

Comparación de diferentes algoritmos de tipo Split-Window para estimar la temperatura de la superficie terrestre

J.A. Sobrino¹, Z.-L. Li², M.P. Stoll², F. Becker², V. Caselles¹

¹ Departament de Termodinàmica, Facultat de Física
Universitat de València

² Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg
Estrasburgo, Francia

RESUMEN

La temperatura de la superficie terrestre es un parámetro clave en los estudios de cambio climático global. Sin embargo su determinación a partir del espacio no resulta una tarea fácil ya que requiere realizar tanto la corrección atmosférica como la de emisividad. A pesar de estos inconvenientes, estos últimos años han sido fructíferos en cuanto al número de algoritmos split-window, que diferentes investigadores han proporcionado con el objetivo de responder a las precisiones requeridas sobre el dato de temperatura (0,3 K y 1 K respectivamente para la temperatura superficial del mar y de la tierra). En este trabajo presentamos un estudio comparativo entre los diferentes algoritmos. El objetivo es encontrar el(los) mejor(es) algoritmo(s) para determinar la temperatura de la superficie terrestre a partir de los datos AVHRR/2. Para ello hemos utilizado las bases de datos suministradas por NOAA/NESDIS y CSIRO.

ABSTRACT

Land surface temperature (LST) is a key parameter in the studies of global climate change. However its determination from space constitutes a difficult task that requires making both emissivity and atmospheric corrections. Despite this fact, the last years have been productive as for the number of split-window algorithms provided by different authors. In this work we present an intercomparison between the algorithms. The objective is to find out the best algorithm(s) suitable for LST inference from AVHRR/2 data. To do this two data sets acquired by NOAA/ NESDIS and CSIRO have been used.

Introducción

La temperatura de la superficie terrestre es uno de los parámetros claves en los estudios de cambio climático global. Su medida y seguimiento es de gran importancia. Esto es debido a que la temperatura de la superficie es un indicador del balance de energía en la superficie de la Tierra, y además proporciona informaciones sobre el

comportamiento y los procesos que tienen lugar en varias partes del mundo. Una correcta estimación de la temperatura de la superficie terrestre a escala global es por tanto necesaria, tal y como pone de manifiesto el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP).

Para responder a este carácter global, la única posibilidad es utilizar los datos suministrados por los satélites. Sin embargo una correcta determinación de la temperatura es difícil ya que los radiómetros a bordo de los satélites sólo miden las radiancias espectrales que están influidas no sólo por los parámetros de la superficie (emisividad y temperatura) sino también por la atmósfera existente entre la superficie y el sensor.

En la última década, dos tipos de métodos se han desarrollado para determinar la temperatura de la superficie terrestre (LST). El primero de ellos, es el denominado método monocanal. Este método determina la LST a partir de la radiancia medida en un canal del satélite. Sin embargo tiene como inconvenientes la necesidad de poseer un buen conocimiento de la emisividad de la superficie en el canal considerado y del perfil atmosférico, para corregir el efecto perturbador de la atmósfera, así como requiere de un buen modelo de transferencia radiativa. El segundo método denominado split-window es el más utilizado en la actualidad, utiliza dos canales adyacentes y presenta la ventaja de minimizar los efectos atmosféricos, como han puesto de manifiesto numerosos investigadores (Price, 1984; Becker, 1987; Becker and Li, 1990a; Sobrino et al., 1991; Prata and Platt, 1991, etc.). Sin embargo requiere también del conocimiento de la emisividad de la superficie.

A pesar de estos inconvenientes, estos últimos años han sido fructíferos en cuanto al número de algoritmos de tipo split-window, que diferentes investigadores han proporcionado con el objetivo de responder a las precisiones requeridas sobre el dato de temperatura (0,3 K para la temperatura superficial del mar y 1 K para la LST). Con estos antecedentes los objetivos del presente trabajo son: (1) encontrar el(los) mejor(es) algoritmo(s) para inferir la temperatura de la superficie terrestre a partir de los datos del AVHRR/2 y (2) hacer propuestas para la mejora de los mismos. Para ello se ha realizado una comparación entre diferentes algoritmos de tipo split-window publicados en estos últimos años, que ha sido posible gracias a la base de datos suministrada por NOAA/NESDIS y CSIRO.

