corrección atmosférica disponible en internet (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>; Barsi *et al.* 2005) que usa perfiles atmosféricos del National Center for Environmental Prediction (NCEP) interpolados a una posición, fecha y hora dadas y el modelo MODTRAN 4 (Berk *et al.* 1999).

El objetivo de este trabajo es evaluar la calibración de la banda 6 del ETM+ mediante medidas realizadas in situ en un área homogénea de cultivos de arroz cercana a Valencia en los años 2004-2007. Las medidas se usaron también para validar la herramienta de corrección atmosférica. La base de datos de campo incluye medidas radiométricas de LST y emisividad, y radiosondeos atmosféricos realizados en la zona coincidiendo con el paso del Landsat 7. La zona de validación de Valencia ha sido utilizada en diversos estudios (Coll *et al.* 2005, 2006, 2007, 2009; Galve *et al.* 2008).

DATOS EXPERIMENTALES Y MÉTODOS

Hemos adquirido siete escenas Landsat 7 libres de nubes sobre la zona de validación en julio y agosto de 2004-2007 (Tabla 1). Los datos de la banda 6 del ETM+ vienen dados en números digitales calibrados linealmente a radiancias en el sensor, L_{sen} (Barsi *et al.* 2003). Las radiancias se pueden convertir en temperaturas aparentes o de brillo, T_b , de acuerdo a

$$T_b = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_{sen}} + 1\right)} \quad (1)$$

con $k_1=666.09 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ y $k_2=1282.7 \text{ K}$. Los valores de T_b para el pixel más cercano a la zona de medidas están dados en la Tabla 1.

En julio y agosto, los cultivos de arroz ofrecen cobertura completa y están bien regados, lo que confiere una gran homogeneidad térmica a la zona y facilita la medida radiométrica de la temperatura. Simultáneamente al paso del satélite, se realizaron medidas de LST utilizando tres radiómetros CE-312 de alta precisión a lo largo de distintos transectos en la zona. Seleccionamos los valores medidos durante los tres minutos centrados en la hora de paso del satélite, que fueron promediados. Su desviación estándar ofrece una estimación de la variabilidad natural de la LST en la zona ($<0.5 \text{ K}$). Las temperaturas radiométricas fueron corregidas del efecto de la emisividad,

incluyendo la reflexión de la radiancia atmosférica. La emisividad (ϵ) de la superficie fue medida in situ mediante el método de la caja (Rubio *et al.* 2003). Los resultados muestran una alta emisividad con pequeña variación espectral en 8-13 μm . Para la banda térmica del ETM+ obtuvimos $\epsilon=0.983\pm 0.005$. Los valores de LST medidos in situ (T_g) aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1.- Temperatura de la superficie medida in situ (T_g), agua precipitable y transmisividad atmosférica (W y τ), temperatura de brillo medida por el satélite ($T_b(\text{sat})$) y simulada ($T_b(\text{sim})$).

Fecha	T_g (°C)	W (cm)	τ	$T_b(\text{sat})$ (°C)	$T_b(\text{sim})$ (°C)
12/08/04	28.2	2.1	0.72	24.9	25.2
21/07/05	28.1	2.0	0.71	24.4	25.3
06/08/05	28.1	1.9	0.78	24.4	25.5
24/07/06	28.8	2.4	0.66	24.9	25.4
02/08/06	29.0	2.9	0.61	23.9	24.9
11/07/07	26.9	2.9	0.59	21.8	21.6
20/07/07	28.0	2.9	0.56	22.8	23.4

Alrededor de la hora de paso del satélite, se lanzaron radiosondeos Vaisala RS80 en la zona de validación. Los perfiles atmosféricos fueron introducidos en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN (Berk *et al.* 1999) para calcular la transmisividad y la radiancia atmosférica (ascendente y descendente) en el intervalo espectral de la banda 6 del ETM+. La cantidad de agua precipitable en la columna (W) y la transmisividad (τ) obtenida de los radiosondeos vienen en la Tabla 1 para cada fecha. La radiancia medida por el sensor (L_{sen}) puede simularse a partir de las medidas de campo de acuerdo a:

$$L_{sen} = \int_0^{\infty} f(\lambda) \{[\epsilon_\lambda B_\lambda(T_g) + (1-\epsilon_\lambda)L_{\lambda}^{\uparrow}] \tau_\lambda + L_{\lambda}^{\downarrow}\} d\lambda \quad (2)$$

donde $f(\lambda)$ es la función de respuesta espectral normalizada de la banda, B_λ es la función de Planck y L_{λ}^{\uparrow} (L_{λ}^{\downarrow}) es la radiancia atmosférica ascendente (descendente). La temperatura de brillo simulada (Tabla 1) se obtiene a partir de L_{sen} con la Eq. (1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferencias entre las temperaturas de brillo simuladas y medidas por el satélite de la Tabla 1 oscilan entre -0.2 y 1.1 K, con valor medio de 0.6 K, desviación estándar de 0.5 K y diferencia cuadrática media (rmsd) de $\pm 0.8 \text{ K}$. La Figura 1 muestra la comparación entre radiancias en el sensor simuladas y medidas por el satélite. Aparentemente,

