

Análisis comparativo del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR

E. Valor, V. Caselles, C. Coll, F. Sánchez, E. Rubio y F. Sospedra

Correo electrónico: Enric.Valor@uv.es

Departament de Termodinamica. Facultat de Física. Universitat de Valencia. 46100 Burjassot

RESUMEN

Las ciudades poseen una estructura térmica muy particular, con un gradiente de temperaturas apreciable entre el centro y los alrededores que generalmente se establece en regiones concéntricas. Este fenómeno se conoce como "efecto de isla térmica". La Teledetección espacial puede constituir una potente herramienta para su análisis, pues proporciona una visión sinóptica del campo de temperaturas. En este trabajo abordamos la influencia que la resolución espacial y espectral pueden tener en la detección y el seguimiento del efecto de isla térmica, mediante datos de los instrumentos TM, MUST y AVHRR sobre una ciudad de tamaño medio como Valencia.

PALABRAS CLAVE: Efecto de isla térmica, TM, MUST, AVHRR, Valencia

ABSTRACT

The "heat island" effect is the particular urban thermal field shown by cities, consisting of a thermal gradient from the center to the surroundings, generally distributed in concentric areas. Remote Sensing may be a powerful tool for analyzing this process, since it provides a synoptic view of the thermal field. In this paper the influence of the spatial and spectral resolutions in the detection and monitoring of the heat island is addressed. To this end we have used TM, MUST and AVHRR data, taken over a medium-sized city like Valencia, Spain.

KEY WORDS: Heat island effect, TM, MUST, AVHRR, Valencia

INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que la configuración de las ciudades provoca la alteración del microclima de aquellas áreas en que se asientan. Ello se debe fundamentalmente a modificaciones en la composición atmosférica (por emanación de gases), en el balance de energía (por el cambio en la composición de las superficies), y en la rugosidad (por las edificaciones) (Barry y Chorley 1984). Estos cambios conducen a la generación de una estructura térmica muy particular, generalmente distribuida en zonas concéntricas, denominada "efecto de isla térmica". Por ejemplo, de noche el centro urbano se calienta más que sus alrededores; mientras que durante el día puede ocurrir lo contrario (los alrededores se calientan más que el centro urbano) y tendríamos así una isla térmica invertida o una "isla de frescor".

La detección de este fenómeno se ha realizado tradicionalmente bien con puntos de medida fijos distribuidos en la ciudad, bien efectuando transectos de temperatura en diferentes direcciones. La utilidad de la Teledetección en este tipo de estudios, particularmente mediante el uso del sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo de los satélites NOAA, fue demostrada por Caselles et al. (1991).

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia de la resolución espacial y espectral en la detección y seguimiento del citado efecto de isla térmica en una ciudad de tamaño medio como Valencia. Para ello hemos tomado como referencia tres sensores distintos: *Thematic Mapper* (TM) con la mejor resolución espacial (120 m) y una sola banda en el infrarrojo térmico, *Medium Scale Surface Temperature* (MUST) con una resolución espacial moderada (240 m) y dos canales térmicos (Valor et al., 2000a), y AVHRR que posee también dos bandas térmicas pero tiene la menor resolución espacial (1,1 km).

Con el fin de disponer de datos "comparables" en los tres casos, y dado que el instrumento MUST se encuentra en la fase de estudio, hemos partido de una imagen real de TM y hemos procedido a simular la misma imagen tal como la registraría el instrumento MUST, en función de sus características técnicas particulares. La simulación de imágenes de nuevos instrumentos es una actividad que habitualmente se realiza al efecto de demostrar a la comunidad de usuarios potenciales su utilidad en diversos campos de aplicación (Abrams y Hook 1995, Rowan 1998, Teillet et al. 1997). Generalmente la simulación se lleva a cabo a partir de datos de instrumentos existentes con una mayor resolución espacial y espectral que el nuevo sensor. En cambio, el método que hemos desarrollado

simula un sensor de menor resolución espacial, pero con mayor resolución espectral que los datos de origen. Aquí radica la novedad del método propuesto. Aunque éste se ha desarrollado para los sensores MUST y TM, es completamente general y podría adaptarse a otros problemas similares de simulación. Por su parte, los datos AVHRR se han obtenido degradando espacialmente los datos MUST, con el fin de que las tres imágenes fueran realmente comparables, ya que no se disponía de una imagen AVHRR coincidente con la TM.