Metodología

En este apartado se describe la metodología utilizada para llevar a cabo la comparación de los diferentes algoritmos.

*** Algoritmos utilizados**

En primer lugar presentamos aquellos algoritmos que hemos elegido para realizar el estudio comparativo (ver Tabla 1). Así como las situaciones en las que han sido obtenidos (ver Tabla 2). Para una descripción más detallada acudir a los trabajos originales. En lo que sigue, estos algoritmos serán citados de acuerdo con la abreviación dada en las tablas.

Autor o Grupo	Abrev.	Algoritmos
Li, Becker, Stoll y Sobrino (1994)*	LO	$T_i = A_s(\tau_s) + P \frac{T_i + T_s}{2} + M \frac{T_u}{2}$
Prata y Platt (1991)	FP	$T_i = 3.45 \frac{T_i - T_s}{\epsilon_s} - 2.45 \frac{T_i - T_s}{\epsilon_s} + 40 \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_s} + T_s$
Price (1984)	JP	$T_i = [T_s + 3.33 T_u] * \left[\frac{5.5 - \epsilon_s}{4.5} \right] + 0.75 T_s \Delta \epsilon$
Ulivieri y Cannizzaro (1985)	U1	$T_i = T_s + 3.00 T_u + 51.57 - 52.45 \epsilon$
Ulivieri, Castronuovo, Francioni y Cardillo (1992)	U2	$T_i = T_s + 1.8 T_u + 48(1 - \epsilon) - 75 \Delta \epsilon$
Sobrino, Caselles y Coll (1993)	SO	$T_i = T_s + 1.06 T_u + 0.46(T_s)^2 + 53(1 - \epsilon) - 53 \Delta \epsilon$
May, Stowe, Hawkins y McClain (1992)	NE	$T_i = 1.0162 T_s + 2.657 T_u + 0.5265(\sec \theta - 1) T_u - 4.58$

Tabla 1
Sumario de los algoritmos utilizados en la comparación

$$(T_s, T_a, T_s \text{ en } K \text{ y } T_0 = 273.15K, \epsilon = \frac{\epsilon_4 + \epsilon_5}{2}, \Delta \epsilon = (\epsilon_4 - \epsilon_5), T_{ds} = T_4 - T_s)$$

$$*P = 1 + B(\tau_s) \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + C(\tau_s) \frac{\epsilon - \epsilon_s}{\epsilon^2} \text{ y } M = D(\tau_s) + E(\tau_s) \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + F(\tau_s) \frac{\epsilon - \epsilon_s}{\epsilon^2}, \text{ donde}$$

B, C, D, E, F son coeficientes que dependen de la transmisividad (Sobrino et al., 1994).

Alg.	Satélite	Modelo de Transferencia	Atmósfera	Características de la superficie	
				T_0	Emisividad
LO	NOAA11	Lowtran-7	60 atmósferas $W = 0.15$ a 6.71 g/cm	250 a 320K	$\epsilon = 0.90$ a 1.0 $\Delta\epsilon = -0.02$ a 0.02
FP	NOAA11	Lowtran-7	14 atmósferas $W \approx 1.1 \text{ g/cm}$	?	$\epsilon_4 = \epsilon_5$ ¿rango?
JP	NOAA7	?	?	?	?
U1	NOAA7	Desarrollado en su Laboratorio	$W = 1.05$ a 3.45 g/cm	?	$\epsilon_4 = \epsilon_5 = 0.95$ a 1
U2	NOAA11	Igual que U1	$W = 0.4$ - 3 g/cm	?	$\epsilon = 0.925$ a 0.985 $\Delta\epsilon = 0$ a 0.01
SO	NOAA11	Lowtran-7	4 atmósferas del Lowtran-7; $W = 0.69$ a 3.32 g/cm^2	$(T_0 - 5)$ a $(T_0 + 5)$	$\epsilon = 0.96$ a 1 $\Delta\epsilon = -0.01$ a 0.01
NE	NOAA11	Sólo datos de mar	No	No	No

Tabla 2

Sumario de las condiciones y el método utilizado para obtener los algoritmos dados en la tabla 1. W es el contenido en vapor de agua, T_0 es la temperatura del aire a nivel del suelo

*** Determinación de la emisividad**

Para determinar la emisividad a partir de los datos del AVHRR/2 hemos utilizado dos métodos

- a.- El método de decorrelación propuesto por Becker y Li (1990b), que necesita pares de imágenes día/noche.
- b.- El método monocanal, resultado de la combinación entre los datos AVHRR/2, radiosondeos coincidentes con el paso del satélite y datos de temperatura medidos en el suelo. Como es bien conocido si se dispone de los datos anteriores siempre puede determinarse la emisividad, un ejemplo del procedimiento se encuentra en Becker y Li (1990a). Este método se ha aplicado en el caso de ausencia de pares de imágenes día/noche.

