

LA TEMPERATURA DIURNA EN LA AGLOMERACIÓN DE MADRID MEDIANTE IMÁGENES REMOTAS

POR

ANTONIO LÓPEZ GÓMEZ, ANTONIO MORENO JIMÉNEZ,
FELIPE FERNÁNDEZ GARCÍA Y FRANCISCO PALOU

Introducción

Uno de los aspectos más significativos de las modificaciones climáticas relacionadas con la actividad humana es la variación de las temperaturas del aire en los espacios urbanos, varios grados por encima de las registradas en las áreas rurales próximas.¹ El término «isla de calor», acuñado con tal motivo, es el hecho más representativo de estas modificaciones y el que ha dado lugar a una abundante bibliografía (véanse Landsbert, 1981, y López Gómez, 1985). En nuestro país, aunque más recientes, los estudios llevados a cabo (López Gómez y Fernández García, 1984; López Gómez et. al., 1988) han permitido evaluar la importancia de este mismo hecho cuyas características son similares, a grandes rasgos, con las ya conocidas en otras ciudades de

A. López Gómez, Departamento de Geografía, UAM e IEGA, CSIC. A. Moreno y F. Fernández, Departamento de Geografía, UAM. F. Palou, Centro de Investigación de UAM-IBM.

¹ Este trabajo ha sido realizado dentro del proyecto de investigación sobre el Clima de Madrid financiado por la CICYT. Agradecemos la colaboración prestada por el Centro Científico de IBM en la UAM, así como por el NPOC-EARTHNET del INTA.

distintas zonas de la Tierra. Las causas fundamentales de tales modificaciones están íntimamente relacionadas con las distorsiones en el balance energético de estas áreas construidas, provocadas por multitud de factores: unos relacionados con el comportamiento térmico de los materiales urbanos y otros con las alteraciones que el trazado urbano y los usos de suelo introducen en la propagación del calor. Así, la insolación es bastante más reducida en las áreas urbanas que en los espacios próximos, y esto, como señala Landsberg (1981), por efectos puramente urbanos relacionados con los volúmenes de edificación que introducen efectos de sombras y la contaminación del aire encima de la ciudad, capaces de reducir hasta en un 20% la insolación en estas áreas, y de introducir diferencias significativas entre ciudades según el grado de contaminación de cada una de ellas. La disminución, sin embargo, no afecta por igual a toda la gama del espectro y son las radiaciones infrarrojas las que contribuyen de manera más acusada al calentamiento urbano (Derek, 1982). El aumento de la radiación difusa y el menor albedo de los materiales urbanos contribuyen, por su parte, a que la radiación neta sea en la ciudad superior al de las zonas próximas, lo que explica la isla de calor urbana.

La detección de los contrastes térmicos relacionados con la ciudad se ha realizado, normalmente, mediante la utilización de los datos suministrados por la red meteorológica oficial, no siempre representativos de las influencias urbanas, y con aparatos de medidas no convencionales. Sin embargo, tanto unos como otros, sólo permiten una descripción más o menos detallada de la isla de calor y sus diferencias espaciales, sin que sea posible determinar los mecanismos que en la formación de la misma intervienen. Dada la importancia de la radiación, como acabamos de ver, la utilización de las imágenes tomadas desde sensores remotos ha supuesto una gran ayuda a la hora de determinar con precisión los balances energéticos, especialmente en términos de emisividad de los materiales en el ámbito urbano. Sin embargo, su utilización no está exenta de dificultades debido a que la imagen del satélite capta la radiación emitida por el suelo, por lo que es un buen indicador del microclima de éste y no del aire (Lagouarde, 1985). Además, la diversidad de materiales que conforman el espacio construido y los diferentes usos del suelo son factores de distorsión a la hora de interpretar los datos suministrados por las imágenes remotas, de tal modo que diversos autores distinguen dos niveles de efectos y caracte-

rísticas diferentes dentro de la ciudad: una, la denominada «superficie activa» («active surface», denominada también «canyon layer» o «canopy layer») que incluye el espacio urbano *sensu stricto*, con sus calles, edificios y diferentes usos de suelo capaces de modificar de manera acusada todas las variables que intervienen en el balance de radiación; y el estrato superior o «boundary layer» con características más homogéneas y el que, de alguna manera, puede ser comparado con la superficie exterior de topografía más llana (Derek, 1982). La temperatura captada, por ejemplo, desde el satélite refleja esta enorme variedad de influencias, sobre todo en lo referente a los distintos albedos y emisividad de los materiales, sin olvidar las distorsiones del medio atmosférico por donde se transmiten las ondas y las propias características del sensor (Curran, 1985; American Society of Photogrammetry, 1975). Todo ello limita considerablemente las posibilidades de interpretación y, sobre todo, dificulta las de establecer una clara correlación entre las temperaturas del suelo y las del aire.

Nuestro interés, limitado por ahora a una aproximación inicial y parcial que esperamos completar próximamente, se centra en explorar los rasgos térmicos diurnos de la superficie de la metrópoli madrileña, a través fundamentalmente de la información aportada por el satélite Landsat 5 mediante imágenes del infrarrojo término. Análisis sucesivos abordarán la misma meta, pero utilizando imágenes desde avión tomadas en vuelos nocturnos. En los dos apartados siguientes se describen las condiciones bajo las que se efectúa la toma de datos, así como el tratamiento digital realizado de las imágenes del sensor. Seguidamente se realiza una descripción e interpretación de los mapas térmicos obtenidos con teledetección, para finalizar presentando los hallazgos de las medidas de las temperaturas del aire llevadas a cabo sincrónicamente.

Las imágenes infrarrojas del sensor «thematic mapper» y los registros térmicos del aire

En el presente estudio ha sido dos las fuentes de información sobre temperaturas utilizadas. En primer lugar, y siguiendo una metodología empleada en anteriores investigaciones nuestras, se llevó a cabo un registro de temperaturas del aire a lo largo de ciertos ejes urbanos

mediante termómetros digitales. El momento de tales tomas se procuró aproximar en lo posible a la hora en que se toma la imagen desde el Landsat, que constituye la otra fuente adoptada.

El sensor remoto *Thematic Mapper* es un tipo de barredor multiespectral de siete bandas a bordo del Landsat 5. Este satélite vuela a 705 Km. de altura con órbita heliosíncrona y pasa por nuestra zona aproximadamente a las 9'30 TMG. La banda 6, aquí utilizada, posee una resolución de 120 metros por pixel. De él se han analizado imágenes de dos momentos diferentes: el 2 de agosto de 1984 y 24 de octubre de 1985. Con el concurso de estas dos fuentes de datos se persiguió tener unos elementos de cotejo y referencia para informaciones con distinta génesis.

Es sabido que la información térmica captada por el sensor, conocida como *temperatura radiante*. T_{rad} viene condicionada por tres categorías de causas: por un lado las derivadas de la naturaleza de los cuerpos emisores (la superficie del planeta); por otro lado las circunstancias del medio atmosférico por el que se transmiten las ondas electromagnéticas y, finalmente, por las características del sensor y la forma de toma de los datos. Sin entrar a detallar el complejo entramado de relaciones que al respecto se producen (cf., por ejemplo, Colwell, 1983, y Curran, 1985), sí que resulte pertinente recordar algunos hechos. En primer lugar que la T_{rad} difiere de la temperatura cinética del cuerpo, T_{kin} , esto es, la registrada por un termómetro por ejemplo. A menos que el objeto sea un cuerpo negro, la relación entre ambas es alta y se expresa como $T_{rad} = \epsilon^{1/4} T_{kin}$, siendo ϵ la emisividad del cuerpo.² En segundo lugar que factores como el calor específico, conductividad o inercia térmica de los materiales de construcción juegan un papel destacado. Esta última en particular por ser medio-alta en la ciudad (es decir, el medio urbano responde más lentamente a los cambios térmicos), parece ser un condicionante clave de las variaciones diarias. En tercer lugar que la tasa de calentamiento (resultado sobre todo de la intensidad y ritmo de la insolación) puede presumirse muy desigual en el medio urbano

² La emisividad de un cuerpo se define como la proporción de la energía recibida que es emitida. Los cuerpos negros la reemiten toda, pero no así los «cuerpos grises», cuya emisividad varía bastante (un edificio de ladrillo posee una ϵ de 0.93, al asfalto/piedra de 0.97, la madera de 0.90, etc.).

debido a los obstáculos como árboles, edificios, etc., que provocan sombras. Finalmente, y en lo que concierne a la atmósfera, ésta constituye una ventana altamente «transparente» en la banda de radiación entre 10'4-12'5 μm capturada por el TM, pese a que ciertos factores pueden alterar sustancialmente esa propiedad (en particular hay que citar el efecto de filtro provocado por el vapor de agua, el dióxido de carbono y los aerosoles).

De todo lo dicho cabe colegir que en los datos térmicos diurnos captados remotamente por el sensor, la insolación y la topografía/orientación ejercerán (junto con la naturaleza de la superficie analizada) un papel clave. Puede pensarse así que la radiación emitida será especialmente alta en las áreas de mayor insolación y de menor «absorción» por los materiales.