MÉTODO

El método de simulación desarrollado (ver Figura 1) considera el paso de un instrumento de 120 m de resolución espacial y una sola banda térmica situada en 10,5-12,5 μm (TM), a otro con menor resolución espacial (240 m) pero provisto de dos canales situados en 10,0-11,0 μm y 11,5-12,5 μm (MUST). La idea básica subyacente consiste en obtener la temperatura de la superficie terrestre (que es aproximadamente independiente de la longitud de onda) a partir de las medidas efectuadas por el TM, haciendo la correspondiente corrección atmosférica y de emisividad, e introducir dicha temperatura en la ecuación de transferencia radiativa (ETR) con el fin de simular las temperaturas radiométricas que los dos canales de MUST medirían en el techo de la atmósfera (Valor et al.,

2000b).

Para ello deben estimarse las variables que definen la perturbación de la atmósfera (transmisividad, τ_λ , radiancia atmosférica ascendente emitida hacia el instrumento, $L_{\lambda \text{ atm}}$ e irradiancia atmosférica descendente que llega a la superficie bajo observación, $I_{\lambda \text{ atm}}^\downarrow$ en los tres canales implicados.

Esto puede hacerse introduciendo un radio sondeo local coincidente con el paso del satélite (o en su defecto un perfil estándar adecuado en función de las condiciones atmosféricas reales) en un programa de transferencia radiativa como MODTRAN (Berk et al. 1989).

También se necesita una estimación de la emisividad de la superficie terrestre en los canales considerados. Para ello hemos utilizado el método propuesto por Valor y Caselles (1996), el cual permite calcular la emisividad efectiva de una superficie heterogénea y rugosa mediante un modelo físico en el que se introducen los valores de la emisividad térmica de los componentes de la superficie, de un lado, y una estimación de las proporciones de observación de dichas componentes a partir de medidas desde satélite en la región visible e infrarrojo próximo, del otro.

La inversión de la ETR permite obtener la temperatura corregida a nivel de la superficie a partir de los datos TM, la cual se introduce después en la misma ecuación aplicada esta vez en forma directa