Resultados

En este apartado se dan los resultados obtenidos en la comparación. Para ello se han utilizado dos bases de datos proporcionadas por G. Gutman (NESDIS) y F. Prata (CSIRO).

*** Descripción de los datos utilizados**

La base de datos NESDIS contienen tres tipos de datos recogidos durante el periodo comprendido del 15 de enero al 31 de agosto de 1990 en 6 lugares de los Estados Unidos. Estos datos son imágenes de satélite, radiosondeos y datos convencionales. Los datos de satélite son diurnos y nocturnos, 11x11 AVHRR GAC NOAA-11 (4 km resolución) en diferentes épocas del año y sobre diferentes superficies. Los radiosondeos se tomaron cerca de los lugares seleccionados. Los datos convencionales consisten en observaciones de las estaciones meteorológicas que comprenden datos de presión, cubierta total del cielo, velocidad del viento y temperatura.

El conjunto de datos CSIRO pertenece a una campaña intensiva de medidas realizada durante el mes de agosto de 1990 en una región semiárida del Noroeste de Victoria, Australia. Una descripción detallada de este lugar así como de la experiencia de campo puede encontrarse en Prata et al., (1990). Estos datos comprenden imágenes de 21x21 pixels AVHRR NOAA-11 LAC (1 km de resolución), así como radiosondeos tomados a la hora de paso del satélite, y medidas nocturnas en el suelo.

*** Procesado de los datos**

El procesado de los datos se ha llevado a cabo siguiendo los pasos:

- 1- Eliminación de aquellos pixels contaminados por nubes, para ello no hemos ajustado al esquema presentado por Saunders y Kriebel (1988). Siempre que el porcentaje total de los pixels claros de las imágenes es inferior al 80% la imagen se ha rechazado.
- 2- Determinación de la emisividad y la temperatura de la superficie:
 - a.- Datos NESDIS: la emisividad se ha determinado a partir de una adecuada selección de los pares de imágenes día/noche de acuerdo con el método propuesto por Becker and Li (1990b) sobre 6 lugares en los Estados Unidos y asumiendo superficies lambertianas. Con ayuda de los radiosondeos, se ha procedido a realizar la corrección atmosférica, utilizando para ello el programa LOWTRAN-7 (Kneizys et al., 1988). De esta forma se puede acceder al dato de temperatura a nivel del suelo. La tabla 3 muestra las emisividades obtenidas para los canales 3, 4 y 5 del AVHRR/2 así como la

Lugar	Día	$\epsilon_3 \pm \sigma$	$\epsilon_4 \pm \sigma$	$\epsilon_5 \pm \sigma$	$T_s \pm \sigma (^{\circ}\text{C})$
Madison	19	0.959 ± 0.005	0.976 ± 0.006	0.979 ± 0.006	1.68 ± 0.57
	28	0.964 ± 0.006	0.982 ± 0.005	0.986 ± 0.004	0.71 ± 0.58
	57	0.978 ± 0.004	0.985 ± 0.006	0.986 ± 0.005	-1.94 ± 0.81
	83	0.931 ± 0.010	0.973 ± 0.008	0.986 ± 0.008	9.16 ± 1.24
	108	0.931 ± 0.014	0.972 ± 0.008	0.984 ± 0.008	20.01 ± 1.14
Burlington	138	0.932 ± 0.028	0.964 ± 0.011	0.984 ± 0.010	25.38 ± 1.80
	39	0.954 ± 0.007	0.987 ± 0.009	0.988 ± 0.008	3.81 ± 1.12
White Sand	54	0.826 ± 0.046	0.958 ± 0.023	0.969 ± 0.021	28.48 ± 4.35
Great Falls	45	0.978 ± 0.004	0.984 ± 0.011	0.982 ± 0.009	-9.75 ± 1.79
	59	0.958 ± 0.009	0.948 ± 0.007	0.912 ± 0.011	12.42 ± 2.00
Lake Charle	54	0.966 ± 0.015	0.980 ± 0.006	0.990 ± 0.006	18.59 ± 1.49
	118	0.970 ± 0.018	0.970 ± 0.008	0.979 ± 0.007	31.50 ± 1.82
	221	0.922 ± 0.046	0.937 ± 0.017	0.923 ± 0.016	34.87 ± 2.00
Raleigh	82	0.960 ± 0.011	0.978 ± 0.007	0.980 ± 0.006	25.76 ± 1.39
Durham	128	0.965 ± 0.017	0.975 ± 0.007	0.992 ± 0.006	28.31 ± 1.74
	169	0.906 ± 0.028	0.955 ± 0.011	0.966 ± 0.010	33.57 ± 1.30