Las diferencias de insolación existentes entre las dos imágenes analizadas, al corresponder cada una de ellas a dos épocas del año diferentes, son factores adicionales a considerar a la hora de interpretarlas. Entre ambas deben emerger disparidades relacionadas con tal circunstancia (la irradiación global media es de 218 WRR en agosto, frente a 144 WRR en octubre, según el INM). Así mismo, a estas horas de la mañana, la oblicuidad de los rayos solares agudiza las diferencias entre la radiación recibida en la ciudad y en el campo, puesto que en éste los obstáculos que se oponen a la insolación son bastante menos numerosos que en la ciudad, que se nos muestra como un espacio con muchas sombras en su conjunto y con gran cantidad de contrastes internos, que responden al trazado y anchura de las calles y a la altura y orientación de los edificios.

El interés del análisis de estas imágenes, frente a las más frecuentes nocturnas, radica en permitir establecer una fase del proceso de formación de la isla térmica urbana. En efecto, el carácter de isla de frío que a esta hora cabe hipotetizar para la ciudad no sería más que la manifestación de un proceso de calentamiento diferencial en su ritmo e intensidad al de las áreas rurales próximas y que, comparado con los datos nocturnos, nos indicaría la inercia térmica de la ciudad, reflejada en el retraso de su calentamiento y también de su enfriamiento.

El tratamiento digital de las imágenes

Las imágenes Landsat han sido procesadas con el equipo IBM 7350 dotado del sistema HLIPS (High Level Image Processing System) en el CCUAM-IBM. Los tratamientos realizados caen bajo dos apartados principales: obtención de perfiles térmicos a lo largo de determinadas y selectas direcciones con el fin de mostrar las diferencias relativas y clasificación mediante *density slicing*, es decir, agrupación manual de los pixels en intervalos discretos en aras de realzar los contrastes visuales, mediante la atribución de las oportunas gamas de color/niveles de gris. Se trata, por tanto, más que de un análisis cuantitativo, de otro carácter cualitativo. Ello, en parte, responde a la propia complejidad de los modelos matemáticos y, en parte, al propósito del estudio, cuya atención no recae en las temperaturas de la superficie, sino, recordémoslo, en las de la capa superficial de la atmósfera. Las importantes dificultades que adicionalmente emergen al intentar calibrar los datos térmicos del sensor (esto es, traducirlos a una escala térmica convencional) ha aconsejado limitarnos a examinar simplemente las diferencias relativas expresadas en las propias unidades del sensor (niveles de radiación entre 0 y 255).

El esquema espacial de radiación térmica

Las diferencias ciudad-campo.—El examen de los mapas de temperatura radiante pone de manifiesto un conjunto de diferencias espaciales de notorio significado y que vamos a describir. Al mismo tiempo, se apuntarán las oportunas «asociaciones» con otros rasgos de la superficie terrestre que ayudan a interpretar tales desigualdades.

Un primer rasgo destacado, que aparece a nivel subregional, es el claro contraste de emisión entre ciudad y campo. La imagen en falso color y a menor escala presentada en la figura 1 traduce la contraposición urbano-rural con bastante nitidez. Los tonos más claros, con menor temperatura radiante se vinculan con los espacios agrícolas (secanos herbáceos en esta fecha desprovistos de cubierta vegetal y, especialmente, los orientados al S y SE). Las zonas de menor emisión térmica aparecen localizadas genéricamente en ámbitos urbanizados y en espacios de amplia presencia forestal (por ejemplo, los bosques de El Pardo y

Viñuelas). Así mismo es destacable la mancha «fría» coincidente con las urbanizaciones de La Moraleja y El Encinar de los Reyes, que por su orientación y abundancia de arbolado retrasa el efecto de la insolación.

Los perfiles térmicos realizados en sentido aproximadamente N-S y E-W que se ofrecen en las figuras (2 y 3) ponen de manifiesto los múltiples matices que influyen en la radiación y que se traducen en una imagen de «sierra» muy acusada. En todos ellos, sin embargo, es posible distinguir el espacio construido de las áreas exteriores al mismo. Éstas aparecen sistemáticamente más cálidas que la ciudad, aunque es posible diferenciar la parte no urbana oriental, con unos superiores niveles térmicos debido a su orientación y a la ausencia de masas forestales importantes, de la occidental, más fría en conjunto y donde el espacio verde de la Casa de Campo dibuja un perfil poco disonante con el espacio urbano.

La asociación entre ocupación del suelo y niveles de radiación térmica queda reflejada con meridiana rotundidad en la figura 4 que representa una sección E-W a la altura de la conurbación Alcobendas-San Sebastián de los Reyes: el tejido urbano provoca dos auténticos «pozos» de radiación, separados por un umbral. Más al Oeste el embalse de El Pardo provoca otro acentuado descenso en los niveles de emisión infrarroja.

Las principales y más generales razones de esos contrastes han de remitirse a la topografía y al uso del suelo. La desnudez y menor rugosidad del campo provoca una mayor eficacia de la insolación (mayor calentamiento) y, consecuentemente, mayor emisión de radiación térmica. La ciudad, por su parte, ofrece una superficie mucho más quebrada; los desiguales y bruscos cambios de altura de los edificios, los patios, calles, etc., determinan, en conjunto, una menor exposición al sol de esa «epidermis». Los rayos incidentes se ven reflejados en direcciones múltiples y obligados a desarrollar cambiantes trayectorias en su penetración por ese intrincado tejido. Bajo tales circunstancias, el calentamiento provocado es menos rápido (ya que es mayor la superficie y, en gran parte, no está expuesta al sol) y, además, las orientaciones de la edificación probablemente propician que sea menor la energía reflejada hacia arriba (y que, por tanto, puede acceder al sensor).

Las anteriores observaciones llevan a pensar que, en definitiva, la ciudad parece ahora estar reteniendo una mayor proporción de la

energía solar recibida que el campo, pero su peculiar «topografía» conduce a un calentamiento a menor velocidad que el espacio rural desnudo. Ello es congruente con la menor difusividad o ritmo de cambio térmico de la ciudad respecto al suelo agrícola seco (Curran, 1985, p. 39).

Recordando el conocido fenómeno de la superior temperatura nocturna que ofrece el entorno urbano frente al rural, las anteriores observaciones llevan a pensar en un comportamiento de la urbe respecto a la temperatura como una batería que en gran medida «se carga» lentamente durante el día, para por la noche desprender ese calor. Junto con la producción artificial de calor urbano, la mayor inercia térmica de la ciudad y su mayor conductividad (penetración en los materiales) coadyuvan a explicar las superiores temperaturas nocturnas en la ciudad frente al campo.

Las diferencias intraurbanas de radiación térmica.—En una metrópoli del tamaño de la madrileña, la heterogeneidad del tejido urbano (morfológica y funcionalmente), su variable topográfica y orientación (junto con otros factores aquí no analizados, como los materiales de la edificación), parecen sin lugar a dudas vinculados con las variaciones en temperatura radiante captada por el Thematic Mapper. Realizando una simple y gran división entre áreas de mayor y menor emisión en el infrarrojo térmico puede, de su simple enumeración, evidenciarse una ingente cantidad de connotaciones y nexos.

Apoyándonos en las figuras 5 y 6 pueden identificarse un cierto número de zonas de desigual comportamiento térmico:

A) Entre las de mayor emisión (y, por tanto, más claras en la imagen en falso color) se hallan las siguientes:

1. Espacios abiertos sin ocupar urbanísticamente tales como los siguientes:

— Al SW de la imagen, en el distrito de Latina, la banda que recorre, en sentido NE-SW, la parte central del mismo (entre Cármenes y Puerta del Ángel) y la franja de separación entre Aluche y San Ignacio de Loyola (orientada de SE a NW).

— Al NW destaca por su mayor emisión la zona vacante en torno al barrio del Pilar, la cual, a su vez, aparece rodeada por zonas mucho más oscuras y «frías» asociadas con espacios construidos.



FIGURA 1.—*Mapa de radiación térmica en el área urbana de Madrid captada por el Thematic Mapper (24-10-85) a las 9:30 horas TMG (fotografías a color facilitadas por los autores)*

