

## EL CALENTAMIENTO URBANO: LA ISLA DE CALOR EN MONZÓN (HUESCA)

Víctor CASTILLO CASTÁN\*

RESUMEN.— El estudio trata de demostrar la existencia de una anomalía térmica positiva en el entorno urbano de una ciudad pequeña como es Monzón (Huesca). Para ello se ha realizado un estudio estadístico de temperaturas entre una estación meteorológica urbana y otra rural, complementado con un estudio de campo con mediciones de temperatura utilizando el método de transectos. La base de datos térmicos generada se ha introducido en un Sistema de Información Geográfica a partir del cual hemos obtenido la distribución espacial y la intensidad de la isla de calor urbana. Con la aplicación del método objetivo de análisis por componentes principales se ha determinado la influencia que sobre este fenómeno tienen factores como la dirección y velocidad del viento y la nubosidad. Los resultados obtenidos reflejan una intensidad moderada de la isla de calor urbana y una configuración espacial altamente influenciada por la dirección y racha máxima de los vientos dominantes WNW-ESE.

ABSTRACT.— The study tries to prove the existence of a positive thermal anomaly in the urban setting of a small city like Monzón (Huesca). We have done a statistical study of temperatures taken from both an urban and rural weather station as well as a field study with temperature measurements using the Transects Method. The heat database generated has been introduced in a Geographic Information System from which we have obtained the spatial distribution and intensity of the urban heat island. The influence of factors, such as wind direction and speed, and cloud coverage,

---

\* C/ Segura, 68. E-22400 MONZÓN (Huesca). [vcasti@telefonica.net](mailto:vcasti@telefonica.net)

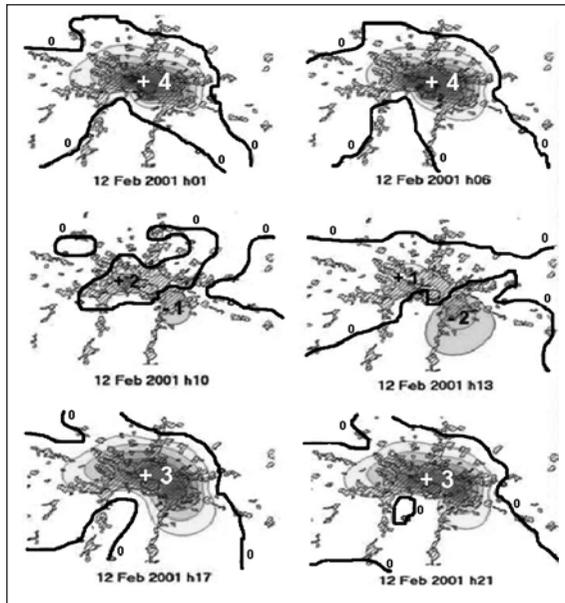
on this phenomenon has been determined by applying the Principal Components Analysis Objective Method. The results reflect a moderate intensity of the urban heat island and a spatial configuration highly influenced by the direction and maximum gust of the prevailing winds WNW-ESE.

KEY WORDS.— Urban heat island, urban environment, principal components analysis, Monzón, Huesca (Spain).

### INTRODUCCIÓN

De todas las modificaciones que ocasiona la urbanización de terrenos naturales sobre el clima, la de la temperatura es la que más evidencias muestra y menos dificultades tiene su estudio. La anomalía térmica positiva que se produce en el volumen de influencia urbano recibe el nombre de isla de calor (*the urban heat island*), denominación utilizada por primera vez por Manley en 1958.

Numerosos estudios se han realizado desde entonces en ciudades de todo el mundo, la mayoría de los cuales muestran un incremento de la isla

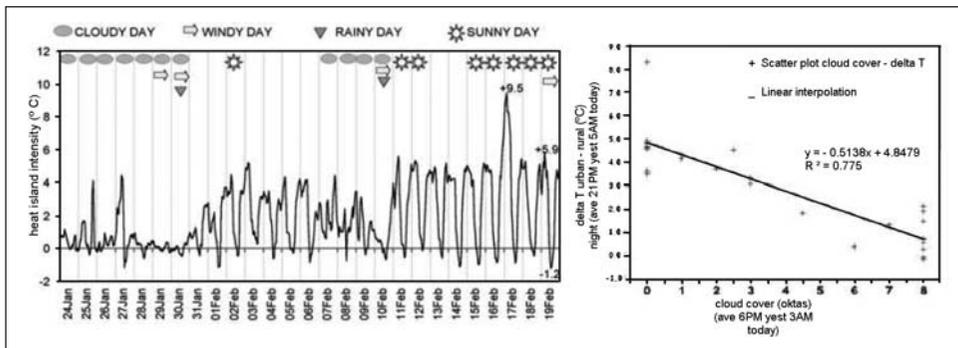


**Fig. 1.** Evolución diaria de la isla de calor en Bolonia el día 12-2-2001 en condiciones de cielo despejado. Las cifras son diferencias de temperatura urbana respecto a la rural. (BONAFÉ et alii, 2003).

de calor en invierno (LÓPEZ GÓMEZ et alii, 1993; MORENO, 1993; ALONSO GARCÍA et alii, 2004) y en algunos en verano (MORRIS et alii, 2001). Además, la intensidad máxima de la anomalía se produce en todos los casos durante la noche. La figura 1 representa la evolución de la isla de calor para la ciudad de Bolonia durante una jornada de invierno; en ella se observa una intensidad máxima entre la 1 y las 6 h de la mañana y la mínima a las 13 h, desapareciendo prácticamente el fenómeno (BONAFÈ et alii, 2003).

La distribución del fenómeno y su intensidad vienen determinadas por numerosos factores, tanto geográficos y meteorológicos como estructurales.

- El cielo cubierto de nubes inhibe la formación de la isla de calor o la minimiza (BONAFÈ et alii, 2003). La figura 2 muestra una significativa correlación entre el número de horas de cielo cubierto y la intensidad de la isla de calor.



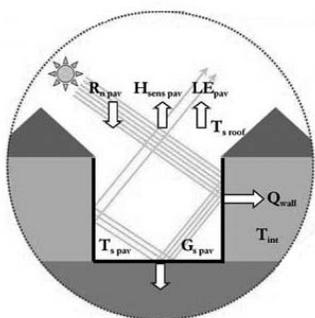
**Fig. 2.** Relación entre la nubosidad y la intensidad de la isla de calor en Bolonia (BONAFÈ et alii, 2003).

- El flujo de viento y las condiciones sinópticas modifican la intensidad y forma de la isla de calor sobre la urbe (LANDSBERG, 1981; OKE, 1970). Oke propone un umbral de velocidad del viento por encima del cual no se observa el fenómeno.

$U = 3,4 * \log P - 11,6$ , donde  $U$  es la velocidad del viento en m/s y  $P$  el número de habitantes de la población.

- Las zonas con vegetación actúan como isla de frescor dentro de la anomalía positiva (MORENO, 1994; OKE, 1995).

- La geometría urbana influye directamente en el calentamiento de la ciudad. Por un lado, el albedo bajo, causado por los materiales más absorbentes y las múltiples reflexiones producidas por paredes, tejados y suelos, atrapa la radiación solar de onda corta (Fig. 3). El mismo origen produce que por la noche la irradiación sea mucho menor debido al bajo factor de visión de cielo. A su vez, parte de la radiación de onda larga emitida a la atmósfera urbana, que está contaminada, es absorbida y devuelta al suelo (MORENO, 1999). Contribuciones todas ellas positivas para un aumento de la temperatura de la ciudad.



**Fig. 3.** Modelo de balance radiactivo en la ciudad (COST-Action 715).

- La emisión de calor antrópico, asociado al transporte de calor desde el interior de las viviendas, a los aparatos de aire acondicionado, debido al tráfico y a diversos procesos de combustión, contribuye nuevamente acentuando la anomalía positiva (FERNÁNDEZ et alii, 2004).
- El relieve dentro del casco urbano modifica la distribución de la isla de calor, formando vaguadas térmicas en las proximidades de los ríos (LÓPEZ GÓMEZ et alii, 1993; FERNÁNDEZ et alii, 1996).

