

Análisis del clima urbano a partir de imágenes de satélite en el centro peninsular español

Analysis of urban climate in the centre of Spain by Making use of satellite images

M.^a E. PÉREZ GONZÁLEZ, M.^a P. GARCÍA RODRÍGUEZ y A. GUERRA ZABALLOS*

Recibido: 10 de enero de 2003

Aceptado: 21 de mayo de 2003

RESUMEN

Este trabajo analiza la isla térmica urbana de ciudades del centro de España (Madrid, Segovia, Ávila, Guadalajara y Toledo), con características físicas y humanas muy dispares. El contraste térmico campo-ciudad se analiza a partir de la información aportada por los satélites NOAA y Landsat y por las estaciones meteorológicas. Las temperaturas diurnas resultan con frecuencia más bajas en el interior de las ciudades que en las áreas no urbanizadas de su entorno. Esta anomalía térmica urbana diurna parece responder al distinto ritmo de caldeamiento-enfriamiento de los materiales, de modo que la «isla de calor urbana» sólo se manifiesta por la noche, mientras que durante el día las ciudades estudiadas muestran una «isla de frío» respecto a su entorno. Así, las ciudades estarían funcionando como acumuladores térmicos durante el día, y liberando la energía almacenada en todo el entramado urbano por la noche.

ABSTRACT

In this paper, urban thermic island of some cities of central Spain (Madrid, Segovia, Ávila, Guadalajara and Toledo), with very different natural and social characteristics, has been analyzed. Field-city thermic contrasts have been drawn out through NOAA and Landsat images, as well as weather stations data. Diurnal temperatures are often lower inside the cities than on not urbanised areas of their surroundings. This urban thermal anomaly seems to be related to the different heating-cooling rate of the land cover, so «urban heat island» is only apparent by night, while, inversely, during day time these cities show an «urban cool island» in relation to their neighbouring areas. In this way, cities work as heat accumulators during day time and releasing the stored energy during night.

SUMARIO 1. Introducción. 2. Área de estudio. 3. Material y métodos. 4. Resultados y discusión. 5. Conclusiones. 6. Referencias bibliográficas.

* Dpto. Análisis Geográfico y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid. Financiado con el Proyecto Complutense: PR 48-019852.

PALABRAS CLAVE

Temperaturas
Isla de frío
Isla de calor
Teledetección
España
ETM+

KEY WORDS

Temperatures
Cool-island
Heat-island
Remote sensing
Spain
ETM+

1. Introducción

El presente trabajo tiene como finalidad conocer la distribución espacial de las temperaturas diarias de las ciudades del centro peninsular español y su contraste con el entorno rural y/o industrial que las rodea. La investigación se centra en la capital de España (Madrid y grandes municipios de su área metropolitana) y capitales de provincia que la circundan, pertenecientes a las Comunidades Autónomas de Castilla-León (Ávila y Segovia) y Castilla La Mancha (Guadalajara y Toledo).

Numerosos autores han analizado el clima y microclima de áreas urbanas, comparándolo con los campos de alrededor. Entre los métodos utilizados destacan aquellos que toman datos *in situ* (datos de las estaciones meteorológicas y medidas puntuales de temperatura, humedad y viento realizados a lo largo de transectos urbanos, Oke *et al.*, 1972; Oke, 1987 y 1997; López García *et al.*, 1989; Yagüe *et al.* 1991; López Gómez *et al.*, 1993; Eliasson, 1996; Fernández *et al.* 1998; Unger *et al.*, 2001), y los que obtienen la información térmica a partir de sensores remotos, interpretando sus resultados, visuales y digitales, mediante las técnicas de teledetección (Carlson *et al.*, 1977, 1981 y 2000; Daveau, 1980; Owen *et al.* 1998; Castracane *et al.* 2001, Unger *et al.* 2001). En recientes artículos se destaca la disparidad de microclimas urbanos según las características propias de las ciudades y la influencia en los valores de radiación total de las edificaciones y del tipo de materiales utilizados en construcciones (Akbari *et al.*, 2001; Mardaljevic *et al.* 2002), así como de las variaciones introducidas por las superficies arboladas (Akbari *et al.* 2001). Otros autores destacan también la relación entre el incremento de áreas urbanizadas y la disminución de la humedad del suelo, con la consiguiente repercusión en el balance de radiación e intensidad del microclima urbano (Park, 1986; Unger, 1996; Carlson *et al.* 2000; Sailor 2002).

Las ciudades han destacado tradicionalmente por un microclima caracterizado por temperaturas en el centro de las mismas sensiblemente superiores a las del medio natural próximo a ellas. Este contraste térmico es denominado «isla de calor» y las causas más frecuentes que la originan son: el aporte adicional de calor por calefacciones, por tráfico, emisiones industriales, respiración humana, etc. Sin embargo, algunos autores ya citan que dicha «isla de calor» no es continua en el tiempo, pues afecta principalmente a las temperaturas nocturnas y se acentúa en los meses del invierno. Así, en contra de la opinión tradicional transmitida en muchas ocasiones por los medios de comunicación, algunos investigadores hablan de una «isla de frío urbana» durante el día, especialmente las primeras horas de la mañana (Valor *et al.*, 2000; Akbari *et al.* 2001 y Svensson *et al.* 2002).

Para entrar en esta polémica, en el presente trabajo se analiza el comportamiento térmico de diversas ciudades españolas. Para ello, además de las imágenes de satélite se utiliza la información tradicional de las estaciones meteorológicas (completas y termopluviométricas), mayoritariamente localizadas en las ciudades o núcleos rurales de mayor población. Sólo unas pocas están ubicadas en áreas rurales, por lo que dicha distribución dificulta el conocimiento detallado de los contrastes térmicos campo-ciudad. Para solventar esta limitación, la mayor parte de

los autores que analizan los microclimas urbanos utilizan muestreos de campo, consistentes en determinados transectos entre distintas partes de la ciudad, o entre ésta y su entorno. Aquí, se utiliza además la información de imágenes de los satélites Landsat y NOAA, pues ofrecen cartografía térmica con una alta resolución espacial y/o temporal. Además, las bandas pancromática, visibles e infrarrojas permitirán conocer diferentes aspectos del territorio (litología, vegetación natural dominante, tipo de cultivos, humedad, etc.), y de las características de las ciudades (estructuras urbanas, amplitud de las calles, orientación, tipo de edificaciones, etc.), que permitirán determinar los factores que influyen en la distribución de las temperaturas.

2. Área de estudio

Las ciudades estudiadas se sitúan en el centro de la Península Ibérica (fig. 1), topográficamente elevadas, pues se localizan en distintos sectores de la meseta castellana a una altitud que oscila entre 515 y 1150 m aproximadamente. Las distintas ciudades analizadas, su altitud y coordenadas geográficas están detalladas en la tabla 1. En esta tabla se incluyen además las estaciones meteorológicas disponibles de las áreas rurales de su entorno. El centro de España (excepciónando los sectores de sierra) se caracteriza por un clima mediterráneo con matiz continental, definido por amplitudes térmicas anuales y diarias notables, precipitaciones anuales escasas (400 a 500 mm) y muy irregulares, y un período seco estival entre 2 y 5 meses, en el que la evapotranspiración supera ampliamente a las precipitaciones. La ocupación del suelo en sus entornos es básicamente agrícola con cultivos de secano, pastizales y, en las vega de los ríos, regadíos.



