

OBTENCIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE A PARTIR DE LA SERIE HISTÓRICA LANDSAT

J. C. Jiménez-Muñoz (*), J. A. Sobrino (*), J. Cristóbal (**), G. Sòria (*), M. Ninyerola (***), X. Pons (****), V. Hidalgo (*), B. Franch (*), M. Romaguera (*), R. Oltra-Carrió (*), Y. Julien (*), C. Mattar (*).

(*). *Unidad de Cambio Global, Laboratorio de Procesado de Imágenes, Parque Científico de la Universidad de Valencia, P. O. Box 22085, E-46071 Valencia. jrcm@uv.es*

(**) *Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Vallès.*

(***) *Unidad de Botánica, Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Cerdanyola del Vallès.*

(****) *Departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Barcelona y Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, 08193 Cerdanyola del Vallès.*

RESUMEN

La teledetección térmica proporciona información de gran interés acerca de los procesos que ocurren en la superficie de nuestro planeta. En concreto, las imágenes térmicas a media y alta resolución permiten realizar distintos estudios medioambientales, como por ejemplo la estimación de la evapotranspiración a partir de la ecuación de balance energético, de gran aplicación en una problemática tan actual como es la gestión de los recursos hídricos. En este sentido, el lanzamiento en 1982 del sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo de la plataforma Landsat-4 y su posterior continuación en 1984 con el lanzamiento de la plataforma Landsat-5, actualmente operativa, ha permitido a los usuarios disponer de una base histórica de más de 25 años de imágenes térmicas a 120 metros de resolución espacial. El lanzamiento en 1999 de la plataforma Landsat-7 con el sensor *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+) ha permitido además disponer de imágenes térmicas con una resolución de 60 metros, si bien debido a un fallo técnico del sensor su uso está muy limitado. El presente trabajo se centra en la estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST), que es la principal variable a obtener cuando se trabaja con datos medidos en el infrarrojo térmico. El trabajo presenta los distintos algoritmos que pueden emplearse para la obtención de esta variable a partir de datos Landsat, haciendo un especial hincapié en aquellos algoritmos que permiten realizar un procesamiento de forma operacional.

ABSTRACT

Thermal remote sensing provides useful information of surface processes occurring in our planet. In particular, thermal imagery at medium and high spatial resolution is useful in many environmental studies, such as evapotranspiration estimation from the energy balance equation, which is a key parameter when working in water resources management. In this sense, the launch in 1982 of the *Thematic Mapper* (TM) sensor on board the Landsat-4 platform and its continuity in 1984 with the launch of Landsat-5 platform, currently operative, have provided the users with thermal imagery at 120 meters spatial resolution for more than 25 years. In addition, the launch in 1999 of the *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+) on board the platform Landsat-7 have provided thermal imagery at 60 meters spatial resolution, despite that its use is limited due to a technical failure in the sensor. This paper focuses on the Land Surface Temperature (LST) retrieval, which is the main variable to be extracted when working with thermal infrared data. The paper shows the different algorithms that can be used to retrieve this parameter from Landsat data, highlighting those ones which allow an operational retrieval.

Palabras clave: temperatura, infrarrojo térmico, monocanal, Landsat.

INTRODUCCIÓN

El lanzamiento de la serie Landsat ha supuesto la creación de una base histórica de datos térmicos (desde 1982 hasta la actualidad) a media resolución espacial, de gran utilidad en distintos estudios medioambientales tales como la gestión de los recursos hídricos mediante la estimación de la evapotranspiración a partir de la resolución de la ecuación de balance energético.

Cuando se trabaja con teledetección térmica, la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) es la principal variable a obtener. En este trabajo, se muestran los distintos algoritmos que permiten una estimación de este parámetro a partir de los datos térmicos proporcionados por la banda 6 (B6) de los sensores *Thematic Mapper* (TM) a bordo de las plataformas Landsat-4 (L4) y Landsat-5 (L5), y del sensor *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+) a bordo de la plataforma Landsat-7 (L7).