La cantidad de estudios realizados sobre el clima urbano están fundamentados en la gran trascendencia que tiene sobre el confort y la salud de sus habitantes. No faltan trabajos donde se encuentran claras correlaciones entre el incremento de la mortalidad y el aumento de temperatura urbano, sobre todo en verano (ALDERSON, 1985). Cada día más, las administraciones locales tratan de realizar una gestión ambiental dirigida a controlar y mejorar la calidad ambiental de un entorno cada vez más modificado.

El estudio que se presenta a continuación analiza la influencia de la urbanización para el caso de una ciudad de tamaño medio en el campo de la temperatura, describiendo la configuración de la isla de calor, su localización dentro de la ciudad y los principales factores que influyen en ella.

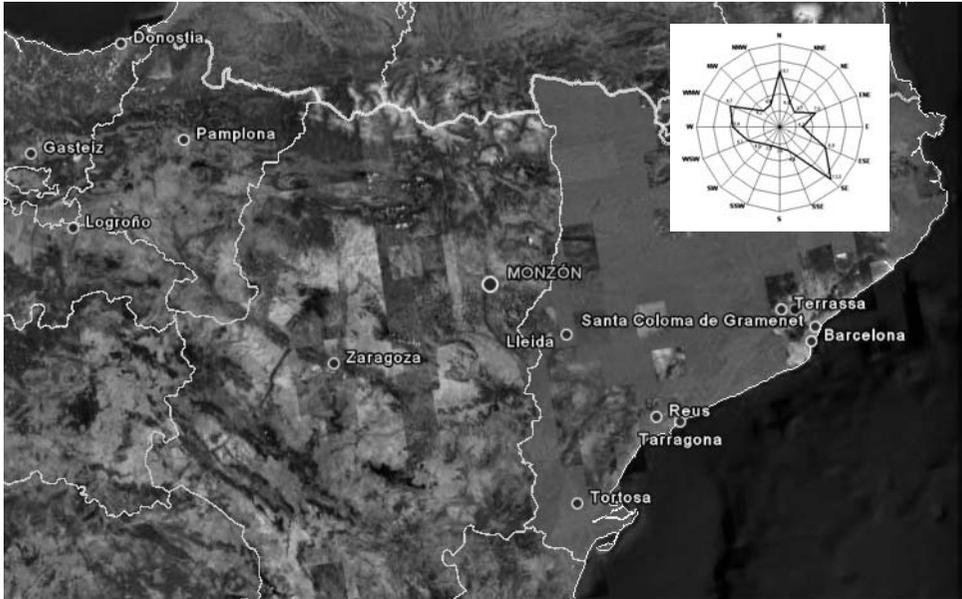
Los métodos experimentales empleados para caracterizar el fenómeno son muy variados, en nuestro caso utilizaremos los dos más trabajados en la bibliografía: comparando registros de temperatura entre estaciones urbanas y rurales (FIGUEROLA y MAZZEO, 1998; MONTÁVEZ et alii, 2000...) y mediante el método de los transectos (LÓPEZ GÓMEZ y FERNÁNDEZ, 1984; MORENO, 1994; MONTÁVEZ, 2002).

### ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Monzón se encuentra situada al NE de la cubeta que forma el valle del Ebro, en el tramo medio del río Cinca, a 270 m de altitud, y rodeada de pequeños pero abruptos tozales que apenas superan los 340 m. Por el centro de la población atraviesa el río Sosa, un pequeño afluente de caudal muy irregular que constituye la parte más baja del casco urbano. Un casco urbano estructurado en tres zonas bien diferenciadas: el casco viejo, con calles muy estrechas, donde el efecto cañón es muy marcado; la zona centro, que corresponde al ensanche con una estructura urbana más variada y heterogénea, y la periferia, con unas características intermedias entre las dos anteriores.

Su población supera, a día de hoy, los 16 600 habitantes y su principal actividad es la industria química, con importantes empresas, todas ellas ubicadas en dos polígonos industriales al NW del casco urbano.

El clima de Monzón viene marcado por la singularidad en la configuración orográfica del valle del Ebro que conforma una de las principales unidades morfoclimáticas de la Península Ibérica. Su situación interior y la barrera de montañas que rodea la cuenca, al norte los Pirineos y los Montes Vascos, en el sur el Sistema Ibérico, al este la Cordillera Prelitoral Catalana, formando una fosa triangular, condicionan en gran medida la interacción con las masas de aire húmedas procedentes de los mares que rodean la Península Ibérica. La temperatura media anual alcanza los 14,6 °C y la precipitación ronda los 460 mm. El carácter continental impone veranos cálidos e inviernos



**Fig. 4.** Situación geográfica de Monzón y frecuencia de vientos.

fríos y largos, quedando los equinoccios como periodos cortos de transición donde se alcanzan los máximos de precipitación, siendo más marcado en el otoño, mostrando así cierta afinidad con el clima mediterráneo catalán (CAPEL MOLINA, 2000). Tan solo cuando el régimen tormentoso estival es eficiente se producen máximos en dicha estación. El viento, condicionado también por la orientación del valle del Ebro, muestra máximos en la dirección WNW-ENE, aunque a diferencia de otras zonas de la depresión, la frecuencia máxima se obtiene en el segundo cuadrante (Fig. 4).

#### COMPARATIVA ENTRE EL ENTORNO URBANO Y EL RURAL

##### *Metodología y base de datos*

En primer lugar, se realizará una aproximación teórica mediante el análisis estadístico de datos correspondientes a una estación meteorológica considerada urbana y otra rural. La estación denominada como urbana se ubica a 268 m de altitud en el barrio de la Alegría, una zona de casas bajas y calles amplias al sur de Monzón y prácticamente en la periferia del casco



**Fig. 5.** Situación de las tres estaciones meteorológicas objeto de estudio.  
Con línea más gruesa, el contorno del casco urbano.

urbano. Se trata de una estación automática Davis tipo Monitor II con sensor electrónico de temperatura colocado en abrigo meteorológico a 2 m del suelo. La estación denominada como rural es la estación automática de Alfántega de la red agroclimática, situada 10 km al sur de Monzón, rodeada de cultivos y a 250 m de altitud (Fig. 5).

La serie temporal común de que se dispone es muy pequeña, tres años, correspondientes al periodo 2004-2007, insuficiente para cualquier tratamiento estadístico con cierto rigor, pero suficiente para determinar ciertas condiciones del entorno y tendencias.

#### *Resultados de la comparativa entre la estación urbana y la estación rural*

Para realizar el estudio se analizaron 1011 pares de datos diarios, tanto de mínimas como de máximas entre la estación urbana y la rural 2 de Alfántega,

para el periodo comprendido entre 2004-2006. Para garantizar la homogeneidad de los datos entre ambas estaciones se obtuvo el coeficiente de determinación para las temperaturas máximas y mínimas diarias con muy buenos resultados: 0,996 y 0,976, respectivamente.

En el estudio de las temperaturas mínimas se aprecian valores de UHI promedio (intensidad de isla de calor urbano promedio) positivos durante todos los meses analizados y aunque existe alta variabilidad en los resultados de un año a otro (Fig. 6), al obtener una curva de tendencia polinómica apreciamos cierta homogeneidad entre años, con máximos comunes durante la primavera y el otoño, manteniéndose elevada en verano y con un mínimo marcado en invierno.