Figura 1. Ciudades estudiadas.

Tabla 1: Localización de las estaciones meteorológicas

Situación	Altitud (m)	Latitud	Longitud
Segovia	1005	4° 57' 00"	4° 07' 37"
Ávila	1130	4° 39' 20"	4° 41' 52"
Cillán	1212	4° 42' 20"	4° 58' 42"
Guadalajara	685	4° 38' 05"	3° 09' 52"
Alcalá de Henares	600	4° 30' 56"	3° 18' 21"
Alcalá-El Encín	610	4° 31' 15"	3° 17' 27"
Madrid Barajas	582	4° 27' 15"	3° 32' 39"
Madrid Retiro	667	4° 24' 40"	3° 40' 41"
Madrid-Getafe	617	4° 18' 00"	3° 43' 21"
Madrid-C.Vientos	687	4° 22' 40"	3° 47' 21"
Talamanca Jarama	654	4° 44' 45"	3° 30' 57"
Toledo	516	39° 53' 05"	4° 02' 58"
Toledo-El Carpio	401	39° 51' 20"	4° 27' 57"

El área de estudio corresponde biogeográficamente a la región mediterránea, aunque en las áreas montañosas se dan especies de transición entre las formaciones mediterráneas y euro-siberianas. Las masas forestales más extensas en las proximidades de las ciudades están constituidas por *Quercus ilex* y *Pinus pinaster*, en la sierra, por *Quercus pyrenaica* y *Pinus sylvestris*. Las diferentes unidades geográficas pueden observarse en las imágenes Landsat (fig. 2 y 3), en las que, además, destacan importantes variaciones en el tamaño de las diferentes ciudades, por lo que se detalla en la tabla 2 el último censo de población. Las cifras de población incluidas en el censo resultan sólo orientativas sobre el tamaño de las ciudades, pues Madrid recibe importantes movimientos diarios de población entre el centro y su periferia, que afectan no sólo a sus numerosos municipios del área metropolitana, sino también a las capitales de provincia colindantes, especialmente Guadalajara y Toledo.

Tabla 2: Población de algunas ciudades españolas según el censo de 2001

Ciudad	Población
Ávila	49.712
Segovia	54.368
Guadalajara	68.248
Madrid	2.938.723
Toledo	68.382

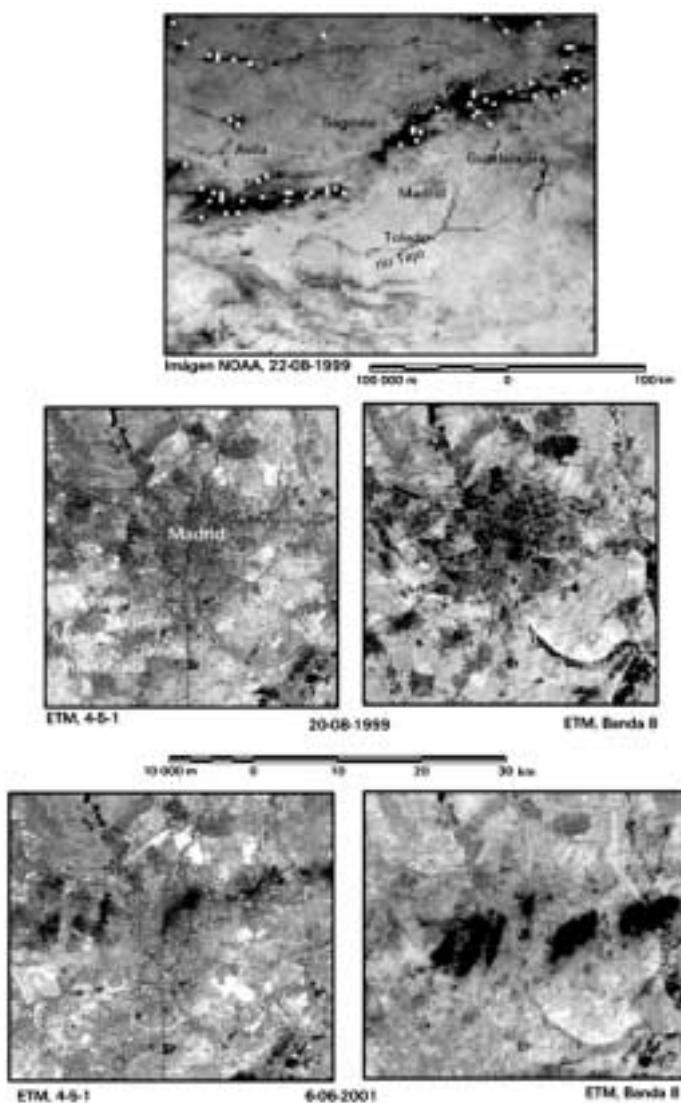


Figura 2. Imágenes NOAA-AVHRR y Landsat-ETM+.

A la hora de analizar el clima urbano de Madrid no puede limitarse el estudio a su centro, pues el fuerte crecimiento de población de su área metropolitana ha llevado recientemente a que varios municipios superen los 150.000 habitantes (Alcalá de Henares: 176.434; Alcorcón: 153.100; Fuenlabrada: 182.705; Getafe: 151.479; Leganés 173.584, Móstoles: 196.524, etc.), cifra muy superior a la mayor parte de las capitales de provincia españolas. Así, la población real de Madrid, especialmente durante el día, es superior a los 4 millones de habitantes. Las principales características de las distintas ciudades analizadas pueden observarse en las imágenes del