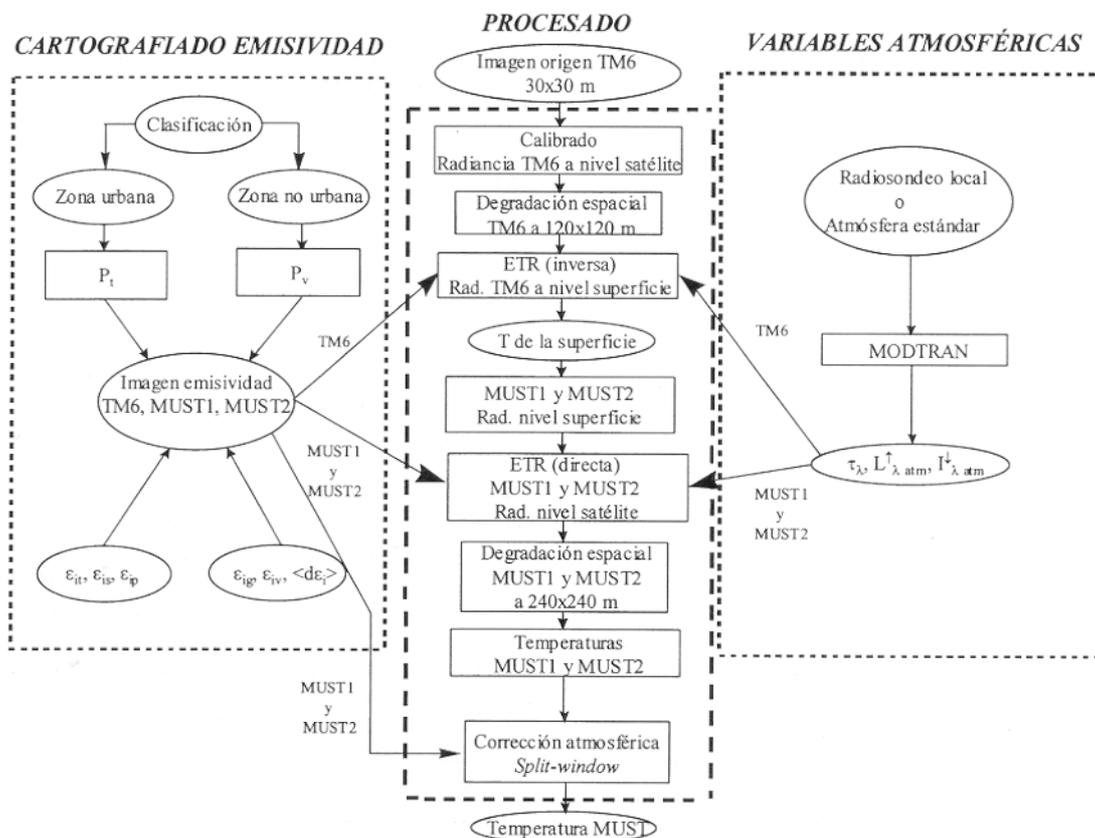


Figura 1. Diagrama de flujo que muestra esquemáticamente la aplicación del método para simular las dos bandas MUST (MUST1 y MUST2) a partir del canal térmico de TM (TM6).

con los parámetros de MUST, obteniéndose finalmente la radiancia en dichos canales en el techo de la atmósfera, pero todavía a la resolución espacial original de TM (120 m). El último paso consiste en degradar espacialmente estas medidas a la resolución de MUST (240 m). Una aproximación razonable para este propósito es el promedio de píxeles adyacentes en ventanas móviles de 2x2 píxeles no superpuestas (Justice et al. 1989; Moreno et al. 1993; Hay et al. 1997), lo que proporciona las medidas de radiancia de las bandas MUST a su resolución espacial correspondiente.

RESULTADOS

Se ha utilizado una imagen TM de Valencia (12 km x 12 km) del 26 de junio de 1987 tomada a las 12:30 pm (hora local), en la que los parámetros atmosféricos se han calculado a partir de la atmósfera estándar de verano en latitudes medias que proporciona el MODTRAN, junto con el modelo de aerosoles urbanos. En el cálculo de los mapas de emisividad, hemos realizado previamente una clasificación de la imagen en zonas urbanas y no urbanas, pues el tratamiento en ambos casos es diferente.

En las zonas urbanas, la emisividad efectiva se ha obtenido aplicando el modelo de Caselles y Sobrino (1989) en condiciones de observación vertical. En este caso la emisividad efectiva (ϵ_i) viene dada por:

$$\epsilon_i = \epsilon_{it} P_t + \epsilon_{is} (1-P_t) + (1-\epsilon_{is}) \epsilon_{ip} F (1-P_t) \quad (1)$$

donde ϵ_{it} y ϵ_{ip} son las emisividades de los techos y las paredes de los edificios en la banda i , ϵ_{is} es la emisividad de las calles en dicho canal, P_t es la proporción de techo vista por el sensor, y F es un factor de forma de transferencia de energía entre los diferentes elementos dado por

$$F = \left(1 + \frac{H}{S} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{H}{S} \right)^2} \quad (2)$$

siendo H y S la altura y la separación entre los edificios, respectivamente. Los valores de emisividad de canal para las bandas de TM y MUST a usar en la ecuación (1) se han obtenido a partir de los espectros de emisividad de diferentes materiales de construcción (Prof. J. W. Salisbury, comunicación personal). Dichos espectros se han integrado en las bandas TM y MUST usando las funciones filtro correspondientes, y posteriormente hemos obtenido valores medios agrupando los diferentes materiales según su uso (terrazas o tejados, paredes, calles). Por otro lado, hemos estimado un valor medio $P_t=0,60\pm0,04$ para la ciudad de Valencia a partir de los datos proporcionados por Caselles et al. (1991), quienes hicieron una estima-