Los valores promedio mensuales oscilan entre 0,7 y 2,5 °C de anomalía positiva en la estación urbana y la evolución anual es bastante regular con unas diferencias en torno a 1,5 °C con el entorno rural. El promedio de UHI de los tres años es de 1,53 °C y las intensidades de isla de calor máximas diarias que se han observado llegan a ser en alguna ocasión entre

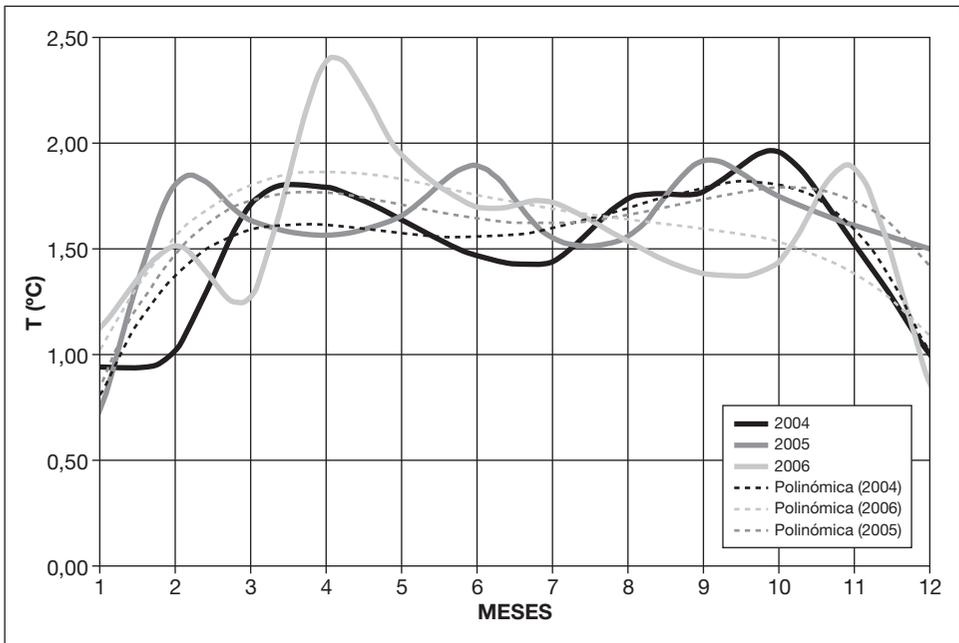


Fig. 6. Representación gráfica del promedio mensual de UHI de las temperaturas mínimas.

moderada y fuerte, entre 4 ° y 5 °C, alcanzando menor intensidad en sentido contrario como era de esperar (Tabla I).

El análisis estadístico estacional de la UHI promedio refleja lo que se intuye en la figura 6, el máximo se produce en primavera (marzo, abril y mayo) con un promedio de 1,73 °C, siendo ligeramente menor durante el verano y el otoño, con valores por encima de 1,6°. El invierno marca el mínimo con 1,21 °C (Tabla II). Estos valores están de acuerdo, tanto en distribución como en intensidad, con estudios hechos sobre ciudades medianas como Cáceres (LÓPEZ GÓMEZ et alii, 1993) o Salamanca (ALONSO et alii, 2004).

El estudio de la intensidad de la isla de calor durante el día se hizo con las temperaturas máximas diarias de ambas estaciones, volviendo a aparecer el fenómeno ya mostrado en el anterior apartado, una isla de frescor

**Tabla I.** Valores medios y extremos anuales de la UHI de temperaturas máximas y mínimas.

<i>Evolución anual</i>		2004	2005	2006	Media
UHI T MÁX. (°C)	Media	-0,15	0,03	0,17	0,02
	Máx.	2,12	3,12	2,42	2,55
	Mín.	-2,60	-2,34	-2,90	-2,61
UHI T MÍN. (°C)	Media	1,50	1,59	1,51	1,53
	Máx.	4,98	5,69	4,44	5,04
	Mín.	-1,59	-2,17	-1,89	-1,88

**Tabla II.** Valores medios y extremos de la UHI de temperaturas máximas y mínimas para cada estación.

<i>Evolución estacional</i>		Invierno	Primavera	Verano	Otoño
UHI T MÁX. (°C)	Media	0,35	-0,01	-0,37	0,05
	Máx.	3,12	1,88	1,21	1,60
	Mín.	-2,90	-1,70	-2,41	-2,60
UHI T MÍN. (°C)	Media	1,21	1,73	1,62	1,69
	Máx.	3,66	5,69	4,44	4,98
	Mín.	-1,61	-2,17	-1,89	-1,03

durante la mayor parte del año en el casco urbano o al menos en la periferia. La intensidad del fenómeno fluctúa según los años (Fig. 7) como ya ocurría con la temperatura mínima, pero de una forma mucho más regular. El análisis de tendencia mediante una polinómica de 4º orden revela un patrón de comportamiento casi parabólico con un máximo positivo en invierno (isla de calor urbana) de entre 0,2 y 0,7 °C y un mínimo negativo (isla de frescor urbana) en verano de hasta -1,3 °C.

La media anual oscila muy poco, una o dos décimas en torno al cero, con máximas intensidades diarias de entre 2 y 3 °C tanto positivas como negativas (Tabla I). Por estaciones, el invierno marca la máxima anomalía positiva con 0,35 °C más de media de las máximas en la ciudad y el mínimo en verano con una media, en este caso, mayor en la estación rural de 0,37 °C.

Estos resultados vuelven a coincidir con valores obtenidos para ciudades como Cáceres, Salamanca, Logroño o incluso Barcelona (LÓPEZ GÓMEZ et álui, 1993), donde la UHI media de las máximas adopta el máximo en invierno y el mínimo en verano, pero en ningún caso por encima de 1 °C absoluto.

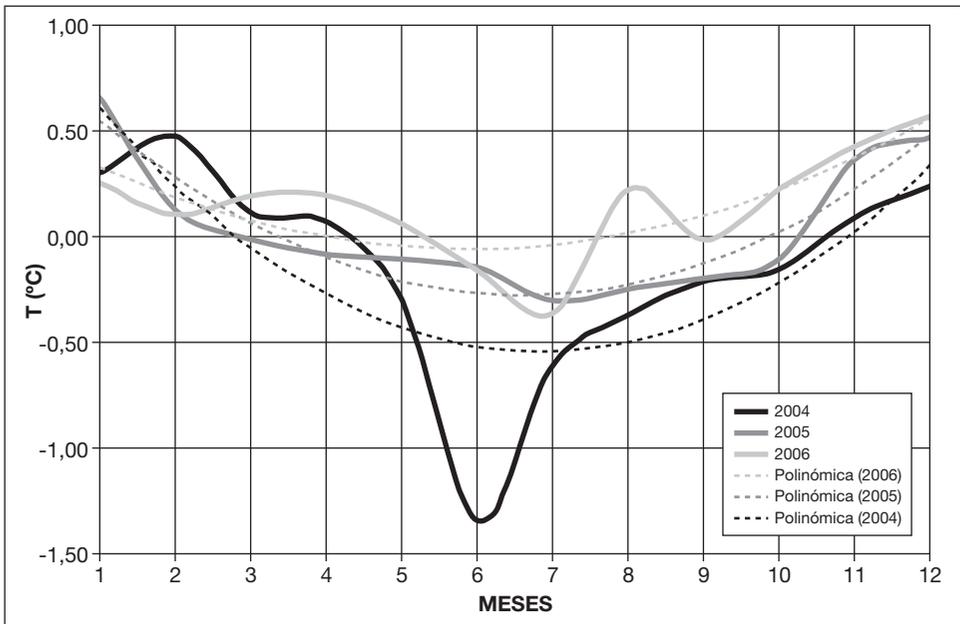
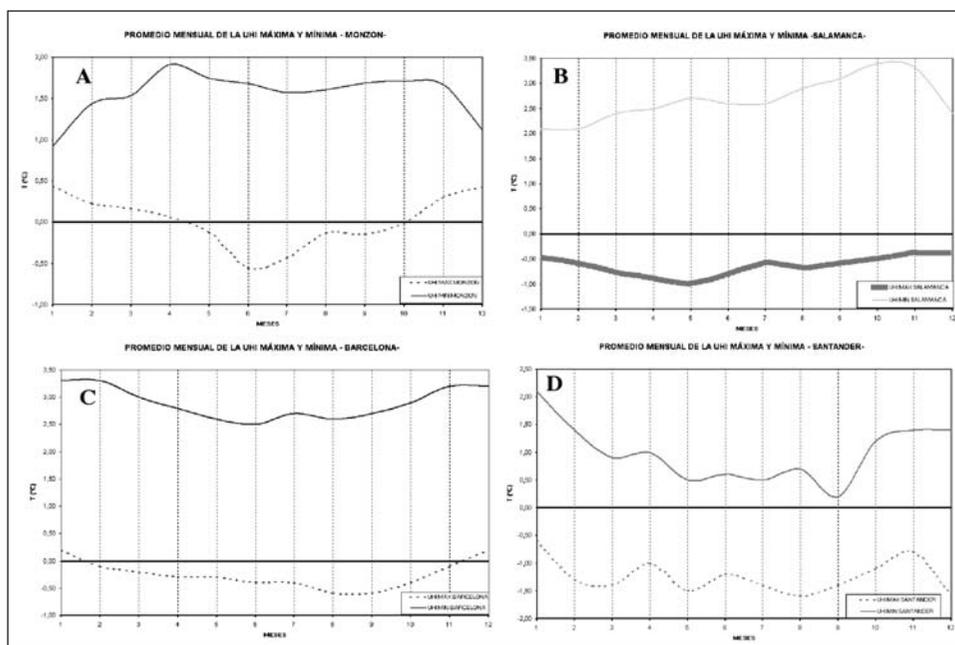


Fig. 7. Representación gráfica del promedio mensual de UHI de las temperaturas máximas.