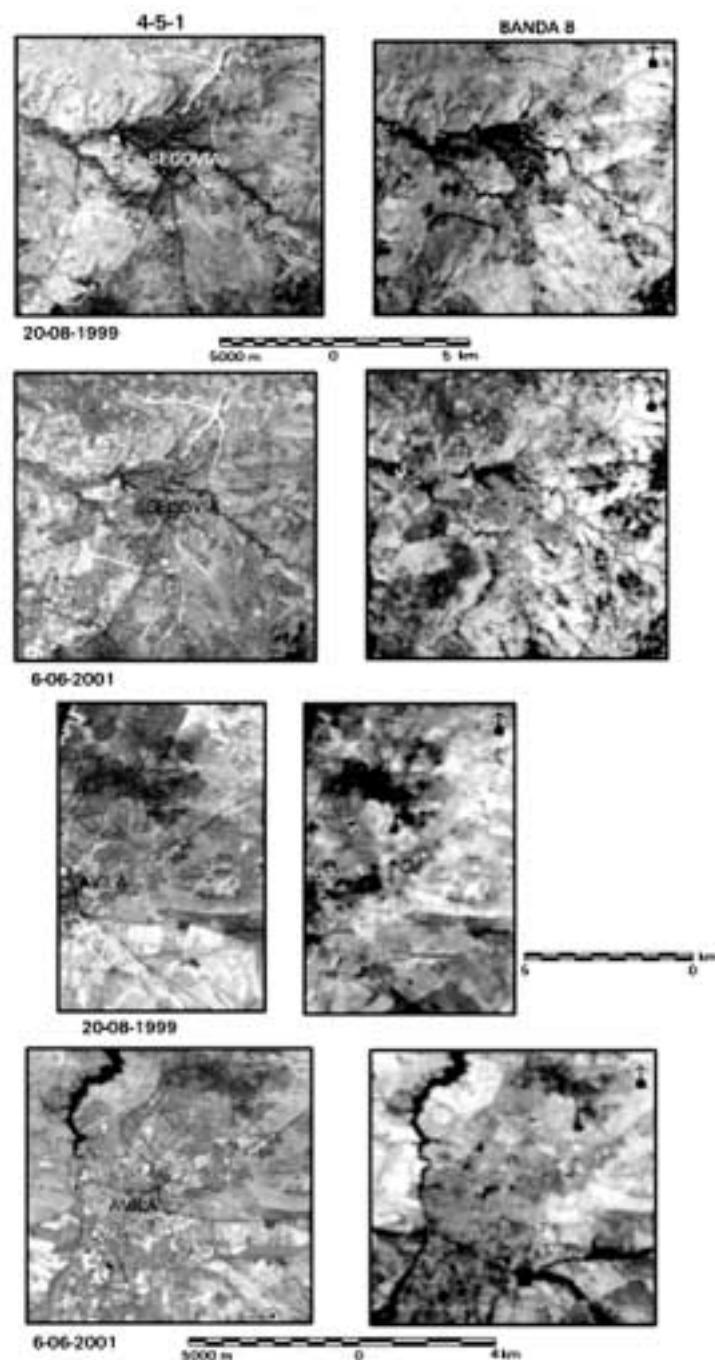


Figura 3. Imágenes ETM+, Segovia y Ávila.

satélite Landsat y, en el caso de Madrid, también se puede ver la distribución y extensión de los municipios más grandes, que se localizan principalmente por al sur y este de la capital.

3. Material y métodos

En el presente estudio se han utilizado imágenes del satélite Landsat, sensor ETM+ con fechas: 20-8-99 y 6-6-2001 correspondientes a la escena 201/032. Esta escena tiene 185 x 185 km y comprende la provincia de Madrid y parte de las de Toledo, Cuenca, Guadalajara, Ávila y Segovia. El sensor ETM+ pasa a las 10:48 horas (TMG). Asimismo se han empleado imágenes NOAA del sensor AVHRR de fechas: 22-8-99, 3-6-2001. La hora de pasada del satélite es en torno a las 15 horas (TMG). La información combinada de ambos sensores será muy útil para conocer la distribución espacial de las temperaturas superficiales diurnas, especialmente de las horas próximas a las máximas.

Las imágenes Landsat han sido calibradas radiométrica y espectralmente, y se han procesado las 8 bandas del visible e infrarrojo con resolución de 30 m para los canales 1,2,3,4,5,7 y 60 m para los canales térmicos 6 y 8. También se ha procesado la imagen pancromática con resolución de 15 m para dar información adicional sobre el entramado urbano. Las imágenes NOAA han sido corregidas también atmosféricamente. Todas las imágenes, Landsat y NOAA, se han corregido geométricamente y se han georreferido al sistema UTM.

Para el análisis de temperaturas se han empleado las bandas térmicas de ambos sensores cuyas longitudes de onda están entre 10.4-11.4 μm (banda 8 del ETM+ y 4 del AVHRR) y 11.4-12.5 μm (banda 6 del ETM+ y 5 del AVHRR). En el caso del satélite NOAA se ha obtenido la temperatura de brillo siguiendo las fórmulas de Caselles *et al.*, 1997:

$$T = T_1 + A(T_1 - T_2) + B$$

Siendo:

T = temperatura de la superficie del suelo o del mar en $^{\circ}\text{K}$

T_1 = canal 4 del sensor AVHRR

T_2 = canal 5 del sensor AVHRR

$A = 1.0 + 0.58(T_1 - T_2)$

$B = 0.51 + 40(1 - \epsilon) - 75\Delta\epsilon$

$\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$

ϵ_1 = valor de la emisividad en el canal 1

ϵ_2 = valor de la emisividad en el canal 2

$\Delta\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$

Para el sensor ETM+ esta temperatura de brillo no ha sido calculada, por lo que se ha trabajado con los valores de los números digitales. No obstante se comparan los resultados con las temperaturas obtenidas en las imágenes NOAA corregidas además atmosféricamente. Debe

destacarse que el objetivo del estudio no es conocer exactamente los valores de temperatura de cada punto, sino mostrar lo contrastes térmicos campo-ciudad y su influencia en los microclimas urbanos.

El análisis visual y digital de las imágenes, así como los diferentes tratamientos de las bandas se han realizado con el programa ERDAS Imagine 8.3.1. Aún cuando se han analizado diversas combinaciones de bandas, en este trabajo se seleccionan aquéllas en las que destaca mejor el entramado urbano, esto es, la combinación 4-5-1, para los canales rojo-verde-azul, respectivamente. Con igual finalidad se escogen las imágenes térmicas correspondientes a la banda 8 (Fig. 2 y 3).

Para comparar los datos obtenidos mediante las imágenes de satélite con la verdad terreno se ha contrastado la información de satélite con la ofrecida por las estaciones meteorológicas distribuidas por el área de estudio. Se han analizado las temperaturas diarias de las fechas y horas coincidentes con las imágenes en las estaciones termométricas (urbanas y rurales), y también con los valores medios de las temperaturas mínimas y máximas de la última serie CLINO («Normales Climatológicos Estandar»), 1961-1990, de las estaciones completas (Tabla 3).

Tabla 3: Temperaturas medias máximas y mínimas del período 1961-1990 de Madrid

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Barajas												
Máx.	10.4	12.2	15.3	17.6	22.4	28.0	32.8	32.0	27.7	20.9	14.1	10.5
Mín.	0.7	1.9	3.2	5.5	8.6	12.8	15.8	15.5	12.8	8.1	3.8	1.2
Retiro												
Máx.	9.6	11.4	14.7	17.2	21.4	26.4	30.7	30.1	25.9	19.1	13.0	9.6
Mín.	2.7	3.5	5.2	7.1	10.7	14.9	18.0	17.7	15.0	10.4	5.8	3.2
Cuatro Vientos												
Máx.	9.8	11.6	14.7	17.0	21.9	27.5	32.0	31.4	27.0	20.3	13.5	10.0
Mín.	1.3	2.3	3.8	6.0	9.5	13.8	17.2	16.7	13.8	9.0	4.5	1.9
Getafe												
Máx.	10.4	12.2	15.2	17.6	22.4	27.9	32.5	32.0	27.6	20.8	14.0	10.5
Mín.	1.3	2.2	3.9	6.2	9.7	14.1	17.3	17.0	14.1	9.3	4.5	1.8

4. Resultados y discusión

Al analizar los datos medios diarios de las series de 30 años (1961-90) en las diferentes estaciones meteorológicas estudiadas (Tabla 3) se observa un contrastado comportamiento entre las temperaturas máximas y mínimas de los núcleos urbanos. El caso más expresivo lo ofrece la ciudad de Madrid, al comparar las estaciones meteorológicas: Madrid-Retiro en el centro de la ciudad con estaciones situadas en las afueras; Madrid-Barajas situada en el aeropuerto, al este de la ciudad, y Madrid-Cuatro Vientos y Getafe localizadas en el sur. Las temperaturas medias mínimas son todo el año más bajas en las afueras que en el centro, mientras que esa tendencia se invierte al

analizar las medias máximas. Esto debe responder al más lento caldeamiento del centro de la ciudad durante el día, ya que la misma radiación debe calentar un mayor volumen (espacio construido), por lo que la temperatura media máxima en el centro es menor. Las diferencias térmicas entre estaciones son más contrastadas todo el año entre las mínimas y, en las dos variables, en verano.