La base teórica de los algoritmos de estimación de la TST es la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR) aplicada a la región del infrarrojo térmico, dada por:

$$L_{sen} = \left[\varepsilon B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_{\downarrow} \right] \tau + L_{\uparrow} \quad (1)$$

Siendo:

- L_{sen}: radiancia medida por el sensor
- ε: emisividad de la superficie
- B: ley de Planck
- T_s: temperatura de la superficie terrestre
- L_↓: radiancia atmosférica descendente
- τ: transmisividad atmosférica
- L_↑: radiancia atmosférica ascendente

Excepto la TST dada por el término T_s, el resto de magnitudes son espectrales, aunque no aparece explícitamente esta dependencia por simplicidad en la notación.

ALGORITMOS

Inversión directa de la ETR

La TST (T_s) puede obtenerse mediante inversión directa de la ETR dada por la Ec. (1):

$$B(T_s) = \frac{L_{sen} - L_{\uparrow} - \tau(1 - \varepsilon)L_{\downarrow}}{\tau\varepsilon} \quad (2)$$

donde finalmente T_s se obtiene por inversión de la ley de Planck. Nótese que para poder calcular T_s es necesario conocer, además de la emisividad de la superficie (incógnita presente en cualquier algoritmo de estimación de TST), los parámetros atmosféricos. En principio, estos parámetros pueden calcularse a partir de perfiles atmosféricos (que deben corresponder aproximadamente a la hora de adquisición de la imagen) y códigos de transferencia radiativa. A pesar de que este ha sido el principal inconveniente de la técnica monocal, ya que no siempre es posible disponer de perfiles atmosféricos, actualmente el problema tiene en parte solución gracias a los resultados obtenidos por los modelos de predicción numérica. Un claro ejemplo de la aplicación a datos Landsat es la aplicación web desarrollada por Barsi et al. (2003; 2005), en la que el usuario obtiene los valores de τ, L_↑ y L_↓ para su imagen. Sin embargo, esta aplicación no permite una obtención de la TST de forma operacional para una serie histórica de datos, ya que la aplicación web únicamente proporciona un valor puntual para una

imagen (por lo que el usuario tendría que rellenar cada vez el formulario web) y sólo para imágenes posteriores a 2003. En los siguientes apartados se muestran algunos algoritmos que podrían aplicarse de forma operacional a la serie Landsat.

Algoritmo monocal de Qin, Karnieli y Berliner

Qin et al. (2001) desarrollaron un algoritmo monocal para estimar la TST con datos L5B6 a partir de la expresión:

$$T_s = \frac{1}{C_6} \{a_6(1 - C_6 - D_6) + [b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6]T_6 - D_6T_a\} \quad (3)$$

siendo $C_6 = \varepsilon_6\tau_6$, $D_6 = (1 - \tau_6)[1 + (1 - \varepsilon_6)\tau_6]$, $a_6 = -67.355351$, $b_6 = 0.458606$ y T_a la temperatura atmosférica media. Con el fin de evitar la dependencia de los parámetros τ y T_a, Qin et al. (2001) propusieron aproximaciones lineales de estos parámetros con el vapor de agua y con la temperatura del aire, respectivamente. Estas aproximaciones no son únicas, y dependen de la selección previa de una atmósfera estándar, aplicando también un criterio de temperatura del aire “alta” o “baja” no del todo bien establecido.

Algoritmo monocal de Jiménez-Muñoz y Sobrino

Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003) desarrollaron un algoritmo monocal generalizado, en principio aplicable a cualquier banda térmica con un ancho de banda entre aproximadamente 0.5 y 1.5 μm. Este algoritmo monocal viene dado por:

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (4)$$

donde γ y δ son dos parámetros que pueden obtenerse a partir de la radiancia (L_{sen}) o temperatura de brillo del sensor (T_{sen}) y ψ_i son las llamadas funciones atmosféricas, que dependen en principio de los parámetros τ, L_↑ y L_↓. Tal y como se ha comentado anteriormente, el algoritmo fue desarrollado en principio para poder aplicarse de forma general a cualquier banda térmica, aunque también se desarrollaron coeficientes particularizados para distintos sensores, entre ellos el TM de Landsat-5. Recientemente este algoritmo se ha actualizado y extendido su aplicación a datos L4B6, L5B6 y L7B6, tal y como se recoge en Jiménez-Muñoz et al. (2009). En este trabajo se muestran que los parámetros γ y δ pueden obtenerse de forma simplificada mediante las expresiones:

$$\gamma = \frac{T_{sen}^2}{bL_{sen}}, \delta = T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b} \quad (5)$$

donde la constante b tiene valores de 1290, 1256 y 1277 K para L4B6, L5B6 y L7B6, respectivamente. El cálculo de las funciones atmosféricas se puede abordar de distintas formas, tal y como se detalla en la siguiente sección.

APROXIMACIONES PARA LAS FUNCIONES ATMOSFÉRICAS

A partir de perfiles atmosféricos

Tal y como se muestra en Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003), las funciones atmosféricas vienen dadas por:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}; \psi_2 = -L\downarrow - \frac{L\uparrow}{\tau}; \psi_3 = L\downarrow \quad (6)$$

Si se dispone de perfiles atmosféricos, junto con un código de transferencia radiativa, es posible obtener los valores de τ , $L\uparrow$ y $L\downarrow$, y por tanto de las funciones ψ_i . Lógicamente esta es la forma más precisa de obtener estas funciones, pero presenta el mismo problema que la inversión directa de la ETR mostrada anteriormente, es decir, requiere de la disponibilidad de perfiles atmosféricos para la hora de adquisición de la imagen.

Dependencia con el vapor de agua

Con el fin de evitar la dependencia de perfiles atmosféricos, Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003) propusieron una dependencia única con el vapor de agua atmosférico, ya que este componente atmosférico es el responsable de la mayor parte de la absorción atmosférica que se produce en la región del infrarrojo térmico. Las expresiones de estas funciones para datos L4B6, L5B6 y L7B6, obtenidas a partir de distintas bases de datos de perfiles atmosféricos, pueden encontrarse en Jiménez-Muñoz et al. (2009). Es importante resaltar que en este caso el único dato necesario para estimar la TST, además de la emisividad, es el vapor de agua, necesitando por lo tanto un parámetro menos (temperatura del aire) que el algoritmo de Qin et al. (2001).

Dependencia con el vapor de agua y la temperatura del aire

Las estimaciones de TST pueden mejorarse bajo determinadas condiciones si se introduce, al igual

que en el algoritmo de Qin et al. (2001), una dependencia con la temperatura del aire además de la dependencia en vapor de agua, tal y como se propone en Cristóbal et al. (2009). Al igual que en el caso anterior, en la citada referencia pueden encontrarse los valores de las funciones ψ_i cuando se consideran estos dos parámetros de entrada.

Look-Up-Tables

Otra forma alternativa a las mostradas en los apartados anteriores para el cálculo de las funciones atmosféricas es el uso de *Look-Up-Tables* (LUTs), construidas a partir de datos de simulación obtenidos a partir de bases de datos de perfiles atmosféricos y códigos de transferencia radiativa, tal y como se propone en Jiménez-Muñoz et al. (2009).