La amplitud térmica calculada con las medias mensuales resulta inferior en la ciudad respecto al entorno rural. Analizando conjuntamente las curvas de UHI para máximas y mínimas, observamos que para Monzón el diferencial de amplitud térmica con respecto a la estación rural es máximo en verano con  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y mínimo en invierno con  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Fig. 8A). Esto es debido principalmente a la elevada capacidad calorífica de los materiales urbanos sometidos, sobre todo en verano, a elevadas dosis de radiación solar.

Si comparamos con otras ciudades españolas, vemos que las ciudades del interior parecen comportarse de diferente manera que las costeras en lo que se refiere a la UHI de las temperaturas máximas. En estas la máxima intensidad de isla de calor para las mínimas se establece en invierno, dando el mínimo durante el verano; sin embargo, la evolución de la UHI de las máximas es bastante común en todas las ciudades (Fig. 8). LÓPEZ GÓMEZ (1993) argumenta tal fenómeno mediante la asociación de las máximas intensidades de isla de calor con la entrada de flujos del norte, más recurrentes en el periodo invernal.



**Fig. 8.** Promedio mensual de la UHI de las temperaturas máximas y mínimas para diversas ciudades españolas. (A) Monzón, (B) Salamanca, (C) Barcelona, (D) Santander. Elaboración propia (fuente: LÓPEZ GÓMEZ et alii, 1993; ALONSO et alii, 2004).

**Tabla III.** Cuantiles de la UHI mínima distribuidos por meses.

Meses	Percentiles						
	5	10	25	50	75	90	95
1	-,483	-,330	,062	,917	1,790	2,098	2,420
2	-,454	-,053	,697	1,631	2,246	2,725	2,947
3	-,824	-,245	,454	1,698	2,453	3,117	3,309
4	,102	,391	1,008	1,955	2,594	3,203	3,590
5	-,058	,494	1,080	1,760	2,483	3,092	3,435
6	,463	,836	1,295	1,610	2,085	2,532	3,645
7	-,121	,345	,953	1,700	2,148	2,761	3,146
8	-,056	,538	1,010	1,740	2,050	2,620	3,190
9	-,953	-,304	,545	1,565	2,500	3,448	5,251
10	,182	,592	,856	1,705	2,173	2,857	3,406
11	-,169	,313	,942	1,589	2,132	3,086	3,730
12	-,717	-,349	,440	1,219	1,758	2,476	2,715

Profundizando más en el análisis estadístico de las diferencias entre las mínimas de la estación urbana y la rural (UHI mín.), realizamos un cálculo de cuantiles o valores de probabilidad de ocurrencia por meses (Tabla III). De los resultados obtenidos destacan, por un lado, que en los meses de abril, junio y octubre, más del 95% de los días se produce el fenómeno de isla de calor y en más del 75% de cualquier mes del año. Septiembre es el mes con las máximas intensidades de isla de calor, en más del 5% de los días la UHI se alcanzan los 5 °C, curiosamente contrasta con el hecho de que es uno de los meses en que menos días de isla de calor se producen. En general, salvo en enero y diciembre, en la mitad de los días existe isla de calor con una intensidad de más de 1,5 °C y en más del 25% se alcanzan los 2 °C.

## MÉTODO DE LOS TRANSECTOS

### *Metodología*

Con este método, utilizado en muchas ciudades españolas (LÓPEZ GÓMEZ et alii, 1993; MORENO, 1994; VICENTE et alii, 2005), se pretende cuantificar por zonas la intensidad de la anomalía térmica en el núcleo urbano de Monzón. Para ello se va a utilizar un vehículo con un sensor de temperatura colocado en su antena, aproximadamente a 1,50 m del suelo.

El sensor electrónico es una PT100 de baja inercia con conexión tipo K. La toma de datos se realiza de forma continua a una velocidad regular de  $30\text{-}40\text{ km/h}^{-1}$  y con ayuda de una grabadora se irán recogiendo los datos en los puntos estimados.

Los transectos serán tres, abarcando la totalidad de barrios o zonas que conforman Monzón. La hora de comienzo del primer transecto será, aproximadamente, las 22.30 h, hora local. En principio, cada día se realizarán los tres transectos, ya que son de corta duración y salvo fuertes irradiaciones o cambios imprevistos en la meteorología no habrá problemas en la asimilación de los datos.

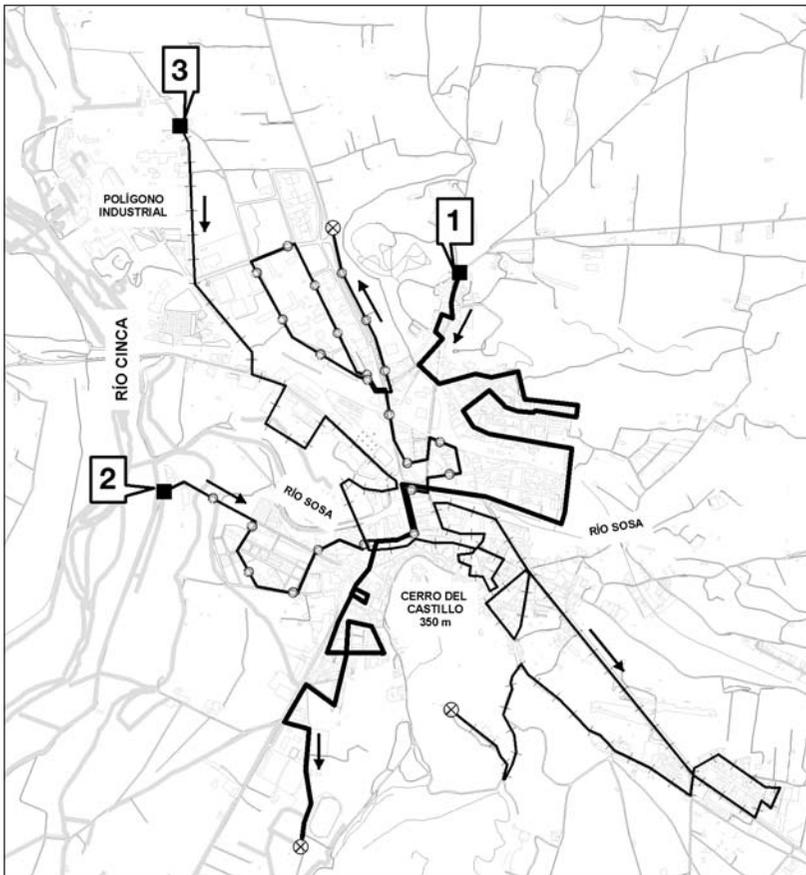
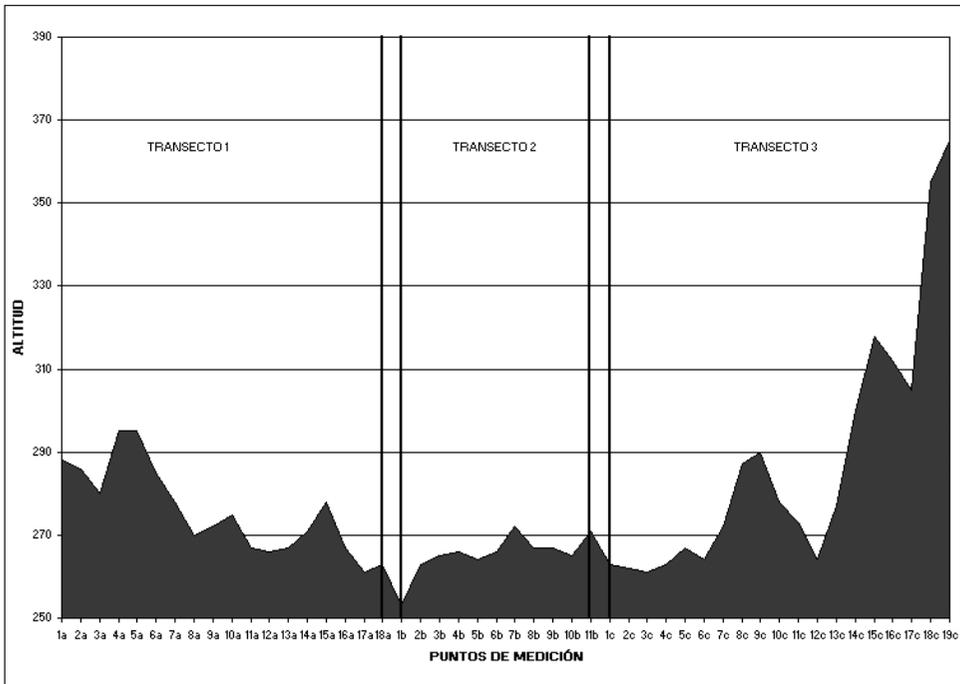