Aunque a priori cabe explicar los valores de la estación del parque del Retiro por la amortiguación térmica de la vegetación, este factor no determina por sí sólo los contrastes térmicos con las restantes estaciones urbanas y periurbanas de la ciudad de Madrid. Así, el contraste campo-ciudad se mantiene siempre, pero con resultados opuestos, entre las temperaturas medias mínimas y máximas. Las primeras resultan claramente superiores en la ciudad, identificándose con ello la isla térmica nocturna. Sin embargo, las temperaturas medias de las máximas son todo el año más elevadas en las estaciones periféricas y con menor edificabilidad, expuestas a un mayor y más rápido caldeamiento del suelo y del aire, calor que pierde también con mayor rapidez durante la noche. Por ello, puede afirmarse que las áreas densamente urbanizadas, al menos en este ámbito mediterráneo, ofrecen temperaturas diurnas más bajas y mínimas más elevadas que su entorno menos construido o no urbanizado. Las causas que contribuyen al desigual ritmo de caldeamiento campo-ciudad son atribuidas a:

- sombras producidas por los edificios
- gran almacenamiento de calor en la mayor superficie de los centros urbanos
- mayor rapidez en el caldeamiento-enfriamiento del suelo desnudo y vegetación natural xerófita, lo que ofrece una alta amplitud térmica diaria
- diferente albedo.

Los valores de temperatura diarios obtenidos en las estaciones meteorológicas de cada ciudad analizada y su entorno se resumen en las tablas 4 y 5, para las fechas coincidentes con las

Tabla 4: Datos de temperatura diaria, en los días coincidentes con las imágenes Landsat

Estaciones	20-agosto-99			6-junio-01		
	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.
Ávila	29.2	20.3	11.3	24.0	17.3	10.6
Cillán	28.0	20.0	12.0	27.0	18.0	9.0
Toledo	35.8	27.1	18.4	37.0	26.0	15.0
El Carpio	37.0	26.0	15.0	35.0	25.5	16.0
Alcalá Henares	35.0	25.5	16.0	33.0	22.0	11.0
Encín	34.0	25.0	16.0	33.0	22.0	11.0
Madrid-Barajas	33.6	25.8	17.9	29.4	22.4	15.3
Madrid-Retiro	33.4	26.5	19.6	28.0	22.4	16.8
Madrid-C.Vientos	33.8	26.5	19.2	30.2	22.4	14.6
Madrid Getafe	34.1	26.8	19.4	29.6	23.0	16.4
Talamanca J.	35.6	26.0	16.4	28.9	22.1	15.2

imágenes Landsat y NOAA. El principal inconveniente de estos datos es su inadecuada representación espacial, lo que ha llevado a no poder seleccionar estaciones meteorológicas rurales en algunas ciudades (Guadalajara y Segovia). En el resto de ciudades se han considerado aquellas estaciones meteorológicas que presentan mayor similitud, aunque ésta no siempre resulte óptima (Ávila-Cillán; Toledo-El Carpio, Madrid Barajas, Retiro, Cuatro Vientos y Getafe-Talamanca).

A partir de estas tablas se deduce que tanto Madrid como Toledo se comportan como evidentes islas de calor nocturna, con temperaturas mínimas más elevadas en los centros urbanos que en las estaciones rurales, e «islas de frío» durante el día, con máximas superiores en el entorno rural. Este comportamiento térmico no puede generalizarse para el resto de ciudades, debido en gran medida a su pequeño tamaño, pequeña altura de las edificaciones, materiales de construcción similares al entorno, proximidad de ríos, etc.

Tabla 5: Datos de temperatura diaria, en los días coincidentes con las imágenes NOAA

Estaciones	20-agosto-99			3-jun-01		
	Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Min.
Madrid-Barajas	35.0	25.5	15.9	33.1	22.9	12.6
Madrid-Retiro	35.0	27.4	19.8	33.2	25.3	17.4
Madrid-C.Vientos	35.6	27.8	20.0	34.4	25.9	17.4
Madrid Getafe	36.6	26.7	17.8	33.6	25.3	17.0
Talamanca J.	37.2	26.6	16.0	34.8	23.6	12.4

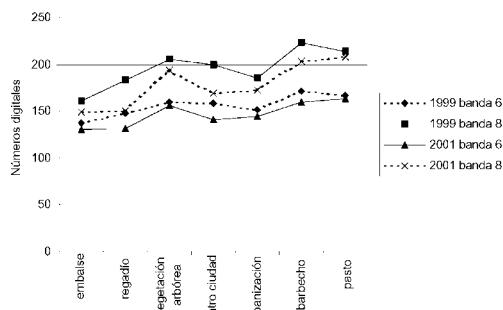
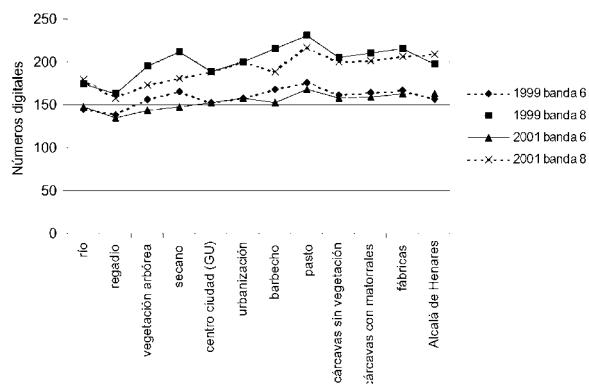
Además del análisis de las estaciones se ha efectuado un estudio de las imágenes de satélite en las bandas térmicas para cada una de las ciudades, tanto en su núcleo histórico, como en los sectores con urbanizaciones y/o naves industriales, y en sus áreas próximas considerando diferentes ocupaciones del suelo: agua, vegetación higrófila, cultivos de regadío, cultivos de secano, barbechos, pastizales, formaciones arbóreas, cárcavas, etc. (figura 5).

Del estudio visual y digital de cada una de las ciudades se destacan los siguientes resultados:

Madrid (Fig. 2y 5a)

En la figura 2a se incluye una imagen térmica del satélite NOAA en la que se localizan, por sus coordenadas geográficas, las ciudades castellanas del centro peninsular español. En ella se puede observar que la resolución espacial ofrecida por el sensor AVHRR (1.100 m) sólo permite identificar visualmente la ciudad de Madrid. Por esta razón es la única de las ciudades analizadas en la que se han tomado los datos de temperatura suministrados por este sensor, resumidos en la Tabla 4.