Tabla 3

Valores medios de la temperatura y emisividad obtenidas a partir de los pares de imágenes día/noche para 6 lugares en los Estados Unidos.
representa el error cuadrático medio asociado

temperatura. Asimismo en esta tabla se da la desviación estándar, obtenida a partir de la media espacial de la LST y de la emisividad sobre cada sitio y para cada día analizado. Debido a la falta de medidas in-situ, estos resultados no pueden ser validados, simplemente podemos decir que:

- (1) los valores de emisividad obtenidos están de acuerdo con los esperados, y
 - (2) el rango de variación de la emisividad en el canal 3 (desde 0.826 a 0.978) es mayor que en los canales 4 (desde 0.955 a 0.987) y 5 (desde 0.969 a 0.992), tal y como cabía esperar de acuerdo con las medidas de Nerry et al., (1990).
- b.- Datos CSIRO: En este caso y debido a la ausencia de pares de imágenes día/noche, la determinación de la emisividad se ha llevado a cabo mediante el método monocanal anteriormente citado. En cuanto a la determinación de la temperatura, ésta se ha determinado a partir de los radiosondeos y de las emisividades obtenidas. Debe reseñarse que, para determinar T_s , la superficie de 21×21 pixels se asume homogénea para cada imagen (píxeles con igual emisividad). Esta hipótesis se ha comprobado comparando

Ts4 con Ts5 obtenidos a partir de las temperaturas radiométricas de cada imagen usando el programa LOWTRAN-7 con los radiosondeos adecuados y las emisividades obtenidas en el pixel central de cada imagen (Li et al., 1994).

*** Comparación entre los diferentes algoritmos**

En este punto la determinación de la temperatura de la superficie terrestre se ha llevado a cabo para cada uno de los algoritmos dados en la tabla 1.

Datos NESDIS

Para realizar esta comparación se han utilizado los valores de emisividad dados en la tabla 3. Debido a la falta de medidas in situ de la temperatura de la superficie, es difícil decidir cual de los algoritmos produce los mejores resultados, y por tanto tan sólo podremos discutir las diferencias relativas entre ellos. A modo de ejemplo, la figura 1 muestra para Madison, uno de los 6 lugares elegidos en Estados Unidos, la diferencia $Ts(j) - Ts(LO)$ en función de $Ts(LO)$, donde $Ts(j)$ representa la temperatura obtenida usando los algoritmos ($j=FP, JP, U1, U2, SO, NE$).