Fig. 9. Recorrido de los tres transectos (1, 2, 3) por las calles de Monzón.

El estudio comienza con un recorrido de prueba a velocidad baja por todos los puntos representativos y, sobre todo, los que a priori son susceptibles de sufrir alguna anomalía térmica. El recorrido se realiza en algo más de hora y media y se constata la validez de todos los datos con un punto de control en lo que se denominan las *Cuatro Esquinas*, haciendo pasar el vehículo dos veces por ese punto.

Una vez elegidos los puntos de medida se diseñan los transectos, que quedan según el plano de la figura 9. El primer transecto atraviesa la población de norte a sur, con un recorrido total de 7,7 km, que se realiza en 20 minutos aproximadamente (Tabla IV). La primera parte transcurre por la parte alta del norte del casco urbano, para luego bajar al cauce del río Sosa y después de atravesarlo acabar en la ladera este del río Cinca, con tendencia descendente. El segundo transecto comienza en el punto más bajo de todo el recorrido, a orillas del Cinca, y realiza un recorrido corto de W a NW, pasando por el centro, de algo menos de 6 km, que se desarrolla



**Fig. 10.** Perfil de los tres transectos colocados uno a continuación del otro, tal y como se desarrollan.

**Tabla IV.** Características de los transectos  
(nombres de los puntos de medición, altitud, distancia relativa y coordenadas UTM).

<b>Transecto 1</b>					
<i>Núm.</i>	<i>Nombre</i>	<i>Alt.</i>	<i>D</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
<b>1a</b>	Butano	288	0	765 011	4 646 187
<b>2a</b>	Diego Velázquez	286	400	764 910	4 645 937
<b>3a</b>	Calvario cruce Inmaculada	280	800	764 913	4 645 684
<b>4a</b>	Almería (final)	295	1150	765 242	4 645 754
<b>5a</b>	NE Palomar	295	1600	765 500	4 645 600
<b>6a</b>	Málaga con Jaén	285	2130	765 103	4 645 643
<b>7a</b>	Final de Huesca	278	2660	765 300	4 645 438
<b>8a</b>	Túnel vía Palomar	270	2900	765 472	4 645 307
<b>9a</b>	Kiosco con Jaime	272	3440	765 133	4 645 191
<b>10a</b>	Estación de Renfe	275	3860	765 325	4 645 335
<b>11a</b>	Nudo carretera de Fonz	267	4760	764 786	4 645 262
<b>12a</b>	Cuatro Esquinas	266	4960	764 806	4 645 064
<b>13a</b>	Casa de la Cultura	267	5380	764 629	4 644 928
<b>14a</b>	Plaza de San Juan	271	5680	764 604	4 644 768
<b>15a</b>	Fuente del Saso	278	6180	764 659	4 644 585
<b>16a</b>	Segura (final)	267	6700	764 475	4 644 326
<b>17a</b>	Deporte	261	7050	764 275	4 644 228
<b>18a</b>	Pistas de atletismo	263	7720	764 340	4 643 724
<b>Transecto 2</b>					
<i>Núm.</i>	<i>Nombre</i>	<i>Alt.</i>	<i>D</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
<b>1b</b>	Matadero	253	0	763 771	4 645 238
<b>2b</b>	Cinca	263	660	764 102	4 644 888
<b>3b</b>	Comienzo Vero	265	1060	764 307	4 644 795
<b>4b</b>	Avenida del Pueyo con DIA	266	1600	764 589	4 644 977
<b>5b</b>	Puente Nuevo	264	1900	764 581	4 645 066
<b>6b</b>	Cuatro Esquinas	266	2160	764 809	4 645 068
<b>7b</b>	Eroles con Muret	272	2600	765 019	4 645 319
<b>8b</b>	Templarios	267	3000	764 832	4 645 359
<b>9b</b>	Cruce Fonz – La Almunia	267	3320	764 713	4 645 585
<b>10b</b>	Centro polígono de Las Paúles	265	4670	764 264	4 645 939
<b>11b</b>	Entrada del polígono	271	5850	764 457	4 646 314

<b>Transecto 3</b>					
<i>Núm.</i>	<i>Nombre</i>	<i>Alt.</i>	<i>D</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
<b>1c</b>	Entrada Montecinca	263	0	763 341	4 646 849
<b>2c</b>	Estación INM	262	600	763 867	4 646 123
<b>3c</b>	Paso a nivel	261	1120	764 118	4 645 813
<b>4c</b>	Final de San Jorge	263	1720	764 297	4 645 435
<b>5c</b>	Conservatorio	267	2170	764 756	4 645 253
<b>6c</b>	Puente Nuevo	264	2600	764 619	4 645 010
<b>7c</b>	Ayuntamiento	272	2980	764 862	4 645 014
<b>8c</b>	Catedral	287	3330	765 016	4 644 935
<b>9c</b>	Santo Domingo	290	3600	765 166	4 644 824
<b>10c</b>	Sancho Ramírez (abajo)	278	3720	765 201	4 644 923
<b>11c</b>	Transc. con Santa Bárbara	273	3870	765 115	4 645 034
<b>12c</b>	El Malecón, Joaquín Costa	264	4400	765 080	4 645 135
<b>13c</b>	Comienzo de Cabañera	277	4820	765 295	4 644 890
<b>14c</b>	Balsa con Tejerías	300	5270	765 249	4 644 589
<b>15c</b>	Bellavista (Carrasca)	318	7300	766 381	4 643 910
<b>16c</b>	Nudo carretera de Binaced	312	7850	766 034	4 644 027
<b>17c</b>	Cruce subida campo de tiro	305	8930	765 285	4 644 465
<b>18c</b>	Collado	355	9530	765 209	4 643 984
<b>19c</b>	Campo de tiro	365	9880	764 995	4 644 264

en 10 minutos. El tercero y último comienza al NW del casco urbano y del polígono industrial, detrás de la fundición, y termina al SE en el campo de tiro sobre el cerro del castillo. Su perfil es el más accidentado, ya que comienza en la parte baja, cercana al río Cinca, y después de subir y bajar por la ladera de la margen izquierda del río Sosa en dos ocasiones se vuelve a subir hasta el cerro del castillo, punto más alto de todo el recorrido (Fig. 10). Este último transecto es el más largo, con casi 10 km, realizados en algo más de 20 minutos. En total, una hora de recorrido para 28 km y 47 puntos de medición.

Los datos base para el trabajo proceden, por un lado, de un estudio realizado en 2005 con nueve días de observación aprovechables, complementado con otros diez días en 2007.