En esta tabla se ve perfectamente que en agosto de 1999 la ciudad de Madrid, a las 15 horas, tiene aproximadamente 7°C menos de temperatura que los campos que la rodean, mientras que en junio de 2001 estas diferencias están muy atenuadas (menos de 2°C).

Fig. 5a. Madrid.**Fig. 5b. Guadalajara-Alcalá de Henares****Figura 5.** Perfiles espectrales de los canales térmicos del sensor ETM+.

Esto se confirma visualmente con cualquiera de las imágenes de las bandas térmicas: la imagen correspondiente a la banda 4 ($10,4\text{--}11,4 \mu\text{m}$) muestra toda la ciudad con tonos más oscuros que su entorno. A su vez, esta imagen NOAA, presenta una gradación térmica de menor a mayor, distinguiéndose cuatro unidades: la sierra, los ríos, la ciudad y los campos de cereal.

Tabla 4: Valores de temperatura en ° C según el sensor AVHRR, para la ciudad de Madrid y su entorno

Localización	22-8-1999	4-6-2001
Sierra	38.33	22.83
Ríos	33.16	25.65
Madrid-ciudad	40.74	29.26
Campos de cereal	47.77	30.87

En las imágenes Landsat (fig. 2b,c,d,e), además de la ciudad de Madrid se observan los grandes núcleos urbanos de su área metropolitana. Dicha ciudad está atravesada de norte a sur por el río Manzanares, que mantiene en las llanuras de inundación fuera de la ciudad cultivos de regadío. La fig. 2b permite identificar cambios en el sustrato y ocupación del suelo. Así, el sur y este de la Comunidad de Madrid está constituido por materiales terciarios (arcosas, arcillas, caliza, margas y yesos), dedicados principalmente a cultivos de cereal, entre los que sobreviven escasos enclaves de vegetación natural arbórea. Por el contrario, en al noroeste de la ciudad se localiza una extensa masa forestal, el «Monte del Pardo», caracterizado por materiales del terciario (principalmente arcosas) con un bosque mediterráneo dominado por *Quercus ilex*. Cabe destacar en la imagen térmica del ETM+ que, en las fechas muestradas, la ciudad es más fría que el entorno, incluso que las áreas forestales próximas a la ciudad. La imagen Landsat de la banda 8 de agosto de 1999 permite cartografiar además todos los núcleos urbanos, ya que tienen tonos más oscuros que el entorno debido a su menor temperatura (fig. 2c). En esta fecha sólo el agua y la vegetación de ribera tienen temperaturas inferiores a la ciudad; por el contrario, los suelos desnudos o con pastizales tienen valores más elevados (fig. 5 a). No obstante, en la imagen de junio de 2001 la presencia de nieblas interfiere en los valores digitales. En la combinación 4-5-1 (fig. 2d) se las puede identificar a modo de manchas redondeadas con tonos muy oscuros. En la imagen térmica la distribución de las nieblas resulta evidente puesto que tienen temperaturas muy bajas (fig. 2e). A su vez, la imagen de junio de 2001 no muestra la existencia de una isla térmica, pues el apogeo de los cultivos y la mayor humedad del suelo conducen a una gran uniformidad térmica espacial. Por tanto, la isla de frío diurna para la ciudad de Madrid y todos sus municipios resulta clara durante el verano, a consecuencia de la mínima humedad del suelo y escasez de cultivos, pero no es tan evidente en otras fechas. Debe destacarse, que la existencia de enclaves de monte mediterráneo de diferentes superficies, no amortigua las altas temperaturas diurnas estivales (fig. 5 a), pues están constituidos por especies muy resistentes a la falta de agua estival, reduciendo al máximo sus funciones vitales, y entre ellas la de absorber y ceder humedad. Es por ello, que algunos parques y montes urbanos presentan temperaturas diurnas estivales superiores al centro de la ciudad (Pérez y García, 2001 y 2002).

Segovia (Fig. 3 a,b,c,d, y Fig. 5 c)

Las imágenes ETM+ de esta ciudad reflejan, tanto visual como digitalmente, la influencia del sustrato, pues éste presenta variaciones en las gamas de grises significativas, obtenidas en cualquier combinación de bandas, visibles e infrarrojas, y canales térmicos. El sector occidental, más frío, está constituido por materiales detriticos y químicos del Mesozoico y Cenozoico (ITGE, 1998), dedicados a cereales en secano. El sector oriental, formado por rocas ígneas y metamórficas (granitos y gneisses), está dedicado a pastos y destaca térmicamente con valores más altos, con tonalidades blancas en las imágenes de las dos fechas estudiadas (fig. 3b y 3d). La ciudad de Segovia está emplazada en el contacto de las dos unidades, a orillas del río Eresma (afluente del Duero por su margen izquierda). Las diferencias térmicas tan contrastadas entre

materiales deben responder a las variaciones de color y humedad del sustrato y su cubierta vegetal. Por tanto, el sustrato manifiesta los valores del albedo, mostrando variaciones en el balance térmico de cada unidad litológica.

Las figuras 3b y 3d permiten destacar la ciudad por su temperatura, siendo mucho más fría que los dos sectores con dominio agrícola y ganadero, y sólo más cálida que el regadío, la vegetación de ribera y las masas forestales del piedemonte de la sierra.

Los perfiles espectrales de los distintos usos del suelo en las bandas 6 y 8 (fig. 5c) muestran que las áreas forestales, parcelas dedicadas a regadíos y ríos tienen valores más bajos que la ciudad. Por el contrario, las áreas de pastos y barbechos muestran valores más altos que el núcleo urbano.

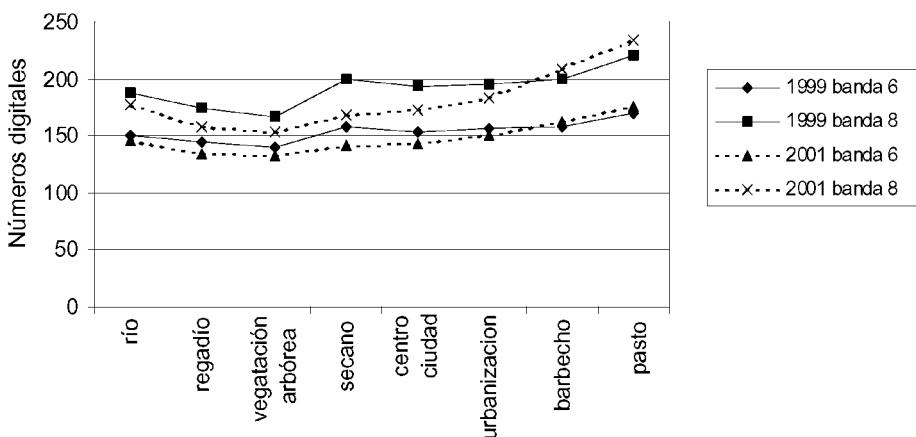


Figura 5c. Segovia.