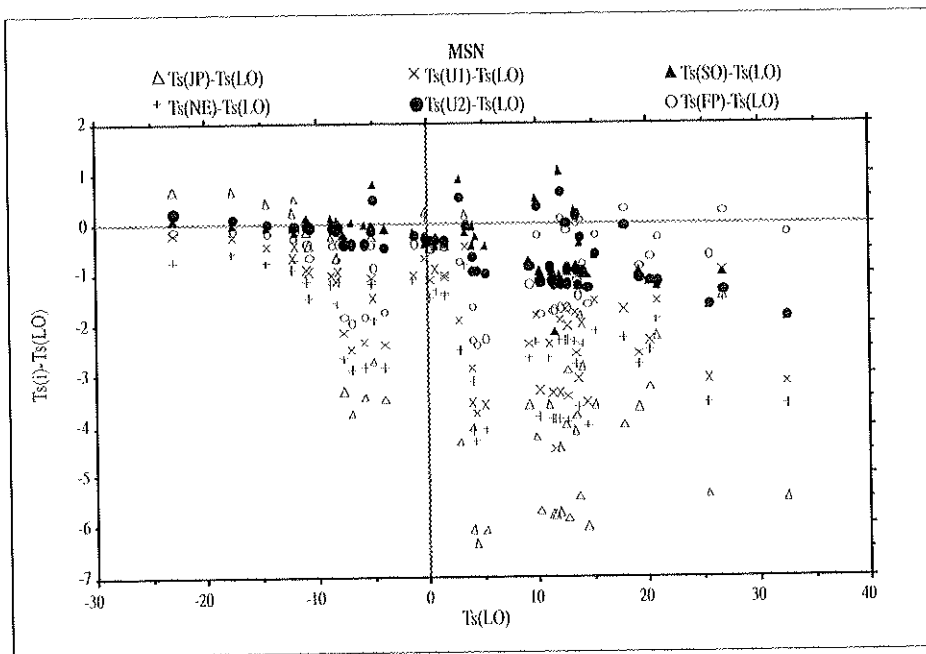


FIGURA 1
Diferencia entre $Ts(j)$ obtenida a partir de los algoritmos dados en la tabla 1
y $Ts(LO)$, para Madison

De esta figura así como de las obtenidas para los otros 5 lugares pueden extraerse las siguientes conclusiones (Li et al., 1994):

- (1) Para todos los datos, los algoritmos U2 SO y LO producen los mismos resultados (dentro de 1.5°C), mientras que los dados por FP están en acuerdo dentro de 2°C.
- (2) Los algoritmos JP, U1, y NE proporcionan las mayores diferencias, en algunos casos mayores de 6°C.

Datos CSIRO

Los datos CSIRO consisten en 3 imágenes nocturnas NOAA-11 de 21x21 AVHRR LAC pixels (Wal09735, Wal09749 y Wal09763).

La comparación en este caso se muestra en la tabla 4, de la misma se observa que:

- (1) La Ts obtenida por los algoritmos (LO, U2, SO) es próxima a la medida in-situ y,
- (2) la Ts determinada por los otros algoritmos (JP, U1, NE) es muy diferente de la medida en el suelo.

Órbita	09735	09749	09763
Ts (in situ)	5.2	4.4	3.5
$\Delta T(LO)$	0.24	0.11	0.09
$\Delta T(FP)$	-0.79	-0.73	-0.80
$\Delta T(JP)$	-2.32	-1.05	0.65
$\Delta T(U1)$	-1.87	-1.41	-1.28
$\Delta T(U2)$	-0.36	0.12	-0.07
$\Delta T(SO)$	-0.19	0.20	0.54
$\Delta T(NE)$	-1.69	-3.13	-3.95

TABLA 4

Comparación de la temperatura obtenida a partir de los algoritmos dados en la tabla 1 con la temperatura medida in situ Ts en el pixel central de cada imagen. $\Delta T = LST$ obtenida- Ts (in situ)

Discusión

Cinco de los 7 algoritmos dados en la tabla 1: LO, FP, U1, U2, SO se han obtenido desde un punto de vista teórico con la ayuda de programas de simulación. El grado de éxito de ellos dependerá lógicamente de los programas de transferencia radiativa utilizados, de la variabilidad de la superficie y de las características atmosféricas a partir de las cuales se han derivado.

Con respecto a los otros dos algoritmos (JP, NE), el primero se ha derivado a partir de la teoría primero para la obtención de la SST y después se extendió a la obtención de la LST, reemplazando T_i (i =canal 4 y 5) con $T_i(n_i+1-\varepsilon_i/n_i)$ (n_i es una constante para cada canal), mientras que el algoritmo NE se ha desarrollado para determinar la SST ajustando datos de barcos y boyas. Este último no incluye la dependencia con la emisividad, de ahí su diferencia con los otros algoritmos.

En secciones previas, se ha mostrado que aún cuando la emisividad es conocida, los algoritmos proporcionan valores muy diferentes para T_s . Esto es particularmente evidente para $T_s(JP)$ y $T_s(U1)$. No obstante debido a la falta de datos de campo, es difícil decir cual es el algoritmo que produce los mejores resultados. Sin embargo, para el conjunto de datos utilizados en el presente trabajo, los algoritmos LO, U2 y SO son los más satisfactorios, mientras que los algoritmos JP y U1 no son apropiados.