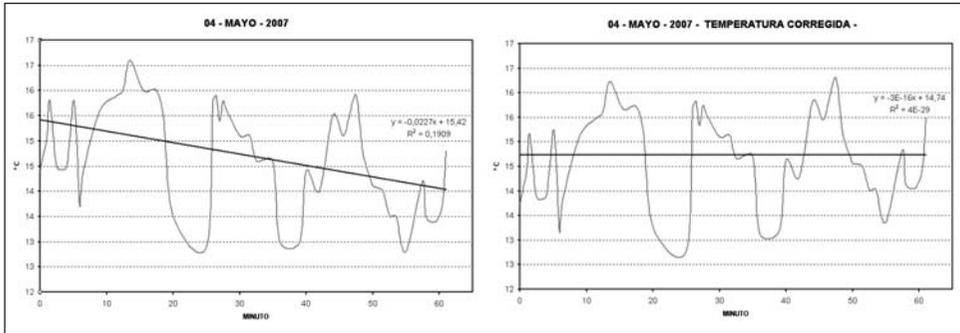
### *Hipótesis de partida*

Las hipótesis de partida nos van a marcar unos objetivos a la hora de analizar los resultados de las mediciones.

- El clima continental de Monzón debe favorecer el fenómeno de “isla de calor”.
- Según OKE y HANELL (1970), la influencia del tamaño de Monzón, medido por su población, producirá una intensidad máxima de “isla de calor” de 4,3°.
- En los días con velocidad del viento superior a 3 m/s no se debe apreciar anomalía térmica, según Oke y Hanell (1970).
- En el caso de que se aprecie el fenómeno con viento, el efecto de calentamiento urbano se debe trasladar en la dirección de aquel.
- Con viento del cuarto cuadrante se debe de notar cierto calentamiento en el polígono y en el norte de la ciudad debido al calor desprendido por la fundición. Sobre todo en situaciones de anticiclón.
- La intensidad máxima del fenómeno se producirá con situación anticiclónica, sin viento y sin nubes o con muy pocas.
- Las zonas con mayor efecto térmico deben ser las afectadas por el mayor tráfico (Santa Bárbara y carretera nacional 240) y el casco antiguo por tener las calles muy estrechas.
- Los domingos se debe minimizar el efecto de “isla de calor” por disminuir en gran medida la actividad humana.

### *Control de calidad y tratamiento de datos*

Como el muestreo de temperaturas no se realiza simultáneamente, la medición está sometida a una variación temporal ajena a la anomalía espacial motivada por el fenómeno de isla de calor. En este caso, al realizar la observación en un periodo en el que la temperatura ambiental desciende rápidamente, el decremento de esta, que en ocasiones alcanza los 3 °C (Tabla VII), falsea las mediciones. Con el objeto de hacer comparables las temperaturas recogidas se suelen corregir reduciéndolas a la hora central del recorrido, por medio de un ajuste lineal a partir de la recta de tendencia



**Fig. 11.** Corrección de temperatura respecto a la tendencia por enfriamiento nocturno.

respecto del tiempo y sus valores residuales (VICENTE et alii, 2005). En los 19 días de observaciones hubo que hacer dicha corrección; en la figura 11 se muestra un ejemplo del antes y después de la corrección, donde se observa cómo se anula la tendencia, pero no se pierde información de las anomalías espaciales encontradas.

Si la corrección anterior era necesaria para poder comparar simultáneamente los datos de cada observación, también es imprescindible hacer los datos comparables entre todas las observaciones. Por ello, se realiza la estandarización de los datos de cada día de acuerdo con la media y con la desviación estándar de la serie diaria. Para asegurarnos de que las series se ajustan a una distribución normal, realizamos el test de Kolmogorov-Smirnov, determinando que las 19 series de datos se podían ajustar a dicha distribución (Tabla V). Este procedimiento de normalización no afecta a la homogeneidad de los datos y permite su comparabilidad espacial.

Una vez que tenemos los datos de temperatura normalizados, ya se pueden introducir los datos en un SIG con garantías de una buena interpretación espacial, si bien se pierde información acerca de la intensidad absoluta del fenómeno. Como los datos introducidos son discretos y en coordenadas puntuales e irregularmente repartidas, necesitamos obtener un mapa espacial de datos continuo para poder interpretar los resultados, y esto se consigue por medio de la interpolación. El método más fiable usado en estos casos es el Kriging Ordinario (MONTÁVEZ et alii, 2000) con ajuste de semivarianzas por medio de modelos de semivariogramas esféricos. Los 19 mapas así obtenidos se validan posteriormente comparando los

**Tabla V.** Prueba de Kolmogorov-Smirnov. Los valores de sig. > 0,05 indican el ajuste a una distribución normal teórica.

<i>Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra</i>																																										
N	V1		V2		V3		V4		V5		V6		V7		V8		V9		V10		V11		V12		V13		V14		V15		V16		V17		V18		V19					
		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50			
Parámetros normales (a, b)	Media	12,28	12,01	11,02	11,83	7,15	13,36	11,61	10,95	12,32	16,40	14,49	14,80	14,67	12,91	15,42	21,35	17,98	21,90	21,89																						
	Des. típica	0,437	0,458	0,824	0,601	0,404	0,487	0,574	0,577	1,313	1,008	0,744	0,910	1,475	0,482	0,545	0,805	0,608	0,745	1,403																						
Diferencias más extremas	Absoluta	0,140	0,107	0,167	0,159	0,121	0,096	0,115	0,160	0,079	0,106	0,139	0,130	0,142	0,090	0,084	0,102	0,141	0,129	0,098																						
	Positiva	0,067	0,090	0,124	0,087	0,091	0,081	0,067	0,089	0,064	0,094	0,061	0,062	0,095	0,048	0,061	0,076	0,099	0,070	0,053																						
	Negativa	-0,140	-0,107	-0,167	-0,159	-0,121	-0,096	-0,115	-0,160	-0,079	-0,106	-0,139	-0,130	-0,142	-0,090	-0,084	-0,102	-0,141	-0,129	-0,098																						
Z de Kolmogorov-Smirnov	0,990	0,758	1,182	1,126	0,853	0,680	0,811	1,130	0,556	0,751	0,984	0,919	1,006	0,635	0,592	0,720	0,998	0,913	0,694																							
Sig. asintót. (bilateral)	<b>0,281</b>	<b>0,613</b>	<b>0,122</b>	<b>0,159</b>	<b>0,460</b>	<b>0,743</b>	<b>0,526</b>	<b>0,156</b>	<b>0,917</b>	<b>0,626</b>	<b>0,287</b>	<b>0,367</b>	<b>0,264</b>	<b>0,815</b>	<b>0,875</b>	<b>0,677</b>	<b>0,272</b>	<b>0,375</b>	<b>0,720</b>																							
Sig. exacta (bilateral)	<b>0,256</b>	<b>0,576</b>	<b>0,109</b>	<b>0,142</b>	<b>0,427</b>	<b>0,707</b>	<b>0,490</b>	<b>0,139</b>	<b>0,893</b>	<b>0,589</b>	<b>0,262</b>	<b>0,338</b>	<b>0,240</b>	<b>0,781</b>	<b>0,846</b>	<b>0,640</b>	<b>0,247</b>	<b>0,345</b>	<b>0,684</b>																							

**Tabla VI.** Estadísticos de error calculados para validar los resultados de la interpolación por Kriging en los 19 mapas.

Estadísticos	Media																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
R <sup>2</sup>	0,90	0,87	0,90	0,77	0,94	0,91	0,94	0,96	0,88	0,87	0,94	0,96	0,73	0,97	0,97	0,96	0,97	0,94	0,98	<b>0,915</b>
R	0,95	0,93	0,95	0,88	0,97	0,96	0,97	0,98	0,94	0,93	0,97	0,98	0,85	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97	0,99	<b>0,956</b>
MBE	0,004	0,006	-0,030	0,014	0,044	-0,036	-0,030	-0,027	0,030	-0,015	0,006	0,024	-0,003	-0,023	-0,017	0,019	-0,041	-0,021	0,029	<b>-0,003</b>
RMSE	0,34	0,41	0,32	0,55	0,26	0,32	0,26	0,19	0,36	0,42	0,26	0,22	0,60	0,18	0,16	0,22	0,19	0,28	0,15	<b>0,300</b>
% desv. est.	77,4%	93,7%	73,7%	126,4%	59,1%	73,0%	60,2%	43,5%	81,6%	96,3%	59,1%	50,5%	136,4%	41,4%	37,4%	50,2%	43,5%	63,2%	34,7%	<b>68,5%</b>
Índice D (Willmot's)	0,96	0,94	0,97	0,87	0,98	0,97	0,98	0,99	0,96	0,93	0,98	0,99	0,83	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	<b>0,96</b>

valores calculados en la interpolación para las coordenadas correspondientes a los puntos de medición con el valor experimental. Este método denominado de validación cruzada se usa para calcular unos errores estadísticos indicativos de la bondad de la interpolación por Kriging Ordinario.