las radiancias simuladas sobreestiman las de satélite, especialmente para los valores más altos. La desviación media y estándar son, respectivamente, 0.082 y 0.063 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ($\text{rmsd}=\pm 0.104 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ o $\pm 1.1\%$). Estas diferencias son comparables con la incertidumbre en la calibración de la banda 6 del ETM+ (Barsi *et al.* 2003 y 2007).

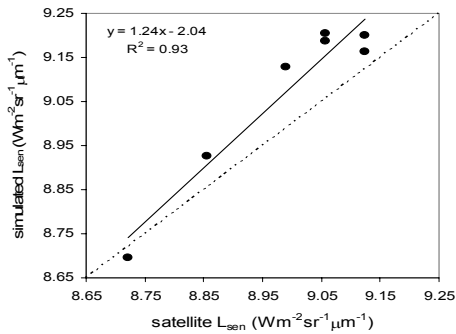


Figura 1.- Comparación entre la radiancia en el sensor simulada y medida por el satélite. La línea continua es la regresión lineal de los datos.

La temperatura de la superficie puede obtenerse a partir de la radiancia L_{sen} medida por el satélite mediante la forma aproximada

$$B(T) = \frac{L_{\text{sen}} - L^{\uparrow}}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L^{\downarrow} \quad (3)$$

donde las magnitudes espectrales de la Eq. (2) han sido promediadas espectralmente con la función $f(\lambda)$. La temperatura T se calcula análogamente a la Eq. (1). Utilizando los parámetros atmosféricos (τ , L^{\uparrow} y L^{\downarrow}) obtenidos a partir de los radiosondeos locales, y el valor medido de emisividad, hemos determinado la temperatura de la superficie en la zona de validación, que se muestra en la Tabla 2 junto con la diferencia $\delta T = T_g - T$. Las diferencias varían entre -0.6 y 1.4 K, con valor medio de 0.7 K y $\text{rmsd}=\pm 1.0$ K. Alternativamente, los parámetros atmosféricos necesarios para la Eq. (3) pueden obtenerse a partir de la herramienta de corrección atmosférica (HCA) disponible en <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov> (Barsi *et al.* 2005). En ella se utilizan datos del modelo de re-análisis de NCEP, que proporcionan perfiles atmosféricos con cobertura global en una rejilla de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ cada 6 horas. Dadas las coordenadas de la zona de estudio, la fecha y la hora de paso, la herramienta calcula el perfil atmosférico mediante interpolación espacial y temporal. Éste es introducido en el MODTRAN 4 para calcular los valores de τ , L^{\uparrow} y L^{\downarrow} en la banda 6 del ETM+. Con estos datos, hemos aplicado la Eq.

(3) para obtener T , y las diferencias $\delta T = T_g - T$ resultantes se muestran en la Tabla 2 (HCA-1). Adicionalmente, es posible modificar los perfiles de NCEP con las condiciones en superficie medidas en el primer nivel de los radiosondeos. Los resultados para este caso están también en la Tabla 2 (HCA-2). En el primer caso, las diferencias varían entre -1.8 y 1.3 K, con valor medio nulo y $\text{rmsd}=\pm 1.1$ K. Estos resultados son similares, dentro de los márgenes de error, a los obtenidos con los radiosondeos (ver Figura 2). En el caso HCA-2, los resultados son similares excepto para la fecha 24/07/06, donde se produce una sobreestimación de 4 K respecto a la temperatura medida in situ.

Tabla 2.- Temperatura de la superficie obtenida a partir de los datos de satélite y el radiosondeo (T). δT es la diferencia entre la medida in situ (T_g) y T .

Las dos últimas columnas muestran δT para la herramienta de corrección atmosférica.

Fecha	Radiosondeo		HCA-1	HCA-2
	T (°C)	δT (K)	δT (K)	δT (K)
12/08/04	28.0	0.2	0.0	1.2
21/07/05	26.9	1.2	1.3	-0.7
06/08/05	26.8	1.3	0.5	0.5
24/07/06	28.2	0.6	-0.5	-4.0
02/08/06	27.6	1.4	-0.8	0.3
11/07/07	27.5	-0.6	-1.8	0.7
20/07/07	27.4	0.6	1.1	-0.2

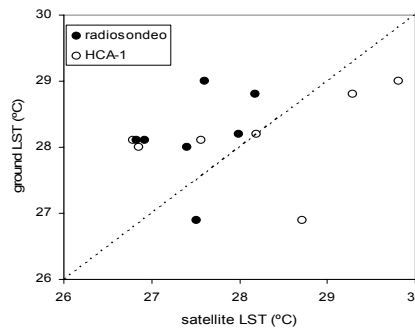


Figura 2.- Comparación entre la temperatura de superficie medida in situ y la obtenida a partir de los datos de satélite con los radiosondeos y HCA-1.