ción de la densidad urbana con mapas a escala 1/10.000. Finalmente, los cálculos se han realizado para un intervalo de valores de la razón de aspecto WS entre 0,5 y 5. El resultado de estos cálculos vienen dados en la Tabla 1, donde mostramos las emisividades medias de los diferentes elementos así como la emisividad efectiva urbana en cada canal, junto con sus correspondientes errores. La emisividad efectiva se obtiene en este caso con un error entre $\pm 0,004$ y $\pm 0,006$.

Tabla 1. Valores utilizados en el modelo de Caselles y Sobrino (1989) para calcular la emisividad efectiva de la ciudad de Valencia. La última fila muestra los valores de emisividad efectiva para cada banda.

	TM6	MUST1	MUST2
ϵ_{it} (tejas, goma...)	0,968±0,005	0,961±0,009	0,970±0,005
ϵ_{ip} (hormigón)	0,960±0,001	0,952±0,009	0,960±0,003
ϵ_{is} (asfalto)	0,967±0,005	0,962±0,006	0,967±0,004
ϵ	0,975±0,004	0,969±0,005	0,976±0,004

Para las zonas no urbanas, la emisividad efectiva se ha obtenido con el modelo de Valor y Caselles (1996):

$$\epsilon_i = \epsilon_{iv} P_v + \epsilon_{ig} (1-P_v) + 4 \langle d\epsilon_i \rangle P_v (1-P_v) \quad (3)$$

donde ϵ_{iv} y ϵ_{ig} son las emisividades de vegetación y suelo en el canal i , P_v es el porcentaje de vegetación en el píxel, y $\langle d\epsilon_i \rangle$ representa el valor efectivo del término de cavidad, el cual tiene en cuenta las reflexiones que tienen lugar en el seno de las cavidades de una superficie rugosa. En los coeficientes de la ecuación (3) hemos utilizado los valores que muestra la Tabla 2 obtenidos a partir de medidas efectuadas en el campo, con los que la emisividad efectiva para zonas no urbanas se obtiene con un error alrededor de $\pm 0,010$.

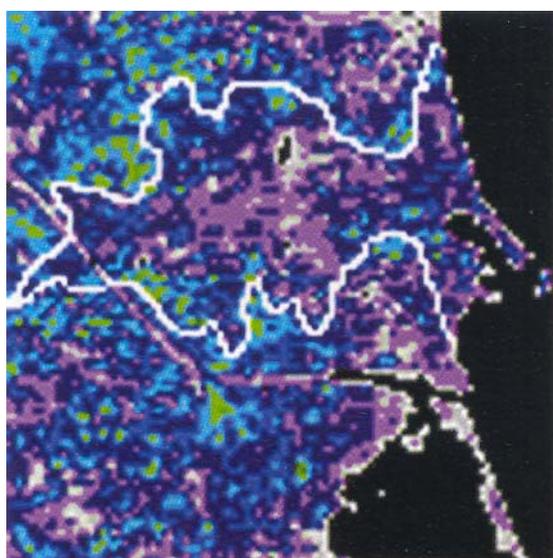
Tabla 2. Valores utilizados en el modelo de Valor y Caselles (1996) para el cálculo de la emisividad efectiva de las zonas no urbanas alrededor de Valencia.