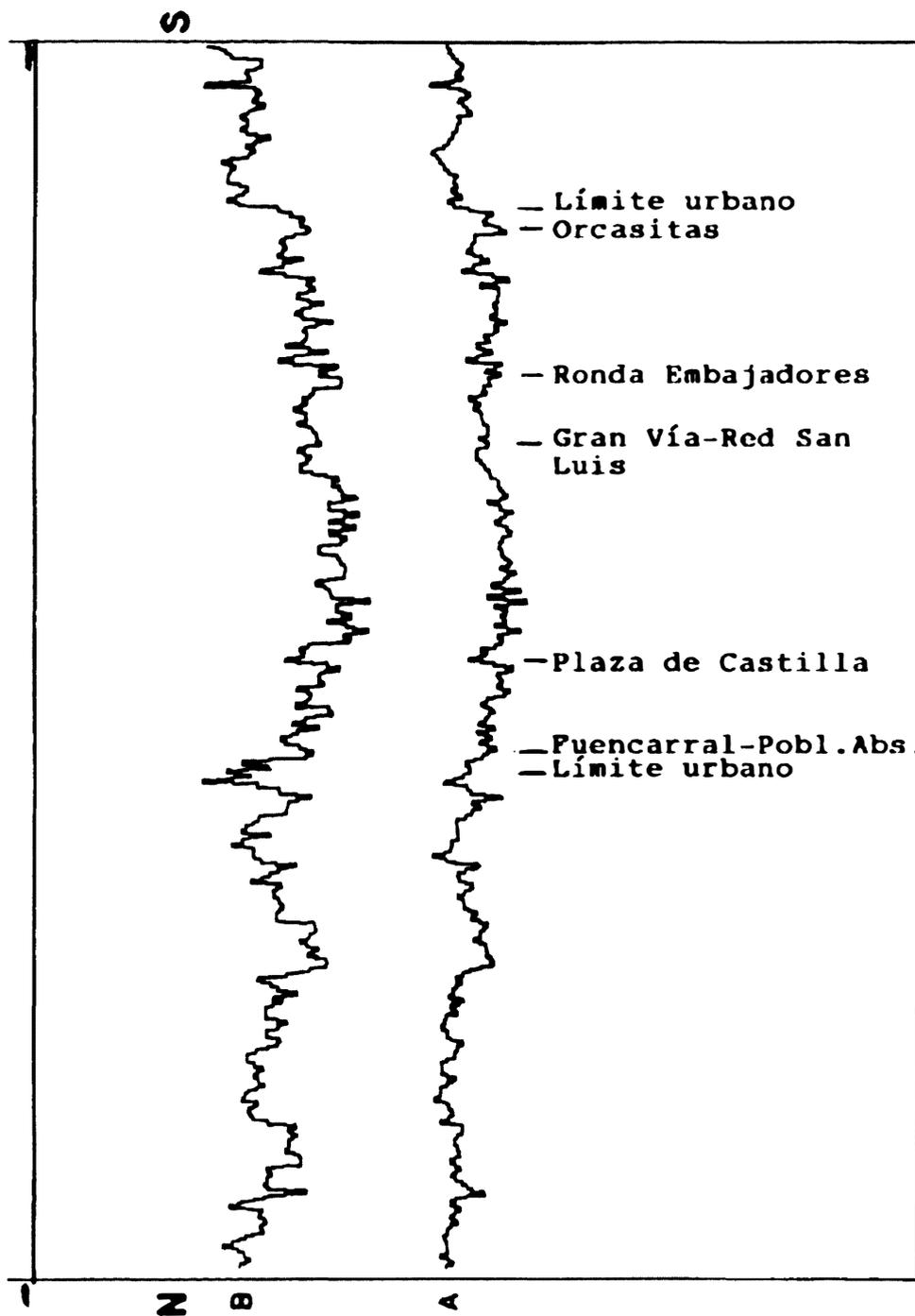


FIGURA 2.—Sección N-S de los niveles de radiación en infrarrojo térmico en el área de Madrid (vertical de plaza de Castilla-Red de San Luis), el 2-8-1984 (B) y el 24-10-85 (A)

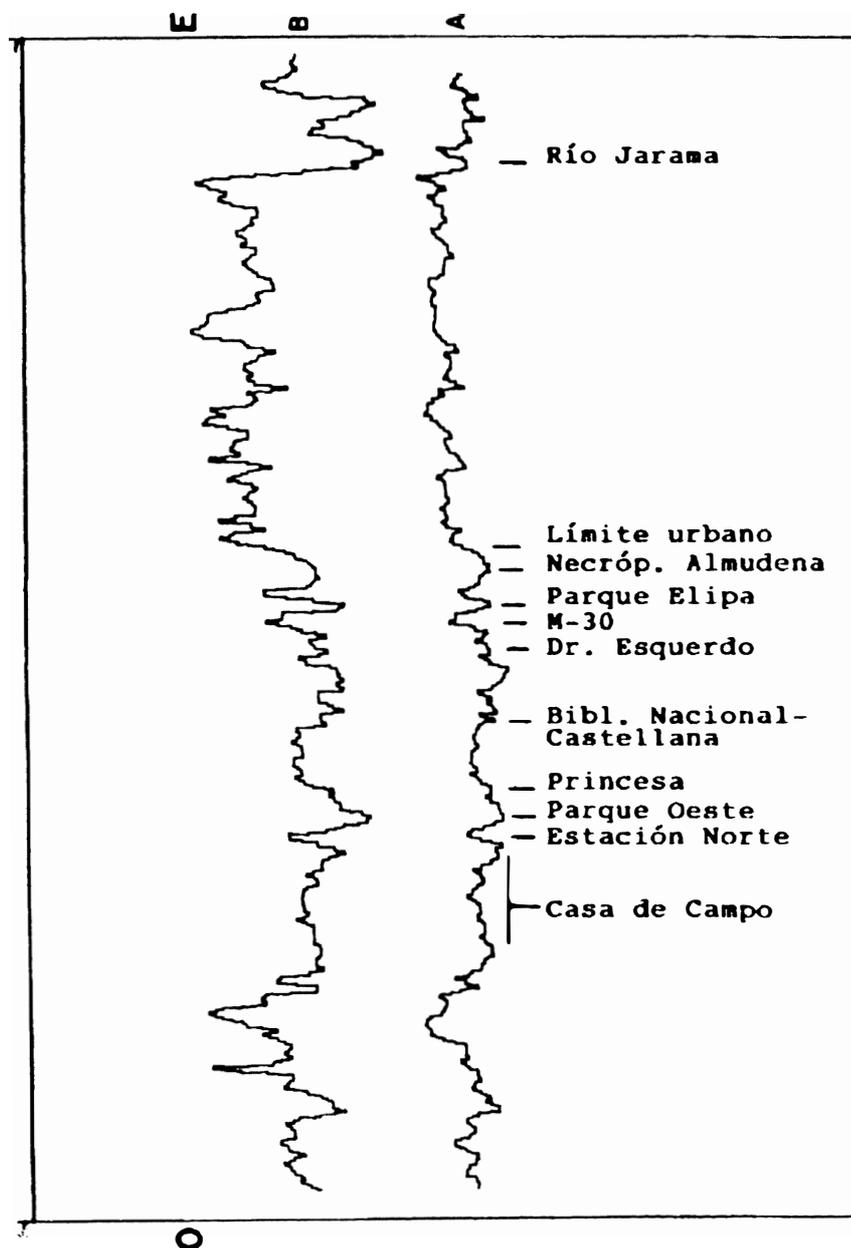


FIGURA 3.—Sección E-W de los niveles de radiación en infrarrojo térmico en el área de Madrid (Estación del Norte-Torrespaña), el 2-8-1984 (B) y el 24-10-85 (A)