Las parcelas dedicadas a cultivo de secano presentan una gran variedad térmica, dependiendo de la estación del año; así en junio, cuando los cultivos alcanzan su mayor desarrollo fenológico ofrecen valores digitales más bajos que la ciudad, mientras que en agosto, ya recolectado el cereal, muestra temperaturas superiores. Comparando las dos fechas ambas muestran la ciudad con temperaturas diurnas más bajas, sin embargo, esta «isla de frío», como en el caso de Madrid, es más clara en verano. El análisis de detalle del área metropolitana permite diferenciar térmicamente las urbanizaciones y polígonos del centro urbano, ya que la mayor densidad y altura de los edificios conduce a temperaturas más bajas, al menos durante el verano, estación en la que los aportes de calor antrópico se reducen considerablemente.

Aunque resulte extraño hablar de isla de frío o frescor diurno para las ciudades, este efecto se ha buscado durante siglos en villas de zonas subtropicales, especialmente del ámbito mediterráneo. Dichas ciudades por lo general, están conformadas por edificaciones enjalbegadas (para aumentar el albedo) y calles muy estrechas, reduciendo así, la entrada de la radiación

solar junto al suelo. Por ello, no es de extrañar que muchas ciudades del área mediterránea, aún con estructuras urbanas muy dispares presenten un contraste campo-ciudad notorio, especialmente en las fechas y estaciones de intensa radiación solar y escasas precipitaciones.

Ávila (Fig. 3e, f, g, h y Fig. 5d)

Las imágenes térmicas referidas a la ciudad de Ávila (3f y 3h) y sus alrededores presentan un contraste térmico campo-ciudad muy pequeño (fig. 3e y 3g). En agosto de 1999 destacan las manchas de vegetación natural situadas al norte de la ciudad, con valores muy bajos, con tonalidades similares a los parques urbanos y pequeñas parcelas de regadío. Frente a ellos, los pastizales alcanzan las máximas temperaturas, siendo el resto de la imagen muy uniforme. En junio de 2001 los mínimos se registran en las masas de agua (embalses y cauces fluviales) y cultivos de regadío, no apreciándose diferencias notables entre la ciudad, las masas forestales, los cultivos de secano y pastizales. En esta fecha sólo los terrenos baldíos tienen tonos claros que indican temperaturas más elevadas. Hay que reseñar que la ciudad de Ávila tiene un casco histórico pequeño, con numerosos edificios de poca altura, construidos con granito (el mismo material que rodea a la ciudad, aflorando en numerosos puntos), por lo que es más difícil apreciar diferencias con el entorno. Esta villa separa dos usos de suelo contrastados (fig. 3e y 3g): al norte de la ciudad predominan masas forestales de monte bajo y pastos ralos; al sur se extienden cultivos de regadío y secano en pequeñas parcelas. Pero esta diferencia en los usos no se refleja claramente en las temperaturas, ya que el sustrato, constituido por rocas ígneas paleozoicas (fundamentalmente granitos), es bastante uniforme y predominan suelos poco desarrollados, que dan una gran uniformidad.

El análisis de los perfiles espectrales (fig. 5d) muestra que la vegetación arbórea, constituida por encinas, tiene valores muy bajos en las dos bandas térmicas y en las dos fechas. Así, los enclaves forestales, la vegetación de ribera y el agua, registra valores menores que la ciudad. Por

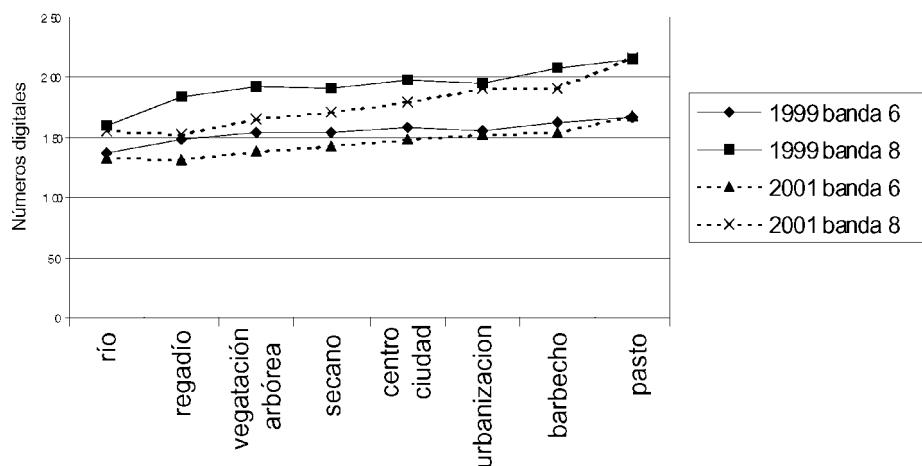


Figura 5d. Ávila.

el contrario, las áreas urbanizadas tienen números digitales más bajos que los campos con herbáceas o desnudos (barbecho), roquedos o con suelos poco evolucionados. En estos perfiles llama la atención que los valores máximos de temperatura correspondan a las parcelas dedicadas a pastos, probablemente condicionados por el escaso recubrimiento vegetal y proximidad del sustrato. También esta figura permite corroborar la homogeneidad térmica de las imágenes, en las que sus valores digitales se mueven en rangos muy estrechos.

Guadalajara-Alcalá de Henares (Fig. 4 a,b,c,d y Fig. 5b)

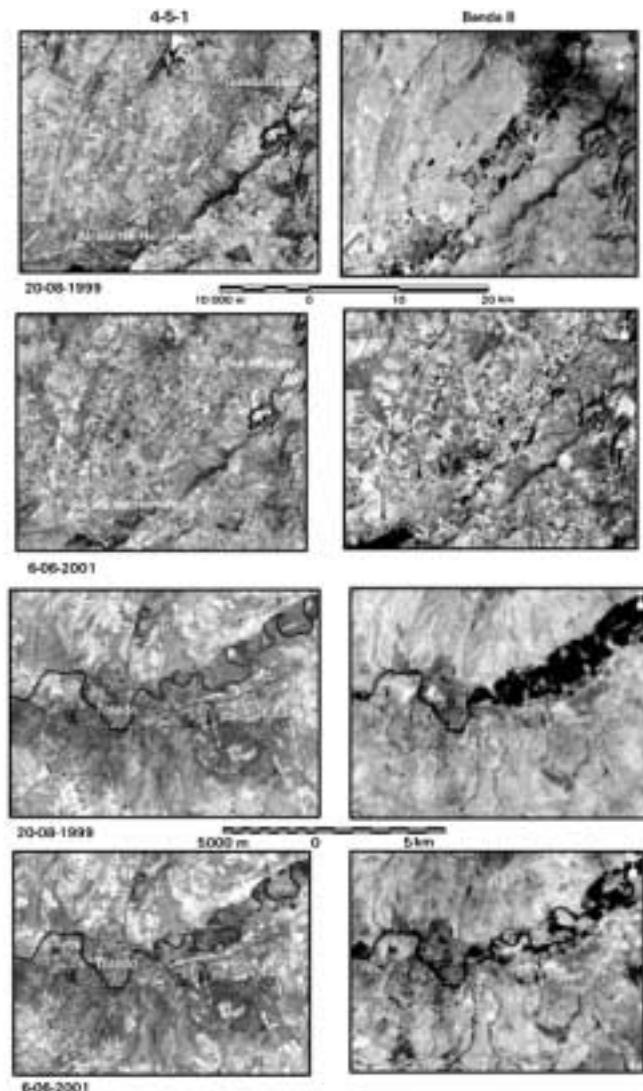


Figura 4. Imágenes ETM+, Guadalajara y Toledo.