	TM6	MUST1	MUST2
ϵ_{ig}	0,974±0,006	0,972±0,004	0,977±0,005
ϵ_{iv}	0,988±0,010	0,988±0,010	0,988±0,012
$\langle d\epsilon_i \rangle$	0,015±0,006	0,017±0,006	0,014±0,005

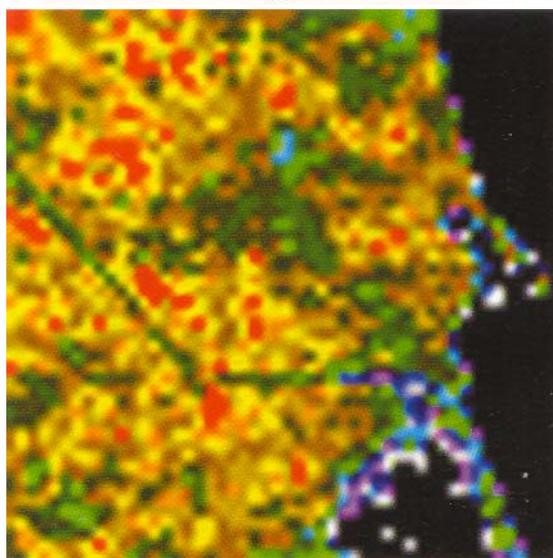
Con estos datos se simularon los datos medidos por las dos bandas MUST siguiendo el procedimiento descrito en la sección anterior. La Figura 2a muestra la imagen de temperatura original tras calibrar las medidas de TM, sin ningún tipo de corrección, dado que la situación más habitual en la práctica es no disponer de radiosondeos coincidentes con el paso del satélite, lo que imposibilita la aplicación de un método monocanal, siendo éste el único algoritmo que puede usarse con este instrumento. En el caso de MUST, puesto que posee dos bandas térmicas, sí es posible efectuar la corrección atmosférica aun no disponiendo de radiosondeo, mediante el uso de un algoritmo de tipo *split-window*. Por esa razón, hemos aplicado a los datos MUST el algoritmo operativo propuesto por Coll y Caselles (1997):

$$T=T_1+[A+B(T_1-T_2)]((T_1-T_2)+C(1-\varepsilon)+D\Delta\varepsilon+E) \quad (4)$$

donde T es la temperatura de la superficie terrestre ($^{\circ}\text{C}$), T_1 , y T_2 son las temperaturas radiométricas medidas por las dos bandas del instrumento ($^{\circ}\text{C}$), $\varepsilon=(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$ es la emisividad media en dichas bandas y $\Delta\varepsilon=\varepsilon_1-\varepsilon_2$ es la diferencia espectral de emisividad entre ambos canales. Los coeficientes empíricos de la ecuación fueron optimizados para los canales MUST1 y MUST2, utilizando una base de datos simulada, generada teniendo en cuenta diferentes valores de la temperatura de la superficie, varios tipos de suelos y vegetación, y distintos tipos de atmósferas con contenidos de vapor de agua variables (Caselles et al., 1998). Los valores obtenidos para los coeficientes fueron $A=1,664$, $B=0,225 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $C=47,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $D=-81,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $E=0,578 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El resultado de aplicar la ecuación (4) es la imagen de temperatura que se muestra en la Figura



(a)



(b)

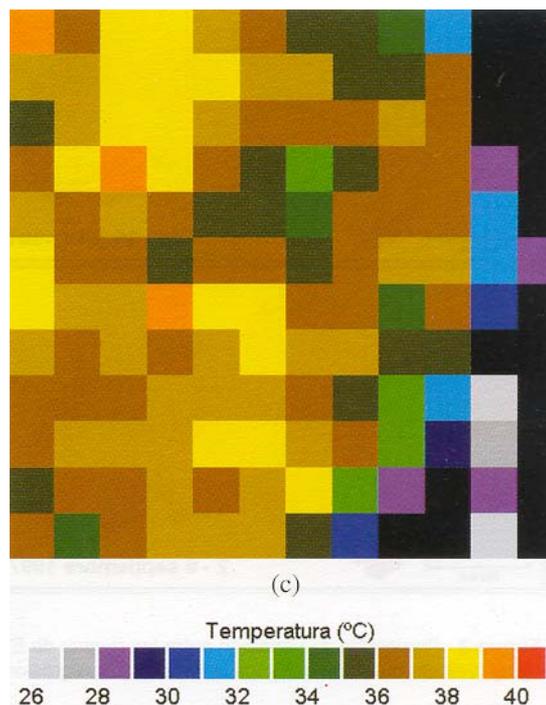


Figura 2. Imágenes de temperatura de la ciudad de Valencia: (a) TM (sin corrección atmosférica), (b) MUST (corregida de los efectos atmosférico y de emisividad), y (c) AVHRR (MUST degradada espacialmente a una resolución de 1,1 km). La máscara en negro corresponde al mar y la Albufera, y el marcador blanco indica la posición de la zona urbana de Valencia.