RESULTADOS

La precisión del algoritmo monocanal en su forma generalizada ha sido analizada tanto a partir de análisis de sensibilidad como a partir de medidas in situ aplicando éste a distintas bandas térmicas de sensores de observación de la Tierra (Jiménez-Muñoz y Sobrino, 2003). Los resultados han mostrado que el algoritmo proporciona buenos resultados bajo condiciones atmosféricas moderadas, con errores inferiores a los 2 K. En Sobrino et al. (2005) el algoritmo monocanal, en la primera versión de su adaptación a datos L5B6, fue también comparado con el algoritmo de Qin et al. (2001), proporcionando resultados similares con la ventaja adicional de utilizar un único dato de entrada. En el estudio presentado en Jiménez-Muñoz et al. (2009), el algoritmo monocanal actualizado y extendido a datos L4B6, L5B6 y L7B6 fue validado con datos simulados independientes, además de ser comparado con estimaciones de TST por inversión directa de la ETR a partir tanto de perfiles atmosféricos coincidentes con la fecha y hora de adquisición de la imagen como de perfiles atmosféricos obtenidos a partir de modelos de predicción numérica. Los errores en este caso fueron inferiores a 1.5 K. La Figura 1 muestra un ejemplo de mapa de TST obtenido con el algoritmo monocanal aplicado a una imagen Landsat-5/TM adquirida en 2005 sobre una zona agrícola en Barrax (Albacete). La precisión del algoritmo monocanal utilizando como datos de entrada tanto el vapor de agua como la temperatura del aire también ha sido analizada a partir de datos de simulación en Cristóbal et al. (2009), proporcionando de nuevo buenos resultados.

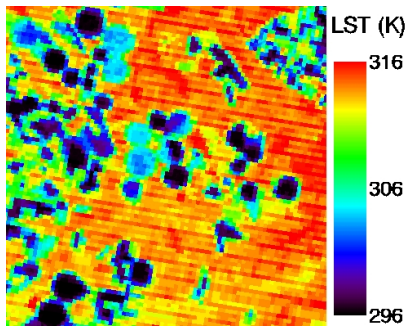


Figura 1.- Ejemplo de imagen de Temperatura de la Superficie Terrestre obtenida con el algoritmo monocanal a partir de una imagen Landsat-5 TM de la zona agrícola de Barrax (Albacete).

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado la viabilidad de obtener la TST a partir de datos térmicos adquiridos con los sensores TM y ETM+ a bordo de las plataformas Landsat, utilizando para ello distintos algoritmos basados en la técnica monocanal. Todos los métodos presentados proporcionan errores aceptables en la estimación, y la elección de uno de ellos dependerá de las condiciones y datos disponibles en cada situación. En concreto, el algoritmo monocanal dependiente únicamente del vapor de agua puede ser aplicado de forma operacional a series históricas, ya que el vapor de agua puede obtenerse externamente a partir de datos proporcionados por otros sensores o bien utilizando técnicas de *reanalysis*. En el caso de disponer además de valores históricos de temperatura del aire, se puede considerar también el algoritmo monocanal dependiente tanto del vapor de agua como de este último parámetro. Otra opción viable sería la creación de LUTs a partir de datos simulados bajo condiciones globales. La actuación iniciada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) dentro del Plan Nacional de Teledetección (PNT), a partir de la cual se podrá disponer en un futuro próximo de toda la serie histórica Landsat, podrá permitir un estudio detallado de la viabilidad de la aplicación de los distintos algoritmos mostrados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Qin, Z., A. Karnieli, and P. Berliner, 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel - Egypt border region,

International Journal of Remote Sensing, 22 (18), 3719-3746.

J. A. Barsi, J. L. Barker, and J. R. Schott, 2003. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument, in *IGARSS IEEE Intern. Geos. And Rem. Sens. Symp.*, Toulouse (France).

J. A. Barsi, J. R. Schott, F. D. Palluconi, and S. J. Hook, 2005. Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments, in *Proceedings of SPIE*, vol. 5882, Bellingham, WA.

J. C. Jiménez-Muñoz, and J. A. Sobrino, 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal Geophys. Res.*, vol. 108, no. D22, doi:10.1029/2003JD003480.

J. A. Sobrino, J. C. Jiménez-Muñoz, and L. Paolini, 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing Environment*, vol. 90, 434-440.

Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., Soria, G., Ninyerola, M., y Pons, X. 2009. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 1.

Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Ninyerola, M. y Pons, X. 2009. Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapour and air temperature, *Journal of Geophysical Research* (in press).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en parte gracias a la financiación recibida por la Agencia Espacial Europea (proyecto SEN2FLEX, RFQ 3-11291/05/I-EC) y por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (TERMASAT, ESP2005-07724-C05-04).