Ambas ciudades están situadas a orillas del río Henares, afluente del Tajo, lo que da lugar a un alto porcentaje de nieblas diurnas, por lo que a la hora que pasa el sensor, quedan reflejadas en sus imágenes modificando los valores digitales en las diferentes bandas y, sobre todo, en los canales térmicos. Estas nieblas afectan a la ciudad de Guadalajara en la imagen de agosto de 1999 (fig. 4 b) y a Alcalá de Henares en la de junio de 2001 (fig. 4 d). Pese a ello, la imagen térmica de agosto permite diferenciar la ciudad de Alcalá, en tonos grises oscuros, ya que tiene valores térmicos intermedios entre el suelo desnudo y campos de cereales, -más altos-, y las parcelas de regadío o vegetación de ribera, -con temperaturas más bajas- y, por tanto, tonos oscuros. Cabe destacar como hecho llamativo en esta imagen de 1999 (fig. 4 a, b) que en las bandas térmicas se distinguen también dolinas desarrolladas en las calizas (con valores más bajos de temperatura debido a su composición arcillosa y mayor humedad) y afloramientos yesíferos, más claros y con valores más elevados de temperatura.

Así, en la imagen de 1999 se pueden diferenciar tres grandes unidades térmicas que, de menor a mayor temperatura, son:

- cauces de los ríos y vegetación de ribera asociada, parcelas de regadío, fondos de dolinas, escarpes y enclaves de encinares. También tienen tonos oscuros los centros de las dos ciudades: Alcalá y Guadalajara.
- naves industriales, ubicadas a lo largo de las terrazas del río Henares, suelos erosionados en pendiente (cárcavas) y sedimentos yesíferos, aún cuando estos últimos presentan en las imágenes su característico moteado claro-oscuro
- sedimentos terciarios, constituidos en extensas áreas por calizas del páramo y materiales margodetríticos (ITGE, 1990 a y b), dedicados a pastizales y cultivos de secano (sin vegetación en este mes) y barbechos.

En la escena de junio del 2001 hay una gran disparidad térmica en todo el territorio (fig. 4d), con una imagen muy parcelada que no siempre coincide con la distribución espacial de los usos del suelo (fig. 4c).

Los valores de los perfiles espectrales (fig. 5b) muestran que los pastizales y suelos sin vegetación tienen los números digitales más elevados en las dos bandas; siempre superiores a los de las dos ciudades. La vegetación forestal, al igual que sucede en la ciudad de Madrid, muestra en el mes de agosto valores de temperatura más altos que los núcleos urbanos, por lo que en relación a todas estas clases la ciudades de Guadalajara y Alcalá de Henares funcionan en verano y durante el día como islas de frío o frescor.

Toledo (Fig. 4 e, f, g, h y Fig. 5e)

La imagen correspondiente a la ciudad de Toledo vuelve a establecer una diferenciación térmica en función de la distribución del sustrato, como se ha destacado en el estudio de la ciudad de Segovia. Toledo se localiza en un pronunciado meandro del río Tajo, que separa al norte

materiales terciarios, afectados por acarcavamiento (fig 4e y 4g), y al sur materiales paleozoológicos, con mayores extensiones de vegetación natural, arbórea y arbustiva. El río Tajo, en las proximidades de Toledo desarrolla una amplia llanura de inundación y terrazas dedicadas a cultivos de regadío. En la imagen térmica de 1999 los cultivos de secano, barbechos, pastizales y cárcavas sin recubrimiento vegetal tienen valores muy altos, superiores a los de la ciudad y sus urbanizaciones.

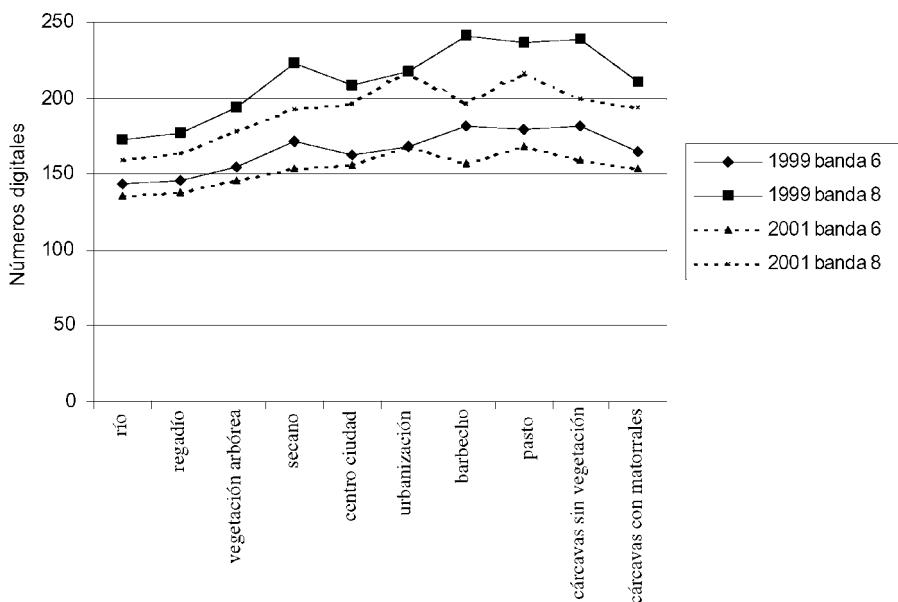


Figura 5e. Toledo.

Al observar las bandas térmicas de las dos fechas (fig. 4f y 4h) la ciudad de Toledo queda claramente delimitada por tonos grises, intermedios entre los más oscuros del río, y los más claros del resto del territorio con vegetación natural y cultivos de cereales. Sin embargo, en la imagen de 2001 estas diferenciaciones se atenúan debido a la mayor humedad ambiental y edáfica, a la mayor actividad clorofílica de la vegetación natural y cultivos de secano, y menor superficie dedicada a regadío.

En ambas fechas se distinguen bastante bien las estructuras viarias por sus temperaturas más bajas que algunos de los suelos del entorno. Esto debe responder a la diferente exposición del terreno, alcanzando las cárcavas orientadas al este la mayor temperatura.

Los perfiles espectrales (Fig. 5e) muestran el gran contraste térmico entre los suelos con escaso recubrimiento vegetal (cárcavas, barbechos, cultivos de secano y pastos) con los valores más altos, y las áreas urbanizadas, con números digitales menores, lo que confirma la «isla de frescor diurna» para esta ciudad.

Otra aplicación de las bandas térmicas, comprobada claramente en esta imagen, es detectar cambios litológicos notables y líneas de fracturación: así se identifica con tonos muy oscuros una fractura situada al sur de Toledo, con dirección este-oeste, que pone en contacto materiales paleozoicos (con tonos grises oscuros) con el neógeno (mucho más claros). Además, al oeste de la ciudad de Toledo puede dibujarse otra fractura de igual dirección que la anterior, que en el mapa geológico (IGME, 1970) no está representada.