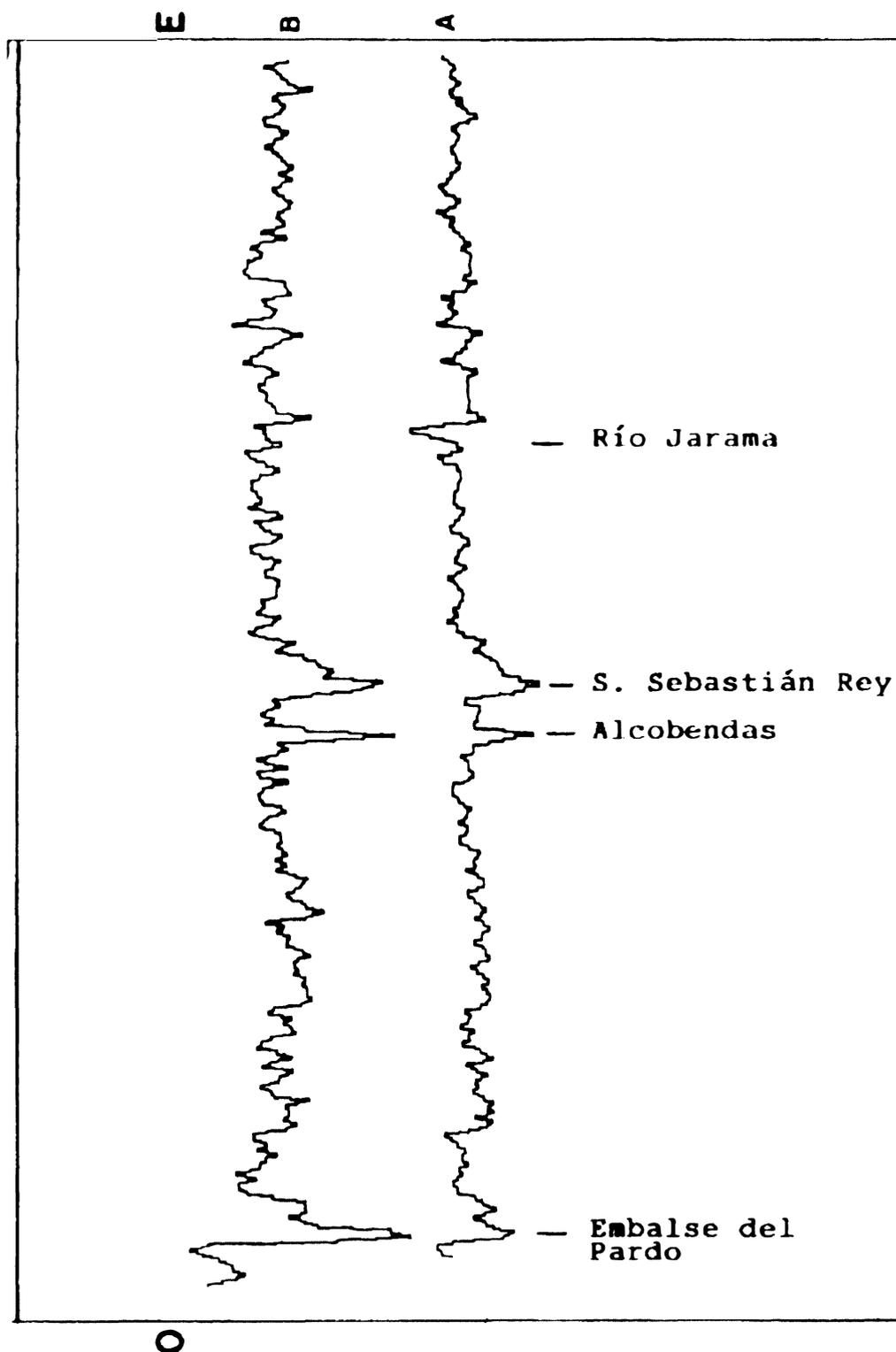


FIGURA 4.—Sección Este-Oeste de la imagen térmica a la altura de Alcobendas-San Sebastián de los Reyes, el 2-8-84 (B) y el 24-10-1985 (A)

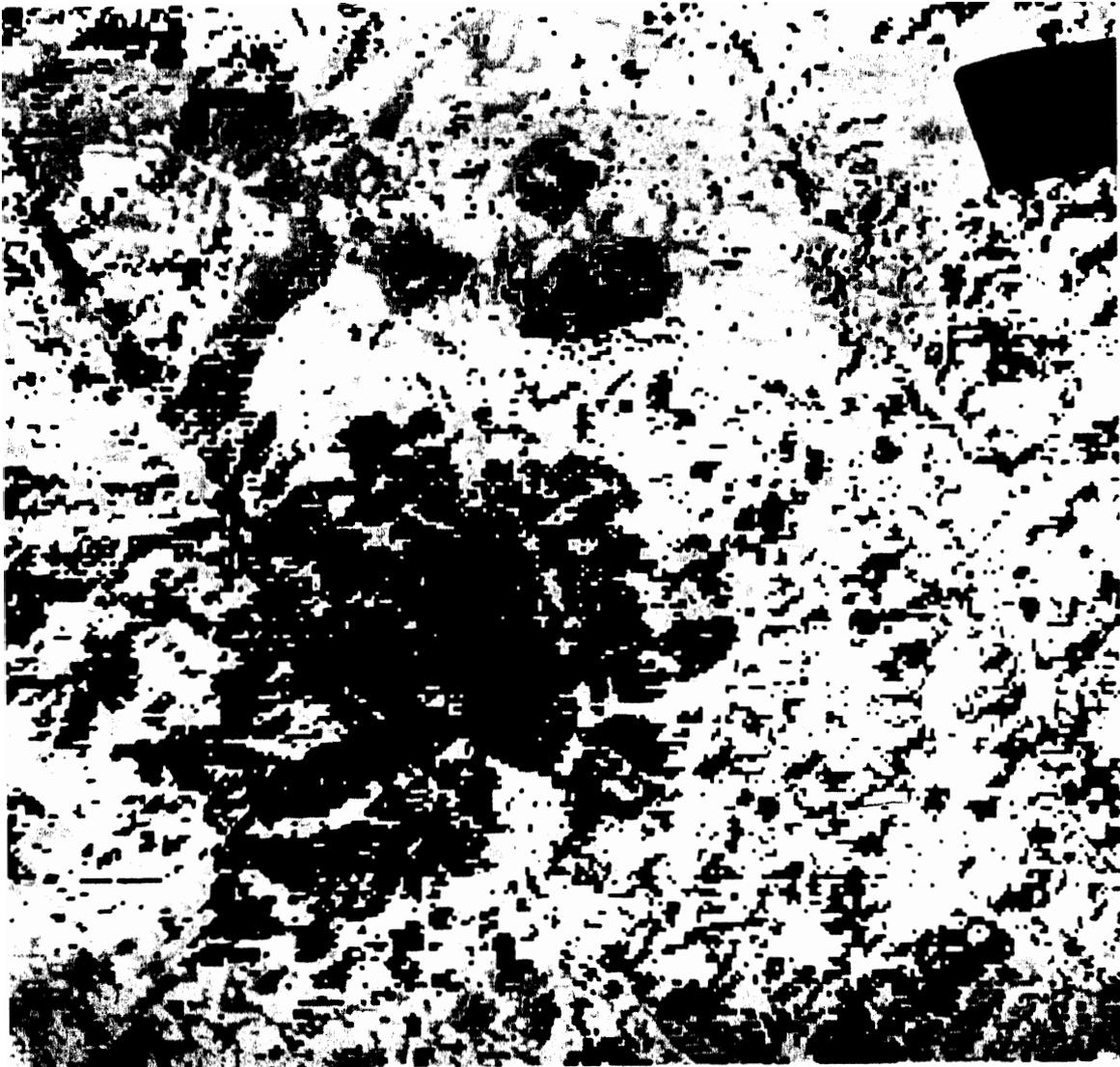


FIGURA 5.—*Mapa de radiación térmica en la aglomeración urbana de Madrid captada por el Thematic Mapper (24-10-85), a las 9'30 horas TMG*



FIGURA 6.—Mapa esquemático del casco urbano de Madrid

2. En el área de la Casa de Campo más próxima al centro de Madrid, los calveros forestales al W y NW del lago ofrecen también altos niveles de emisión.

3. Espacios destinados a infraestructuras viarias:

— Al sureste, la zona situada entre Mediodía y Entrevías utilizada por el ferrocarril (vías y estaciones de Atocha y Abroñigal) y la autopista M-30.

— En el extremo septentrional una banda de dirección norte-sur bordea por el este a Fuencarral y se asocia con las vías y estaciones de dicho barrio y de Chamartín.

— En la parte central, y coincidiendo con el espacio de la estación del Norte y el haz de vías, se individualiza una estrecha franja nítida de NW-SE (entre las zonas más oscuras de Argüelles-Parque del Oeste y las colonias del Manzanares-San Antonio de la Florida).

B) Las áreas de menor temperatura radiante, esto es, «frías», coinciden con los siguientes espacios:

1. Ensanche, tanto norte, como este (Moncloa, Chamberí, Salamanca), e incluso sur (Delicias, Legazpi). Las calles de cierta anchura y la presencia de patios interiores de manzana de relativa amplitud provocan largas sombras y, por ende, áreas frías no soleadas a esta hora. Así mismo, la difundida existencia de arbolado refuerza la tendencia a la «frialdad».

2. Edificación abierta en bloques provocadores de largas sombras y que suelen acompañarse de espacios verdes intersticiales. Son nítidas al NW las manchas del barrio del Pilar-Altamira, al NE las del Pinar del Rey-Pinar de Chamartín (en todos los casos con orientación más o menos septentrional) y Canillas, al SE la de Moratalaz, al sur las de Orcasitas y San Cristóbal de los Ángeles (en el distrito de Villaverde) y al SW las de Cuatro Vientos-San Ignacio de Loyola, Aluche-Los Cármenes, etc.

3. Zonas verdes como el Parque del Retiro, Campo del Moro, Parque del Sur.

4. Ámbitos de residencia unifamiliar con abundancia de arbolado y de orientación septentrional: Mirasierra y Puerta de Hierro al NNW, Parque del Conde de Orgaz (E), o sin ella (El Viso-Hispanoamérica).