Los resultados obtenidos con estos estadísticos muestran en la mayoría de los casos un buen ajuste de la interpolación a los resultados originales (Tabla VI). Los coeficientes de determinación se encuentran entre 0,87 y 0,98 en 17 de los 19 casos, al igual que el índice D que supera el valor de 0,95 en casi todos los casos. El resto de estadísticos muestran también una buena estimación de datos por parte del método Kriging, por lo que se pueden dar por buenos los mapas así obtenidos.

### *Análisis subjetivo del estudio de campo*

Para poder establecer una clasificación con cierto rigor y consistencia hemos extraído las principales características de cada día de observación que, a priori, pueden influir en la forma e intensidad del fenómeno de isla de calor urbana y que además nos permitirá comprobar el nivel de acierto en cuanto a las hipótesis de partida.

Los parámetros recogidos de las observaciones se resumen en la tabla VII y son la intensidad de isla de calor,  $\Delta T_{u-r}$ , obtenida a partir de la temperatura máxima y mínima, sin normalizar, la dirección del viento y la racha máxima, el descenso de la temperatura ambiental durante el proceso de medición, la situación sinóptica y el día de la semana de cada observación.

Lo más característico que se desprende del resumen es la clara correlación entre la intensidad de la isla de calor y la racha máxima de viento observada durante la medición. Cuando el viento no supera el umbral de 10 km/h<sup>-1</sup> la intensidad de la anomalía térmica en el casco urbano supera en todos los casos los 3 °C (celdas sombreadas). Por otra parte, no se observa una clara influencia sinóptica en el fenómeno, ya que los días de mayor intensidad en la anomalía la situación era de bajas presiones y con flujo moderado en altura. Este hecho puede explicarse si tenemos en cuenta que Monzón se encuentra en una situación geográfica en la que el efecto dipolo producido por las situaciones de flujo perpendicular al Pirineo modifican sustancialmente las condiciones meteorológicas locales de esta zona (VILA-

CLARA, 2003). En particular, durante las situaciones de norte, es raro que sople viento de NW moderado durante más de un día seguido, aunque la situación sinóptica perdure durante varios días, en esta zona se producen calmas o vientos flojos de dirección distinta a la sinóptica (Fig. 12).

**Tabla VII.** Resumen de los 19 días de observación.

		$\Delta T_{u-r}$	Situación sinóptica	Viento		Cambio de temp. ambiental, en punto fijo (°C)
				Dir.	Racha máx. (km/h)	
L	04-04-05	<b>2,1</b>	Dorsal débil	SE	15	-0,5
X	06-04-05	<b>2,5</b>	Anticiclón	SE	18	-0,5
L	11-04-05	<b>3,9</b>	Borrasca en Córcega	VAR	8	-2,2
X	13-04-05	<b>2,5</b>	Baja relativa	S	12	-0,5
V	15-04-05	<b>1,8</b>	Paso de frente frío	NW	40	-0,7
D	17-04-05	<b>2,1</b>	Borrasca en el golfo de Génova	WNW	20	-0,2
L	18-04-05	<b>2,3</b>	Situación prefrontal	WNW	16	-1,0
M	19-04-05	<b>2,4</b>	Bajas presiones	WNW	14	-0,5
L	25-04-05	<b>7,2</b>	Paso de frente frío	WNW	2	-3,0
J	26-04-07	<b>5,5</b>	Baja relativa en la P. Ibérica	SE	9	-1,0
D	29-04-07	<b>3,1</b>	Baja relativa en la P. Ibérica	SE	6	-0,3
V	04-05-07	<b>3,5</b>	Borrasca en el golfo de Génova	SE	7	-1,6
S	05-05-07	<b>5,8</b>	Borrasca en el golfo de Génova	NW	4	-2,2
L	14-05-07	<b>2,3</b>	Borrasca en el golfo de Génova	WNW	20	-0,7
M	15-05-07	<b>2,4</b>	Anticiclón	WNW	11	-1,0
X	30-05-07	<b>3,3</b>	Baja relativa en NE	NW	4	-0,6
J	31-05-07	<b>2,5</b>	Cuña anticiclónica	NW	20	-1,2
D	03-06-07	<b>4,1</b>	Baja relativa en NE	SW-NW	6	-2,4
L	11-06-07	<b>5,8</b>	Cuña anticiclónica	SW-W	4	-1,5
	<b>Media</b>	<b>3,4</b>				
	<b>Máxima</b>	<b>7,2</b>				
	<b>Mínima</b>	<b>1,8</b>				

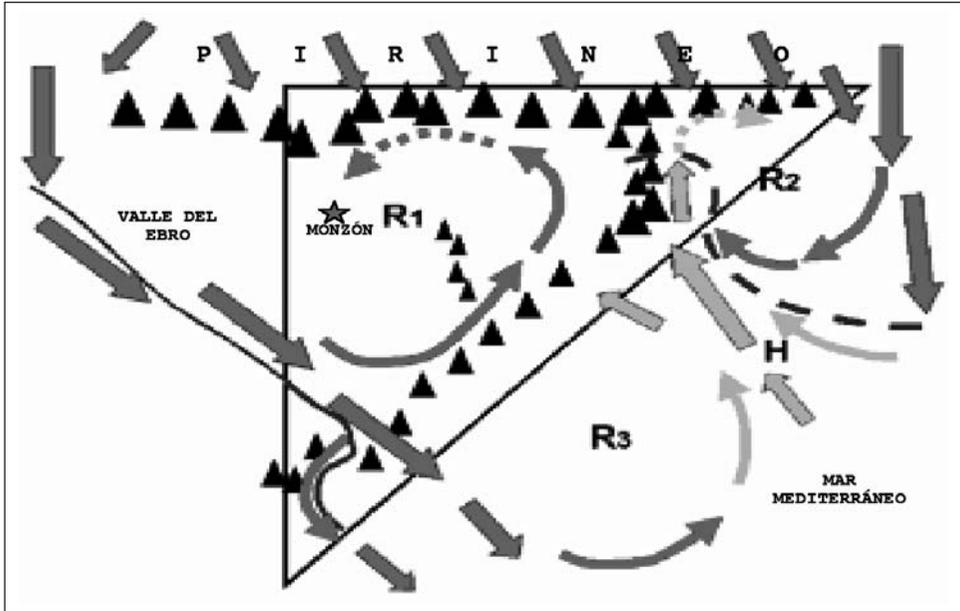


Fig. 12. Modelo conceptual de viento en superficie bajo una situación de norte sobre el noreste peninsular (VILA CLARA, 2003).

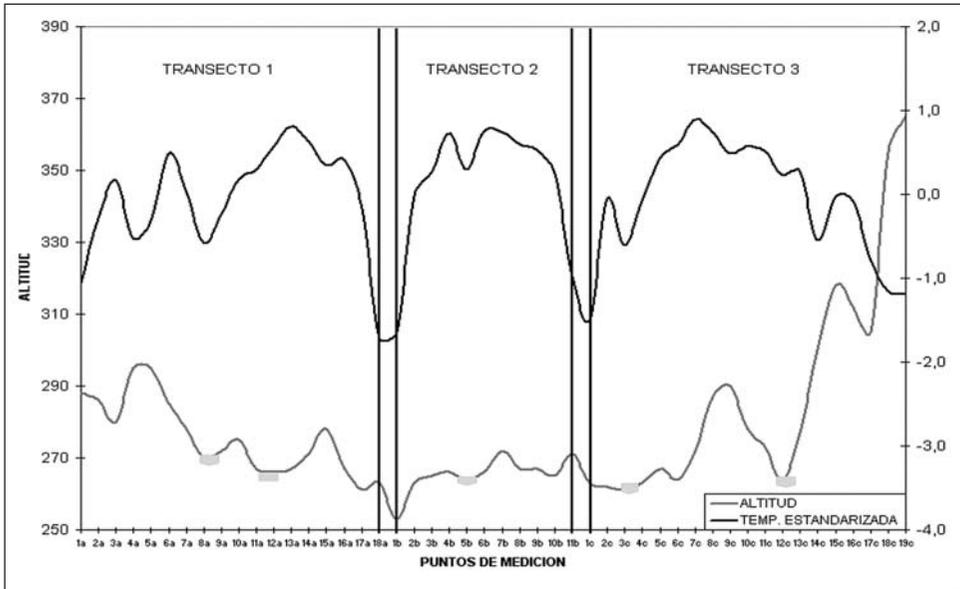


Fig. 13. Perfil promedio de temperatura estandarizada comparado con el perfil orográfico de los tres transectos.