5. Conclusiones

El uso combinado de imágenes de satélite y estaciones meteorológicas ha resultado muy útil para medir la distribución espacial e intensidad de los contrastes térmicos campo-ciudad. Una de las principales ventajas de las imágenes térmicas de satélite frente a otras técnicas más tradicionales, es que ofrece una gran información espacial sobre la humedad superficial y sobre el albedo, parámetros que junto a la radiación, influyen en las temperaturas. Tienen, sin embargo, el inconveniente de limitar el período útil de muestreo a los días muy despejados, pues de otro modo, la temperatura superficial queda altamente alterada.

El análisis detallado de las bandas térmicas de los sensores ETM+ y AVHRR muestra que las ciudades analizadas tienen temperaturas diurnas más bajas que su entorno, por lo que pueden definirse como islas de frío diurnas. Esta isla se advierte especialmente en verano y con mayor nitidez cuanto mayor es la densidad del entramado urbano y más altas son las edificaciones. La isla de frescor diurna resulta también tanto más acentuada cuanto mayor sea la aridez y estrés hídrico del suelo y de la vegetación. Así, pueden darse las temperaturas más altas en los entornos urbanos dedicados a pastizales (en Segovia o Ávila), cultivos de secano o bosque mediterráneo (en Madrid y Guadalajara), naves industriales, suelos desnudos o sedimentos yesíferos (en Alcalá de Henares), o cárcavas y barbechos (en Toledo).

Los datos de las estaciones meteorológicas, aunque con escasa distribución espacial para estudios de clima urbano confirman que el contraste térmico campo-ciudad se mantiene durante la noche, pero con sentido opuesto, marcando con claridad la isla de calor nocturna.

Otra utilidad de las imágenes térmicas es la identificación y cartografía de unidades litológicas contrastadas, y de las grandes líneas de fracturación que ponen en contacto materiales muy diferenciados. Esto se detecta por los cambios de tonos y, en el caso de las fracturas por su trazo lineal y tono muy oscuro; en las ciudades estudiadas se aprecia con claridad al sur de Toledo.

6. Referencias bibliográficas

AKBARI, H., M. POMERANTZ and H. TAHAN

2001 Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas,
Solar Energy, Vol. 70, 3, pp. 295-310.

CARLSON, T. N., J. A. AGUSTINE & F. E. BOLAND

1977 «Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas», *Bull. American Meteorological Society*, 58: 1301-1303.

- 1981 «Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia», *Journal of Applied Meteorology*, 20: 67-87.
- CARLSON, T. N. and S. T. ARTHUR
- 2000 The impact of land use land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change*, vol. 25, 1-2, pp. 49-65.
- CASELLES, V., C. COLL, E. RUBIO, F. SOSPEDRA y E. VALOR
- 1997 La medida de la temperatura y de la emisividad desde satélite. Estado actual y perspectivas futuras. En *Teledetección: Usos y Aplicaciones* (Casanova, J. L. y Sanz, J. eds.): 487-492, Valladolid.
- CASTRACANE, P., L. SELMI, S. CASADIO, M. CACCIANI and G. FIOCCI
- 2001 Ground-based remote sensing of wind, temperature and aerosol backscattering in an urban environment during different atmospheric stability conditions. *Physics and Chemistry of the Earth*. Vol. 26, 3; 239-245.
- DAVEAU, S.
- 1980 «A utilização possível dos registros de satélites em infravermelho termico na climatologia regional», *Cuadernos de Teledetección*, 1-4: 12 pp.
- ELIASSON, L.
- 1996 Intra-urban nocturnal temperature differences: a multivariate approach. *Clim. Res.*, 7, pp. 21-30.
- FERNANDEZ, F., E. GALÁN, R. CAÑADA (Coord.)
- 1998 *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*, Arteluz, Madrid, 606 págs.
- IGME
- 1970 Mapa geológico de España 1:200.000. Toledo.
- 1990a Mapa geológico de España 1:50.000. Guadalajara.
- 1990b Mapa geológico de España 1:50.000. Alcalá de Henares.
- 1998 Mapa geológico de España 1:50.000. Segovia.
- LÓPEZ GARCÍA, M. J., A. PÉREZ CUEVA, V. CASELLES y J. MELIÁ
- 1989 *El efecto de la isla térmica de la ciudad de Valencia obtenida a partir de transectos e imágenes NOAA-AVHRR*. 3.ª Reunión Científica del Grupo de Trabajo de Teledetección, A.E.T. Madrid: 259-269.
- LÓPEZ GÓMEZ, A., F. FERNÁNDEZ GARCÍA, F. ARROYO ILERA, J. MARTÍN VIDE y J. M. CUADRAT
- 1993 *El clima de las ciudades españolas*. Ed. Cátedra, 268 pp.
- OKE, T. R. and R. F. FUGGLE
- 1972 Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Bound. Lay. Met.* 2, pp. 290-308.
- OKE, T. R.
- 1987 *Boundary Layer Climates*, Routledge, London.
- 1997 Urban climates and global environmental change. In: R.D. Thompson and A. Perry, Editors, *Applied Climatology*, Routledge, London, pp. 273-287.

OWEN, T. W., T. N. CARLSON and R. R. GILLES

- 1998 Remote sensed surface parameters governing urban climate change. *Int. Journ. Remote Sensing*, 19, pp. 1663-1681.

PARK, H.-S.

- 1986 Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmos. Environ.*, 20, pp. 1859-1866.

PÉREZ GONZÁLEZ, M. E. y M. P. GARCÍA RODRÍGUEZ

- 2001 «Estudio de las bandas térmicas del ETM en la Comunidad de Madrid y alrededores». En : Pérez Cueva, A. J.; López-Baeza, E. y Tamayo, J. (Edits). *El Tiempo del Clima*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A, n.^o 2, pp. 499-508.

PÉREZ, M.^a E. y M.^a P. GARCÍA

- 2002 Cartografía térmica del área metropolitana de Madrid a partir del sensor ETM del Landsat 7. *Anales de Geografía de la Univ. Complutense*, 365-374.

SAILOR, D. J. and H. FAN

- 2002 Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment*. Volume 36, Issue 4, pp. 713-725.

SVENSSON, M. K. and I. ELIASSON

- 2002 Diurnal air temperatures in built-up areas inn relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning*, vol 61, 1; 37-54.

VALOR, E., V. CASELLES, C. COLL, F. SÁNCHEZ, E. RUBIO y F. SOSPEDRA

- 2000 Análisis comparativo del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR. *Revista de Teledetección*, pp. 5-10.

UNGER, J.

- 1996 Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theor. Appl. Climatol.* 54, pp. 147-151.

UNGER, J., Z. SÜMECHY and J. ZOBOKI

- 2001 Temperature cross-section features in an urban area, *Atmospheric Research*, Volume 58, Issue 2, pp. 117-127.

YAGÜE, C., E. ZURITA and A. MARTÍNEZ

- 1991 Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmos. Environ.*, 25B, pp. 327-332.