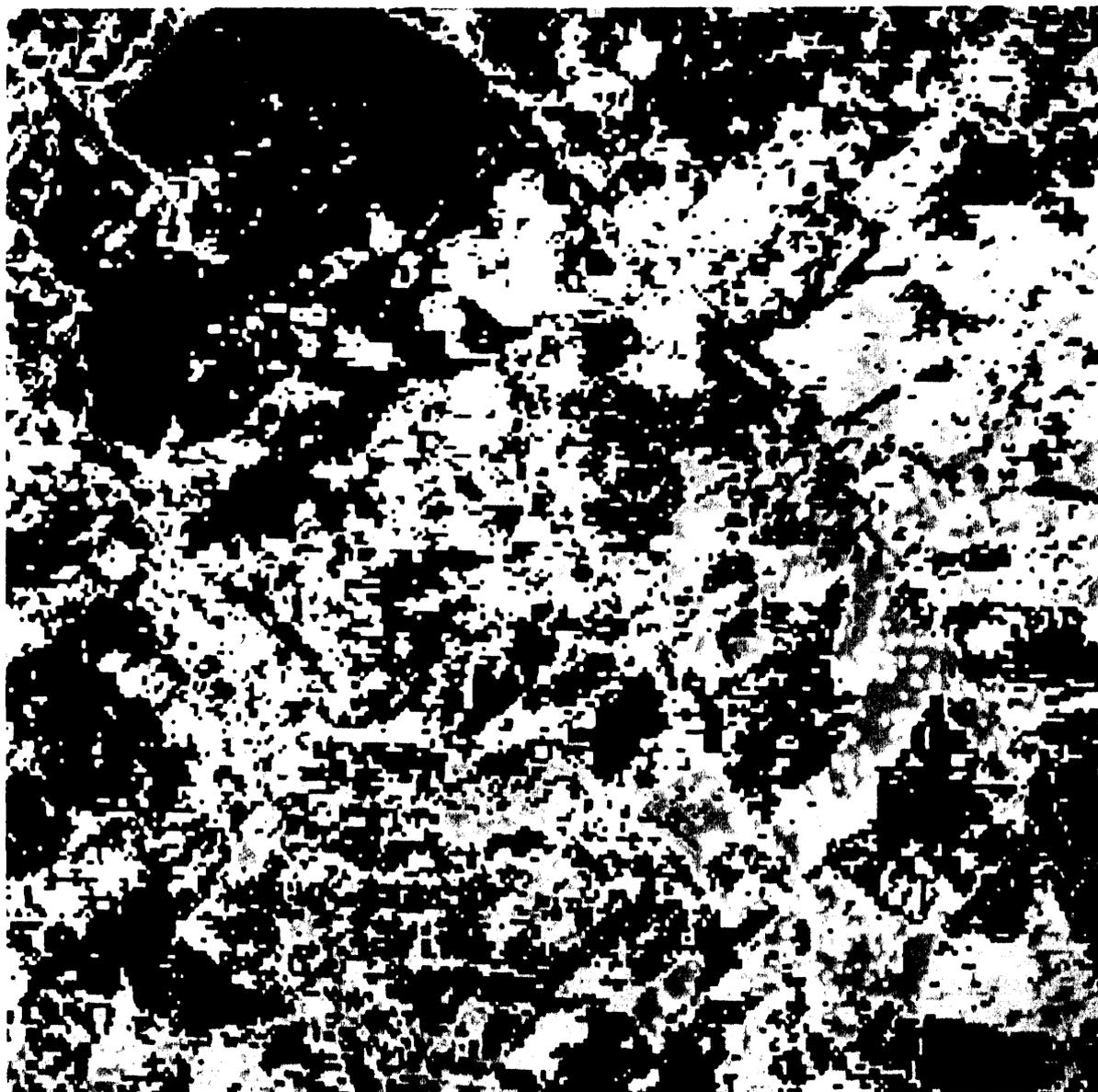


FIGURA 7.—*Mapa de radiación térmica en la aglomeración de Madrid captada por el Thematic Mapper (2-8-84), a las 9'30 horas TMG*

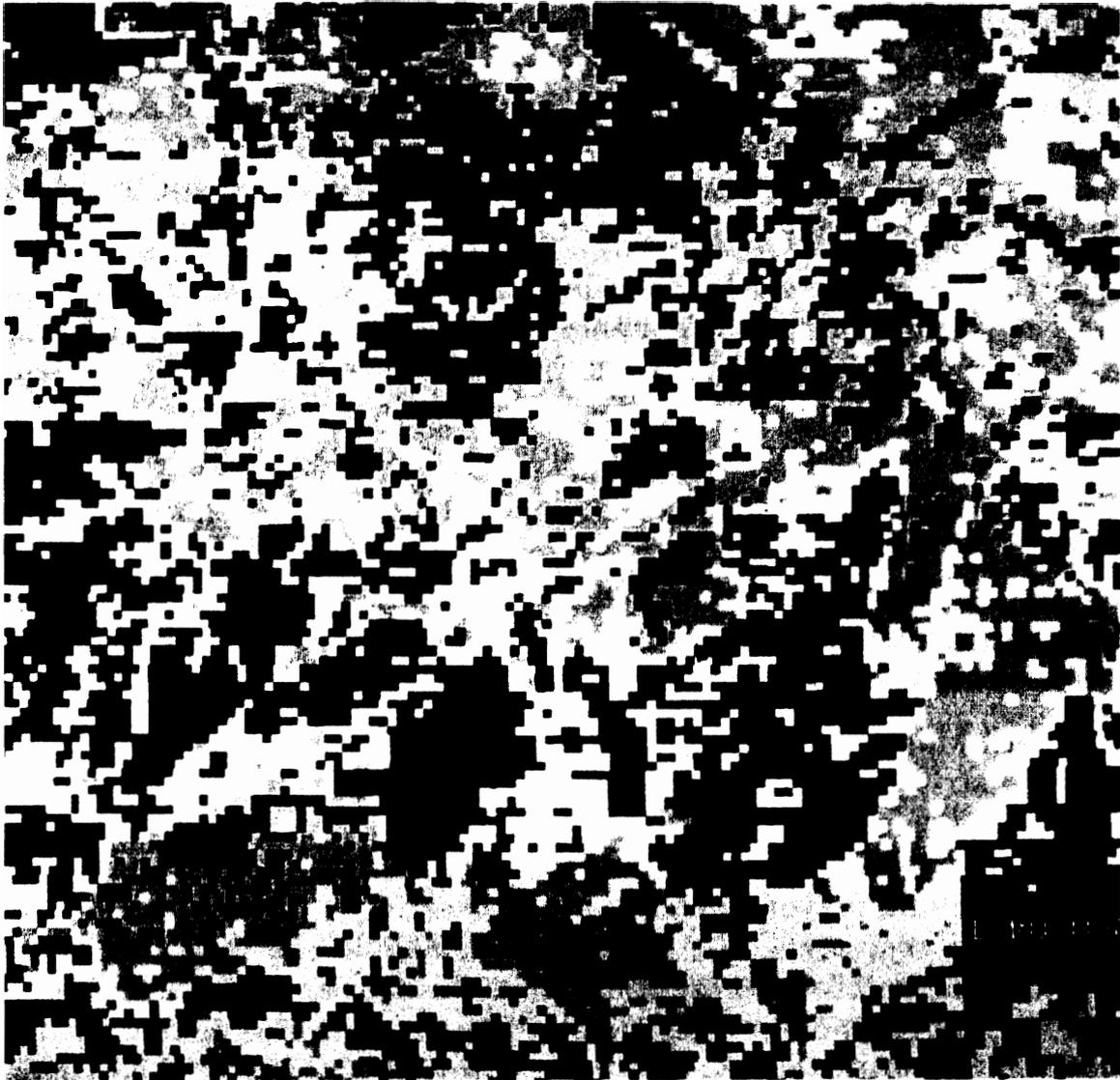


FIGURA 8.—*Detalle del mapa térmico de Madrid el 2-8-84. Obsérvese las zonas frías del Retiro, Campo del Moro y Parque del Oeste*

5. Barrios como Quintana-Ventas (E), Puerta del Ángel-Paseo de Extremadura (SW) que ofrecen una geometría algo próxima, aunque más compacta que la del Ensanche.

6. Zonas de tejido urbano heterogéneo coexistiendo viviendas unifamiliares, bloques abiertos y, en general, con acompañamiento arbóreo: por ejemplo, al NE la franja nororiental de la M-30 (entorno de la calle de Arturo Soria en Ciudad Lineal), al NW Saconia-Ciudad de los Poetas (que además posee orientación septentrional).

7. A ambos lados de la Castellana (al norte de Nuevos Ministerios) aparecen sendas manchas de menor radiación que comprenden al Oeste el entorno de la calle Orense y al Este la franja en torno al Paseo de la Habana y Padre Damián hasta los barrios de la plaza de Perú. En este área convergen a menudo altos bloques exentos (por ejemplo, en zona de AZCA), patios de manzana amplios, arbolado y zonas verdes en espacios abiertos.

C) Finalmente, en una posición intermedia en cuanto a niveles de radiación térmica se sitúa un conjunto de zonas de las que cabe extraer algunos rasgos diferenciadores:

1. El Madrid viejo, interior a los bulevares y rondas que coincide con el distrito Centro, ofrece una emisión mayor que la corona del ensanche. Ese contraste, parece asociable a una morfología urbana y, quizá, materiales de construcción específicos del casco viejo donde se da claramente una mayor compactidad del caserío y un predominio de la cubierta de teja árabe. La parte meridional de ese distrito Centro (barrio de Embajadores), en consonancia con su orientación meridional, muestra, incluso a estas horas, unas cifras aún mayores de temperatura radiante que el resto. El fenómeno se repite también en el barrio de Universidad (NW de dicho distrito), pero en este caso las cifras no son tan elevadas.

2. La amplia zona situada en el distrito de Tetuán, sobre todo al oeste de la calle de Bravo Murillo y al norte de Cuatro Caminos (barrios de Bellas Vistas, Valdeacederas, etc.) de caserío masivo y baja altura (de lo que se siguen cortas sombras) y de orientación occidental.

3. Los parecidos rasgos urbanos de buena parte del distrito de Carabanchel (SW) y de Vallecas (SE) parecen subyacer a sus similares

valores, aunque en el último caso las temperaturas se sitúan algo por encima.

4. Los barrios del sur (Villaverde) donde se yuxtaponen zonas industriales con naves de amplias techumbres homogéneas, viviendas suburbanas de baja altura y suelo vacante presentan una dominante también medio-alta en su imagen termográfica, aunque emerge algún islote más fresco asociable, por ejemplo, a colonias de bloques exentos.