Conclusiones

El presente trabajo muestra una comparación entre diferentes algoritmos split-window publicados en los últimos años. A partir de la misma pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La introducción de coeficientes split-window que dependen del vapor de agua mejora sensiblemente el algoritmo split-window.
- El efecto de la emisividad es importante (de 2 a 4 K), como se aprecia cuando se aplica el algoritmo NESDIS desarrollado para mar a los datos de tierra.
- La mayoría de los algoritmos recientes (LO, U2, SO) producen buenos resultados en la comparación con los datos in-situ.

Finalmente, y aunque no sea posible conocer el valor exacto de los algoritmos, este trabajo muestra que su implementación es posible. Obviamente, debemos considerar que la dificultad del proceso de validación, podrá beneficiarse en el futuro de una mayor cantidad y calidad de las medidas de campo, una mejora de los modelos atmosféricos y un aporte de la nueva generación de sensores.

Agradecimientos

La investigación llevada a cabo no hubiera sido posible sin la financiación de la CEE (Proyecto EV5V-CT-91_0033/0035) y la colaboración del Dr G. Gutman por suministrarnos los datos NESDIS y el Dr. Prata por los datos CSIRO. Así como por la colaboración del Laboratoire de Météorologie Dynamique (Paris, Francia) y el Air Force Geophysics Laboratory (Massachusetts, USA) por suministrarnos los datos TIGR y el programa LOWTRAN-7 respectivamente.

Bibliografía

- Becker, F.:** 1987. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite, *Int. J. Remote Sens.* 10, 1509-1522.
- Becker, F. and Li, Z.L.:** 1990a. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands, *Remote Sens. Environ.* 32: 17-33.
- Becker, F. and Li, Z.L.:** 1990b. Towards a local split window method over land surface, *Int. J. Remote Sens.* 3: 369-393.
- Kneizys, F.X.:** et al. 1988. Users guide to LOWTRAN-7. Optical/Infrared Technology Division, U.S. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom, AFB, MA, AFGL-TR-88-0177.
- Li, Z.-L.:** et al. 1994. Intercomparison of an improved split-window with other split-window algorithms for estimating land surface temperature. *J. Geophys. Res.* (enviado).
- May, D.A.:** et al. 1992. A correction for Saharan dust effects on satellite sea surface temperature measurements. *J. of Geophys. Res.* 97(C3): 3611-3619.
- Nerry, F., Labed, J. and Stoll, M.P.:** 1990. Spectral properties of land surfaces in the thermal infrared band. Part I: Laboratory measurements of absolute spectral emissivity and reflectivity signatures. *J. Geophys. Res.* 95: 7027-7044.
- Prata, A.J., O'Brien, D.M. and Platt, C.M.R.:** 1990. Algorithms for deriving land surface temperature from satellite measurements. En 5th Australasian Remote Sensing Conference, Perth, Western Australia, 8-12 October, 256-266.
- Prata, A.J. and Platt, C.M.R.:** 1991. Land surface temperature measurements from the AVHRR. En 5th AVHRR data users conference, June 25-28, Tromsø, Norway, EUM P09, 433-438.
- Price, J.C.:** 1984. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA-7 AVHRR. *J. Geophys. Res.* 79: 5039-5044.
- Sauders, R.W. and Kriebel, K.T.:** 1988. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 9:123-150.
- Sobrino, J.A., Coll, C. and Caselles, V.:** 1991. Atmospheric corrections for land surface temperature using AVHRR channel 4 and 5. *Remote Sens. Environ.* 38:19-34.
- Sobrino, J.A., Caselles, V. and Coll, C.:** 1993. Theoretical split window algorithms for determining the actual surface temperature. *Il Nuovo Cimento*, 16: 219-236.
- Sobrino, J.A.:** et al. 1994. Improvements in the Split-Window Technique for Land Surface Temperature Determination, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* (en prensa).
- Ulivieri, C. and Cannizzaro, G.:** 1985. Land surface temperature retrievals from satellite measurements. *Acta Astronautica*, 12(12): 997-985.
- Ulivieri, C.:** et al. 1992. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites, COSPAR, 27 August - 5 September, Washington, DC, USA.