2b, esta vez con las correcciones atmosférica y de emisividad aplicadas operativamente con el algoritmo citado. Finalmente, la Figura 2c presenta la imagen simulada a la resolución espacial de AVHRR obtenida por degradación espacial de la imagen final MUST mediante el promedio simple de píxeles adyacentes. Esta terna de imágenes permite ilustrar el efecto de las diferentes resoluciones espaciales y espectrales en el análisis y seguimiento del fenómeno de isla térmica.

CONCLUSIONES

El análisis de las imágenes que se muestran en la Figura 2 nos permite afirmar que:

Como comentario general, se observa en dichas imágenes una inversión del efecto de isla térmica usual, es decir, el centro de la ciudad aparece más frío que los alrededores. Esto se debe a que por la mañana la estructura propia de calles y edificios provoca que el centro de la urbe se mantenga a la sombra, mientras que los alrededores de la ciudad ya están siendo calentados por el Sol (Prof. A. J. Pérez-Cueva, comunicación personal). La consecuencia es un calentamiento más rápido en estas zonas, apareciendo una estructura más fría en el centro urbano ("isla de frescor").

Desde el punto de vista de la resolución espacial, la imagen MUST permite detectar razonablemente bien la estructura interna de la isla térmica, a pesar de su menor resolución. Sin embargo, la resolución de MUST se revela más adecuada que

la del AVHRR, ya que con este último se llega a detectar la isla térmica, pero no se pueden identificar las estructuras térmicas que MUST revela dentro de la misma, al menos para una ciudad de tamaño medio como Valencia.

Desde el punto de vista de la resolución espectral, la corrección atmosférica y de emisividad aplicada a los datos MUST mejora significativamente el contraste entre las diferentes zonas urbanas, debido a que no solamente produce un aumento del valor absoluto de la temperatura en cada píxel, sino que además se incrementa el intervalo de variación de temperatura en la imagen. Este hecho permite medir mejor la intensidad del efecto de isla térmica, es decir, la diferencia entre la temperatura del centro urbano y de los alrededores. En cambio con el instrumento TM, en el que no es posible realizar una corrección atmosférica operativa pues sólo tiene un canal térmico, se puede detectar la isla térmica, pero la medida de su intensidad y estructura interna es más inexacta. Por ejemplo, si analizamos la imagen TM (Figura 2a), que no tiene corrección atmosférica, la intensidad de la isla térmica es de unos 6°C, puesto que en el centro se detecta una temperatura de 26°C (color gris claro) y en los alrededores ésta es de 32°C como mucho (color verde claro). En cambio, la imagen MUST muestra una temperatura en el centro de 32°C (color verde claro) y de 40°C en los alrededores (color rojo), siendo la intensidad de la isla térmica dos grados mayor que la observada con TM. Por tanto, una de las principales ventajas de MUST frente a TM es precisamente el hecho de disponer de dos bandas térmicas, lo que permite utilizar un algoritmo de corrección atmosférica de tipo *split-window*, más operativo que los métodos de tipo monocanal (caso del TM), cuyo principal inconveniente es la necesidad de disponer de radio sondeos locales que coincidan con el paso del satélite.