5. La amplia zona de la Ciudad Universitaria (NW), donde coexisten edificios, espacios verdes y desnudos, junto con la similar de la Dehesa de la Villa.

Las singularidades estacionales: el mapa térmico en verano.—Las variaciones estacionales que se dan en nuestras latitudes tienen, como es obvio, una traducción en la información captada por el Landsat. La confrontación de la imagen correspondiente a un mes estival (2 de agosto de 1984) con la anterior, que corresponde al otoño, da lugar a algunos fenómenos destacables. En primer lugar, se constata que los niveles de radiación térmica son, en general, más altos ahora (figura 7). Ello no supone un especial problema interpretativo: el mayor período de insolación que, para la misma hora, ha ocurrido en el mes de agosto y la superior irradiación media incidente (cf. supra) conduce a que las temperaturas medias (no sólo del suelo, sino también del aire) hayan ascendido; el resultado final converge hacia una misma dirección: una mayor emisión de energía radiante.

En segundo lugar, se corrobora, como era de esperar, el esquema general o disposición de los valores de temperatura radiante en el ámbito metropolitano madrileño. La correlación entre zonas calientes, templadas y frías, pese a no haberse evaluado numéricamente, parece alta a la luz de la similitud de las dos imágenes.

Y, en tercer lugar, emerge un matiz digno de relieve: ciertas zonas se individualizan ahora respecto a su entorno por su menor emisión; los parques del Retiro, del Oeste y del Campo del Moro, por ejemplo, que en la imagen de octubre mostraban concordancia con su derredor, ahora aparecen como islotes de mayor frialdad relativa (figura 8). Este hecho podría ponerse en relación con su carácter forestal o de pradera artificial que se traduce en un comportamiento térmico diferente. El resultado es el de evidenciar más los contrastes asociados a los usos de suelo.

Algunas diferencias intraurbanas a través de los perfiles térmicos.— Los hallazgos obtenidos del estudio de los mapas de radiación infrarroja pueden ser completados valiosamente con la observación detenida de algunos «cortes». La sección de la figura 9 muestra de Oeste a Este unos elevados niveles térmicos en las áreas más exteriores que descienden de forma acusada al coincidir con los terrenos de la Casa de Campo, donde la masa forestal actúa como un absorbente de la radiación recibida; en todo caso, se destacan algunos picos correspondientes a calveros desforestados.

El límite urbano comienza con una brusca caída de la curva correspondiente al río Manzanares y el Parque del Oeste-Barrio de Argüelles; entre ambos el «pico» caluroso de la estación de Príncipe Pío o del Norte. Entre las «bajas» térmicas relativas de Argüelles y el Ensanche de Salamanca se interpone el espacio de los barrios de Universidad y Justicia (del viejo distrito Centro) con valores más altos. Hacia el Este sobresale de nuevo el pico correspondiente a la M-30 y, tras el descenso del Parque de la Elipa y el cementerio de la Almudena, los niveles de radiación se elevan formando una «meseta» en la zona rural oriental.

El cotejo de los mismos perfiles en los dos momentos analizados (agosto y octubre) hace meridianamente claros tres hechos ya anticipados: por un lado la coincidencia fundamental en la respuesta térmica del espacio en cuestión, por otro los mayores niveles absolutos emitidos en agosto y, finalmente, los superiores contrastes que se aprecian en dicho mes frente al de octubre.

La comparación entre termografía remota y temperatura superficial del aire

Las diferencias observadas entre las áreas rurales y urbanas a partir de las imágenes de satélite que acabamos de analizar, guardan estrecha relación con los estudios realizados sobre la isla térmica urbana. En ellos, también, se observan diferencias significativas entre ambos espacios, así como dentro de la ciudad entre áreas de diferente trazado y morfología (López Gómez y otros, 1988). Sin embargo, resulta complejo establecer una correlación directa entre los resultados obtenidos con el satélite, referidas como hemos visto al microclima del suelo, y la temperatura del aire. Ésta se ve influida por un gran número de

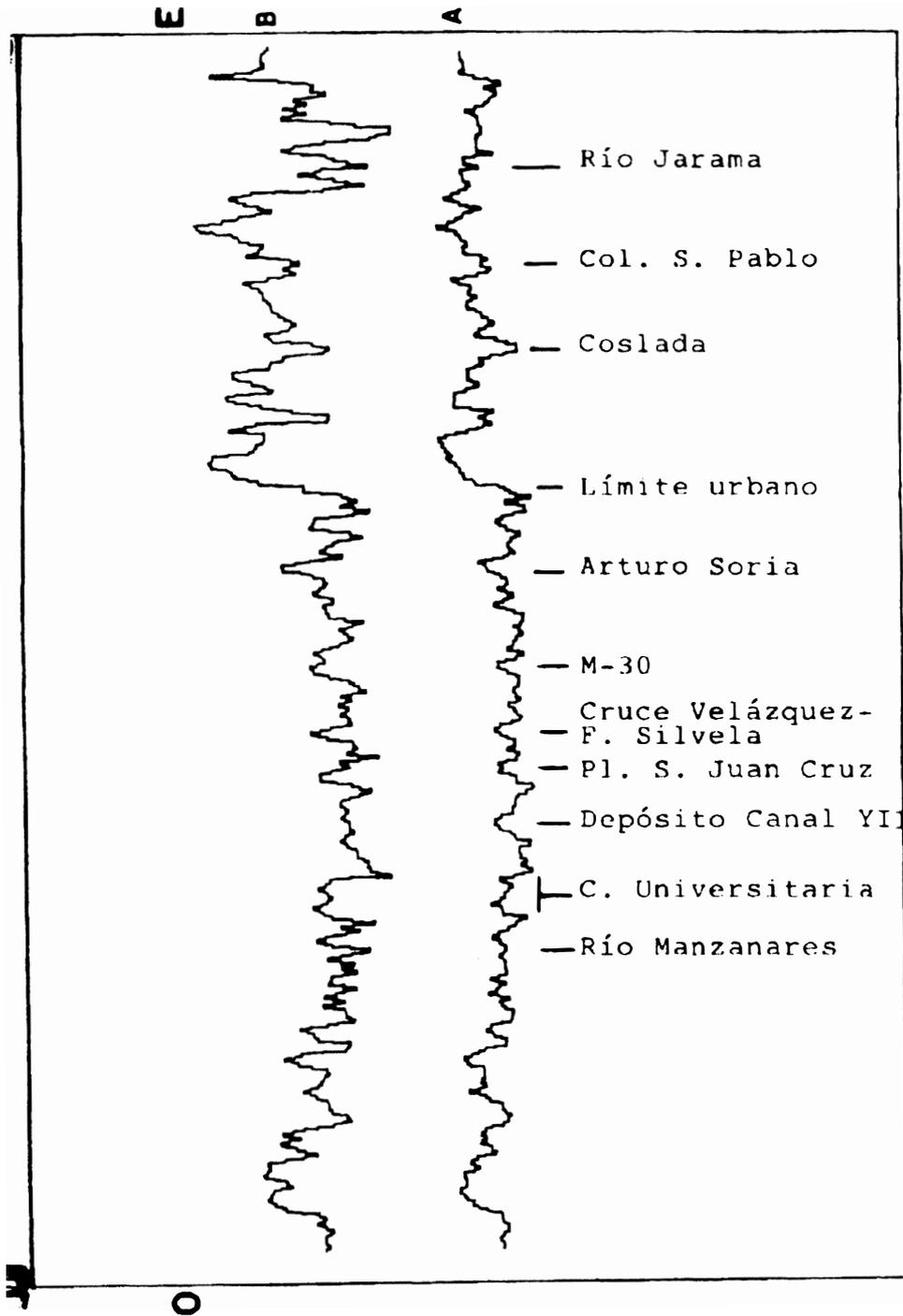


FIGURA 9.—Sección Este-Oeste de la imagen térmica a la altura de Nuevos Ministerios, el 2-8-84 (B) y el 24-10-1985 (A)

factores del entorno próximo como tráfico, turbulencias, etc., que difícilmente son captados por el infrarrojo. Durante el día estas influencias del entorno inmediato son más variadas al crearse puntos de calor y frío en espacios reducidos como consecuencia de la desigual incidencia de los rayos solares según la orientación y el tipo de materiales que conforman el espacio construido. Por ello, si durante la noche la isla de calor urbana aparece con gran nitidez en períodos de calma anticiclónica, durante el día los resultados son bastante menos claros con una atenuación de la misma y con elevaciones de temperatura en puntos que durante la noche son fríos (López Gómez y otros, 1988, pp. 189-190).

Las observaciones de superficie con termómetros digitales realizadas durante el paso del satélite del día 24 de octubre de 1985, reflejan esta enorme complejidad. Así se observaron diferencias, en puntos próximos, de hasta 3 grados en función de la insolación: en la plaza de Neptuno entre las aceras de sombra y la de sol las temperaturas registradas fueron de 17º y 19º, respectivamente, así como en plaza de Castilla, donde el termómetro registró 18º en la acera de sombra y 19'5 en la de sol. El tráfico introduce así mismo distorsiones significativas en los registros térmicos con aumentos de varias décimas al paso de autobuses o en las aglomeraciones de vehículos provocados por el cierre de los semáforos.