Las diferencias entre las temperaturas obtenidas a partir de los radiosondeos locales y de la HCA se deben a las diferencias entre los perfiles de temperatura y vapor de agua usados como entrada en el modelo MODTRAN 4. Los perfiles NCEP dan mayores valores de agua precipitable que los radiosondeos, pero temperaturas atmosféricas inferiores. Como resultado, la LST obtenida con

HCA sobreestima la obtenida con los radiosondeos en 0.7 K de promedio. No existe una gran correlación entre las diferencias de LST y las diferencias en agua precipitable entre los radiosondeos y los perfiles NCEP. Esto es debido a que la corrección atmosférica no solo depende de W, sino de la distribución vertical de temperatura y vapor de agua en la atmósfera.

CONCLUSIONES

Utilizando medidas de campo, hemos comprobado la calibración de la banda térmica del ETM+ y la herramienta operativa de corrección atmosférica <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>. En los casos estudiados en este trabajo, se confirma la buena calidad del calibrado y que es posible obtener la LST a partir de datos ETM+ con un error de ± 1 K. Es de destacar los buenos resultados obtenidos en casos con humedad atmosférica relativamente alta ($W > 2$ cm).

BIBLIOGRAFÍA

- Barsi, J. A., J.R. Schott, F.D. Palluconi, D.L. Helder, S.J. Hook, B.L., Markham, G. Chander, E.M. O'Donnell. 2003. Landsat TM and ETM+ Thermal Band Calibration, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(2): 141-153.
- Barsi, J. A., J. R. Schott, F. D. Palluconi, and S. J. Hook. 2005. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments," *Proc. SPIE Vol. 5882*, doi: 10.1117/12.619990.
- Barsi, J.A., B.L. Markham, D.L. Helder, and G. Chander. 2007. Radiometric calibration status of Landsat-7 and Landsat-5, *Proc. SPIE*, 6744: 67441F.
- Berk, A., G. P. Anderson, P. K. Acharya, J. H. Chetwynd, L. S. Bernstein, E. P. Shettle, M. W. Matthew, and S. M. Adler-Golden. 1999. *MODTRAN 4 user's manual*, Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate, Air Force Materiel Command, Hascom AFB, MA, 95 pp.
- Coll, C., V. Caselles, J. M. Galve, E. Valor, R. Niclòs, J. M. Sánchez, and R. Rivas. 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 97: 288-300.
- Coll, C., V. Caselles, J. M. Galve, E. Valor, R. Niclòs, and J. M. Sánchez. 2006. Evaluation of split-window and dual-angle correction methods for land surface temperature retrieval from Envisat/AATSR data, *Journal of Geophysical Research*, 111, 12105, doi 10.1029/2005JD006830.
- Coll, C., V. Caselles, E. Valor, R. Niclòs, J.M. Sánchez, J.M. Galve, and M. Mira. 2007. Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces, *Remote Sensing of Environment*, 110: 162-175.
- Coll, C., S. J. Hook, and J. M. Galve. 2009. Land surface temperature from the Advanced Along-Track Scanning Radiometer: Validation over inland waters and vegetated surfaces, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 47(1): 350-360.
- Galve, J. M., C. Coll, V. Caselles and E. Valor. 2008. An atmospheric radiosounding database for generating land surface temperature algorithms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46(5):1547-1557.
- Hook, S. J., G. Chander, J. A. Barsi, R. E. Alley, A. Abtahi, F. D. Palluconi, B. L. Markham, R. C. Richards, S. G. Schladow, and D. L. Helder. 2004. In-flight validation and recovery of water surface temperature with Landsat-5 thermal infrared data using an automated high-altitude lake validation site at Lake Tahoe, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(12): 2767-2776.
- Rubio, E., V. Caselles, C. Coll, E. Valor, and F. Sospedra. 2003. Thermal-infrared emissivities of natural surfaces: Improvements on the experimental set-up and new measurements, *International Journal of Remote Sensing*, 24(24): 5379-5390.
- Schott, J. R., J. A. Barsi, B. L. Nordgren, N. G. Raqueno, and D. de Alwis. 2001. Calibration of Landsat thermal data and application to water resource studies, *R. S. of Environment*, 78: 108-117.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto CGL2007-64666/CLI, A.C. CGL2007-29819-E, con becas FPI de J. M. Galve y FPU de M. Mira y contrato Juan de la Cierva de J. M. Sánchez. El CEAM realizó los radiosondeos.