En resumen, podemos decir que el análisis del fenómeno de isla térmica requiere desde el punto de vista espectral dos bandas térmicas como mínimo, que posibiliten la aplicación operativa de algoritmos de corrección atmosférica y de emisividad, pues dichas correcciones redundan en una estimación más precisa de la intensidad del fenómeno. Por otro lado, la resolución espacial del orden del kilómetro debe rebajarse sustancialmente, pues ésta permitiría como mucho detectar la isla térmica, pero difícilmente medir su intensidad, y menos todavía analizar su particular estructura interna. De los resultados se desprende que una resolución de 240 m podría resultar suficiente para ciudades de tamaño medio. Por ello, el instrumento MUST podría representar una mejora respecto de los instrumentos térmicos operativos actualmente en uso (TM y AVHRR), ya que establece un compromiso entre la mejora de las resoluciones espacial y espectral en la medida de la temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Comisión de las Comunidades Europeas (proyecto ENV4-CT96-033 1), y a la CICYT (proyecto AMB96-1928-CE) la financiación recibida para llevar a cabo este estudio. Asimismo, deseamos expresar nuestra gratitud a los Drs. M.J. Estrela (CEAM), A. Fernández-Palacios (Junta de Andalucía), F. González-Alonso (INIA), M. Manso (INM), C. Martín Rico (INSA), A. Pérez-Cueva (Universitat de Valencia) y A. Vidal (Cemagref, Montpellier, Francia) por las valiosas sugerencias realizadas durante las 2 reuniones de usuarios potenciales del sensor MUST celebradas en Valencia.

BIBLIOGRAFIA

- ABRAMS, M. y HOOK, S.J. 1995. Simulated ASTER data for geologic studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 33 (3): 692-699.
- BARRY, R.G. y CHORLEY, R.J. 1984. *Atmósfera, tiempo y clima*. Barcelona. Omega 500 pp.
- BERK, A., BERNSTEIN, L.S. y ROBERTSON, D.C. 1989. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7. Tech. Rep. GL-TR-89-0122, Geophys. Lab., Bedford, Mass.
- CASELLES, V. y SOBRINO, J.A. 1989. Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*. 29: 135-146.
- CASELLES, V., LÓPEZ GARCÍA, M.J., MELIÁ, J. y PÉREZ CUEVA, A.J. 1991. Analysis of the heat-island effect of the city of Valencia, Spain, through air temperature transects and NOAA satellite data. *Theoretical and Applied Climatology*. 43: 195-203.
- CASELLES, V., RUBIO, E., COLL, C. y VALOR, E. 1998. Thermal band selection for the PRISM instrument 3. Optimal band configurations. *Journal of Geophysical Research*. 103(D14): 17057-17067.
- COLL, C. y CASELLES, V. 1997. A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research*. 102(D14): 16,697-16,713.
- HAY, G.J., NIEMANN, K.O., y GOODENOUGH, D.G. 1997. Spatial thresholds, image-objects, and upscaling: a multiscale evaluation. *Remote Sensing of Environment*. 62: 1-19.
- JUSTICE, C.O., MARKHAM, B.L., TOWNSHEND, J.R.G., y KENNARD, R.L. 1989. Spatial degradation of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*. 10 (9): 1539-1561.
- MORENO, J., GANDÍA, S., y MELIÁ, J. 1993. Geometric integration of NOAA AVHRR and SPOT data: low resolution effective parameters from high resolution data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 30: 1006-1014.
- ROWAN, L.C. 1998. Analysis of simulated advanced spaceborne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data of the Iron Hill, Colorado, study area for mapping lithologies. *Journal of Geophysical Research*. 103 (24): 32291-32306.
- TEILLET, P.M., STAENZ, K. y WILLIAMS, D.J. 1997. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices for

- for forested regions. *Remote Sensing of Environment*. 61: 139-149.
- VALOR, E. y CASELLES, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI. Application to European, African and South-American areas. *Remote Sensing of Environment*. 57: 167-184.
- VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., SÁNCHEZ, F., RUBIO, E. y SOSPEDRA, F. 2000a. La medida de la temperatura con el instrumento MUST. *Revista de Teledetección* 13: 69-74
- VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., SÁNCHEZ, F., RUBIO, E. y SOSPEDRA, F. 2000b. Simulation of a Medium-scale-surface-temperature instrument from Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* (en prensa).