Al margen de estas observaciones puntuales, cuya consideración en detalle no podemos abordar en este nivel de análisis, se pueden diferenciar grandes áreas térmicamente similares, que guardan una cierta correlación con las observadas en las imágenes del Thematic Mapper. En la figura 10 se han representado las temperaturas observadas con termómetros digitales en un recorrido que va desde Aravaca, al NW de la urbe madrileña, hasta Vallecas en la periferia suroriental de la misma. Como puede observarse, las temperaturas se mantienen en torno a los 18º, con algunos puntos donde se superan los 19º, en un primer tramo que corresponde a una zona suburbana con amplios espacios abiertos y con una ligera pendiente orientada hacia el E. El comienzo de la ciudad se marca claramente por un descenso térmico acusado que se mantiene a lo largo de la calle de Princesa (Barrio de Argüelles) y Gran Vía, con elevada densidad de construcciones y un trazado aproximado de NW-SE con importantes espacios de sombra. Estos valores se mantienen en puntos del casco antiguo de la ciudad,

LA TEMPERATURA DIURNA...

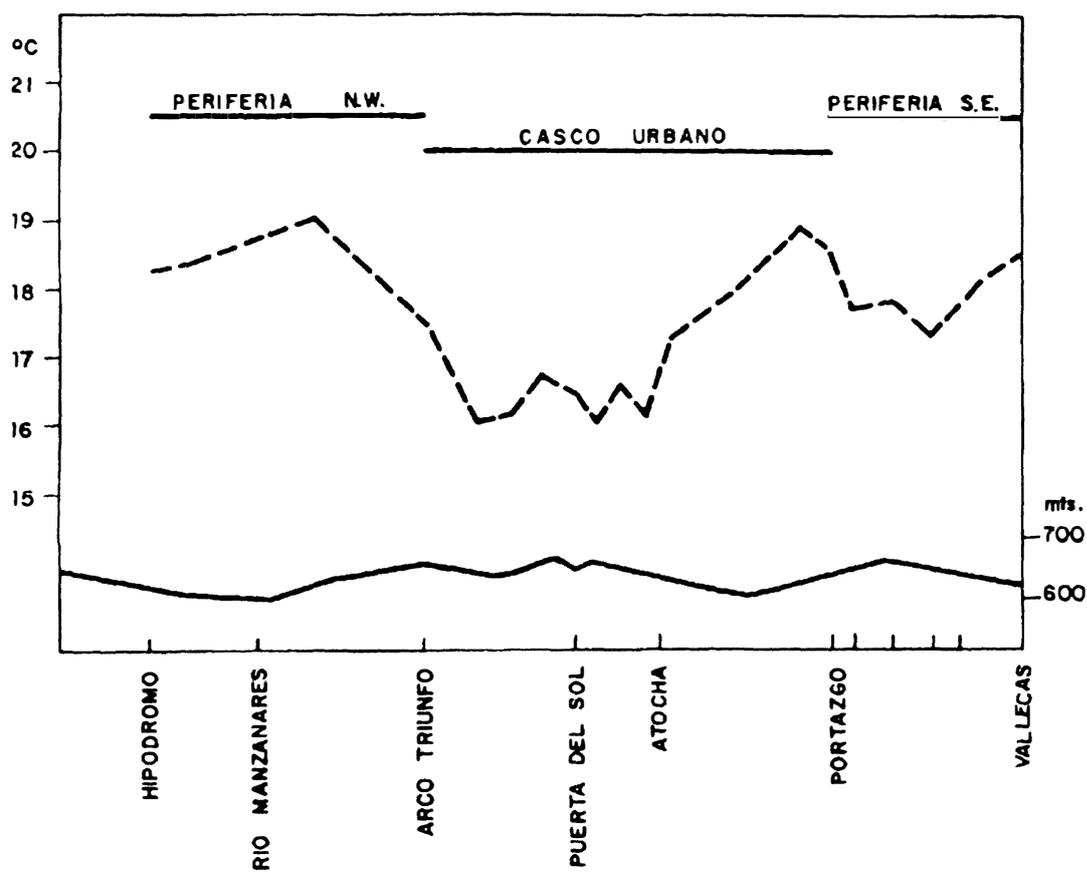


FIGURA 10.—Diagramas de la temperatura del aire en una sección NW-SE (Aravaca-Vallecas) de la aglomeración madrileña el día 24-10-85, a las 9'30 horas aproximadamente

como la Puerta del Sol con 16'5°, la plaza de Tirso de Molina y en Antón Martín, de orientación más variada, pero con un tejido de calles angostas. A partir de la Glorieta de Atocha, las temperaturas inician un nuevo incremento que es progresivo a lo largo del recorrido a través de la avenida de la Ciudad de Barcelona, al SE de la ciudad y desciende ligeramente, aunque manteniendo unos valores superiores a los del centro urbano, en una zona de parques y barrios de construcción abierta como es la colonia de Sandi y el parque de Azorín. Parece, por tanto, que a esta hora de la mañana el centro urbano se comporta como una isla de frío entre zonas suburbanas más cálidas, siendo los mismos factores que ya adelantamos al analizar las imágenes del satélite los que determinan esta diferenciación térmica.

Menos claras son las diferencias observadas en el segundo recorrido que presentamos (figura 11), cuyo trazado atraviesa la ciudad de NE a SW, desde una zona próxima al Aeropuerto de Barajas, hasta el núcleo periférico de Alcorcón. Las temperaturas, se mantienen entre los 16° y 17° desde el comienzo del recorrido, que se corresponde con un tramo de la autopista con escasa edificación, hasta la Puerta del Sol a la que se accede a través de la calle de Alcalá en una zona plenamente urbana. Los valores más altos se localizan tanto en Suances, zona suburbana, como en puntos plenamente urbanos como son los de Goya y Sevilla, en la mencionada calle de Alcalá. A partir de Sol se produce un descenso hasta el río Manzanares similar al observado durante los recorridos nocturnos, aunque de intensidad bastante menos acusada: la fuerte pendiente que presenta este tramo y la orientación de la misma hacia el W puede ser la razón de tal descenso térmico. El último tramo, que corresponde a la zona suburbana meridional donde la autopista de Extremadura discurre entre la Casa de Campo y barrios como Campamento o Cuatro Vientos, parece ligeramente más cálido que la ciudad propiamente dicha, con puntos en los que se superan los 17°, aunque las diferencias siguen siendo pequeñas.

Consideraciones finales

Desbrozar la complejidad de los mecanismos que intervienen en la conformación del microclima urbano resulta un frente de indagación que ofrece numerosas incógnitas. En el presente estudio hemos intenta-

LA TEMPERATURA DIURNA...

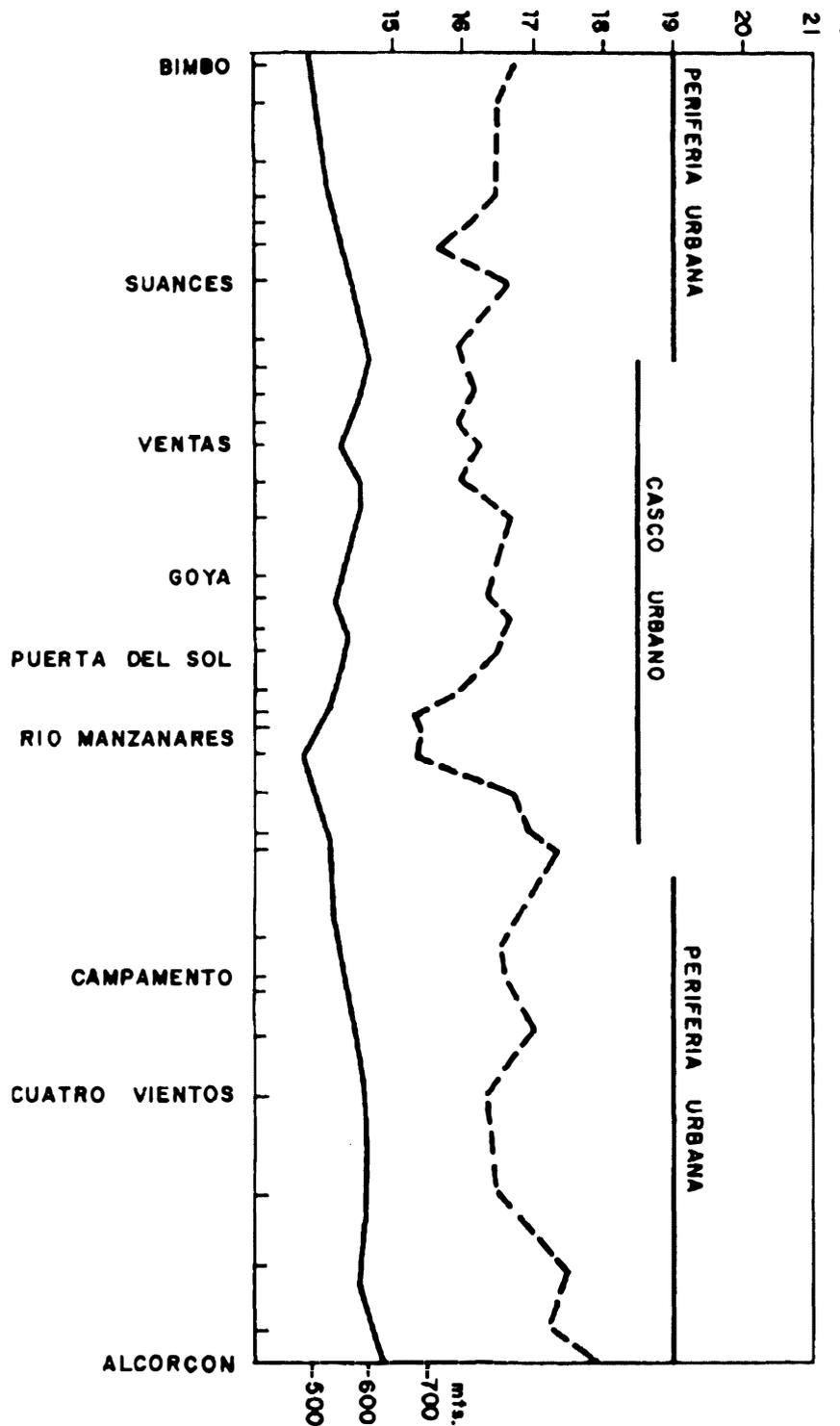


FIGURA 11.—Diagrama de la temperatura del aire en una sección NE-SW (Barajas-Alcorcón) de la aglomeración madrileña el día 24-10-85, a las 9'30 horas aproximadamente

do una primera aproximación a ellas conjugando observaciones empíricas procedentes de dos fuentes de información muy distintas: la teledetección de temperaturas del suelo y la medida *in situ* de temperaturas del aire. Más que despejar incógnitas, los resultados de este análisis suponen un comienzo para profundizar en ellas. En todo caso, y en aras de sintetizar nuestros hallazgos, se pueden establecer las siguientes consideraciones:

1) La disposición de la temperatura radiante en un área metropolitana tan amplia y diversificada interiormente como es la de Madrid, no es aleatoria sino que configura un esquema que ostenta evidentes relaciones con la estructura y morfología urbana, el uso del suelo, la topografía y la orientación.

2) Un primer resultado, previsible por otra parte, es el desigual comportamiento del campo y la ciudad al soleamiento, con una respuesta más rápida de aquél que ésta.

3) Dentro de la ciudad las zonas verdes, los espacios urbanizados con abundante vegetación y la disposición abierta y en altura de los edificios se vinculan con una menor temperatura radiante a la hora detectada por el sensor.

4) Las áreas de edificación cerrada, compacta y de altura más uniforme muestran en la imagen remota unos niveles de emisión superiores, atribuibles probablemente a que los tejados funcionan a modo de una superficie relativamente homogénea y más reflectante.

5) Los datos de temperatura del aire, pese su escaso número, parecen corroborar el contraste entre ciudad y campo, así como los matices introducidos por la orientación topográfica. Los posibles correlatos provocados por otros factores como los evocados por la imagen remota no han podido dilucidarse ante la insuficiencia de datos. La corta experiencia ganada con las tomas diurnas realizadas con termómetros digitales ha desvelado la gran volubilidad de las temperaturas aéreas a nivel del suelo. De cara al futuro, un registro más sistemático de dichas temperaturas en diferentes tipos de tejido urbano parece ineludible en aras de avanzar en el conocimiento de las interacciones entre insolación y temperatura ambiente en zonas urbanas funcional y morfológicamente diferenciadas.

6) De todo ello se desprende el carácter exploratorio de esta investigación. Las limitaciones y dificultades son todavía numerosas, en gran medida atribuibles a la complejidad de las interacciones físicas y a las carencias metodológicas existentes, pero también a los medios disponibles.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY (1975): *Manual of remote sensing*, Falls Church, 2 vol.
- BALLING, R. C. y S. W. BRAZEL (1988): «High resolution surface temperature patterns in a complex urban terrain», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 9, pp. 1.289-1.293.
- CARLSON, T. et al. (1981): «Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia», *Journal of Applied Meteorology*, 20, pp. 67-87.
- COLWELL, R. N. (1983) Ed.: *Manual of remote sensing*, Falls Church, American Society of Photogrammetry, 2 v.
- CURRAN, P. J. (1985): *Principles of remote sensing*, Londres, Longman.
- CHANDLER, T. J. (1976): *Urban climatology and its relevance to urban design*, Ginebra, WMO, Technical Note 149.
- DAVEAU, S. (1980): «A utilização possível dos registros de satélites em infravermelho térmico na climatologia regional», *Cuadernos de Teledetección*, n. 1-2, 12 pp.
- DEREK, O. L. (1984): «Urban climate», *Progress in Physical Geography*, 8, 1, pp. 1-31.
- EVANS, J. B. (1980): «Micrometeorology and infrared measurements», *Thermosense II*, Falls Church, American Society of Photogrammetry, pp. 103-105.
- LAGOUARDE, J. P. (1985): «Analyse des microclimats du Mont Ventoux par télédétection dans l'infrarouge thermique», *Méditerranée*, 1, pp. 1-40.
- LANDSBERG, H. (1981): *The urban climate*, Academic Press.
- LEMIAUX, G. H. y R. Verreault (1987): «Hacia una geografía de los microclimas por sensores remotos», *1.ª Conferencia Latinoamericana sobre informática en Geografía*, San José, Editorial Universidad Estatal a Distancia, pp. 677-702.
- LOMBARDO, M. A. (1986): «Environmental modification of metropolitan areas through satellite images: Study of urban design in the tropics», en *ESA Proceedings of the 1986 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 86) on Remote Sensing: Today's Solutions for Tomorrow Information Needs*, vol. 1, pp. 63-65.
- LÓPEZ GARCÍA, M. J. y CASELLES MIRALLES, V. (1986): «Aplicación de la teledetección al estudio de la temperatura del mar balear», *Cuadernos de Geografía*, 38, pp. 75-92.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1984): «La isla de calor en Madrid. Avance de un estudio de clima urbano», *Estudios Geográficos*, 174, pp. 5-34.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. y otros (1988): *El clima urbano de Madrid. La isla de calor*, Madrid, IEGA-CSIC.
- LÓPEZ GÓMEZ, A. (1985): «El clima de las ciudades», *Arbor*, 474, pp. 13-32.
- MATSON, M. y LEHECKIS, V. (1980): «Urban heat island detected by satellite», *Bulletin, American Meteorological Society*, 651, p. 212.

- MATSON, M. y McCLAIN, E. P. et al. (1978): «Satellite detection of urban heat island», *Mon. Wea. Rev.*, 106, pp. 1.725-1.734.
- NASA (1984): *Thematic mapper design throught flight evaluatiuon, Final Report*, Santa Barbara, Research Center RPT 41741.
- NICHOLSON, S. E. (1989): «Remote sensing of land surface parameters of relevance to climate studies», *Progress in Physical Geography*, 13, 1, pp. 1-12.
- SCHMER, F. A. (1979): «Aerial infrared sensing systems and techniques», *Thermosense I*, Falls Church, American Society of Photogrammetry, pp. 31-40.
- SCHOTT, J. R. (1979): «Principles of heat los determination using infrared themographic techniques», *Thermosense I*, Falls Church, American Society of Prhotogrammetry, pp. 155-166.
- USLE, J. (1982): *Clima y urbanismo*, Madrid, Departamento Publicaciones de la E.T.S. de Arquitectura de Madrid.

RESUMEN.—*La temperatura diurna en la aglomeración de Madrid mediante imágenes remotas.* El presente artículo constituye una exploración del microclima urbano de la aglomeración madrileña a través del análisis de sus aspectos térmicos diurnos. Para tal fin se han conjugado dos fuentes de información: por un lado registros con termómetros digitales de las temperaturas del aire y, por otro, la banda del infrarrojo térmico suministrada por el Thematic Mapper del Landsat 5. Su estudio ha puesto de realce contrastes térmicos que parecen estar asociados con la topografía y orientación así como con las diferencias de uso del suelo y morfología del tejido urbano.

PALABRAS CLAVE.—Clima urbano. Isla de calor urbana. Teledetección. Madrid.

ABSTRACT.—*Remotely sensed diurnal temperatures in the Madrid agglomeration.* This paper explores the micro-climate of the urban area of Madrid, focusing specifically on the diurnal temperatures. To this end two data sources have been used: aerial thermal records with digital thermometers and the thermal infrared band of Thematic Mapper (Landsat 5). The study reveals thermal contrasts that seem to be linked with topograhly, orientation and, also, with differences in land use and urban morphology.

KEY WORDS.—Urban climate. Urban heat island. Remote sensing. Madrid.

RÉSUMÉ.—*Les températures diurnes dans l'agglomeration de Madrid à travers de télédétection.* Cet article explore la micro-climat de l'agglomeration urbaine de Madrid, envisageant particulièrement les températures pendant le jour. Avec ce propos, deux sources de données ont été utilisés: les températures de l'air prises avec thermomètres digitales et la bande de l'infrarouge thermique du Thematic Mapper (Landsat 5). L'analyse révèle des contrastes thermiques que semblent être liés avec la topographie, l'orientation et, aussi, avec les differences d'utilisation du sol et de morfologie urbaine.

Mots clé.—Climat urbain. Île de chaleur urbain. Télédétection. Madrid.