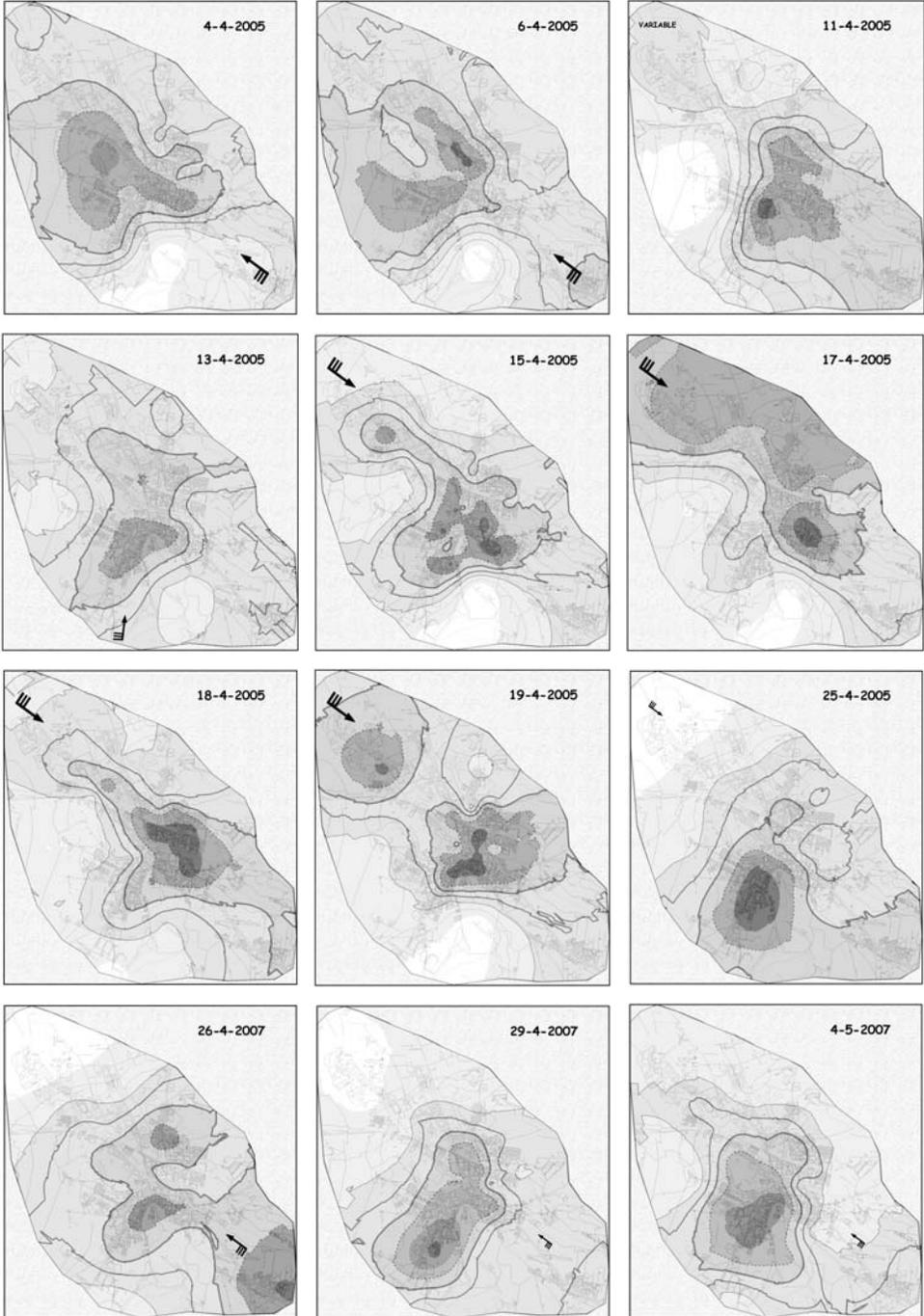
En cuanto al análisis espacial del fenómeno, en primer lugar relacionamos su intensidad con la altitud y lugares que atraviesan durante el recorrido. El perfil promedio de temperaturas estandarizadas junto con el perfil orográfico de la figura 13 indican claramente anomalías térmicas positivas en todos los puntos del recorrido de menor altitud y que están urbanizados, y anomalías negativas o vaguadas en las zonas periféricas de comienzo y fin de transecto, en las zonas cercanas a ríos y en zonas elevadas poco o nada urbanizadas.

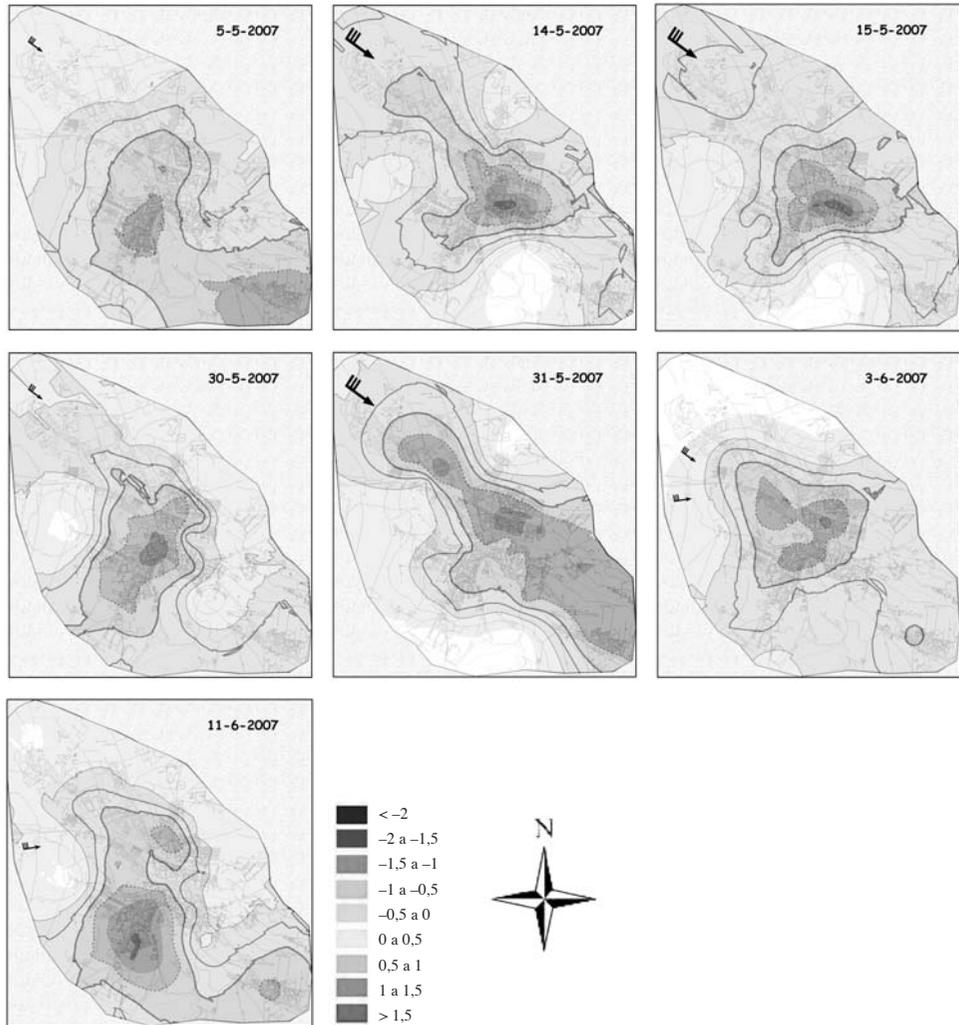
La distribución espacial de los datos de cada día de observación representada sobre el plano de Monzón mediante un SIG nos depara una gran variedad de estructuras de isla de calor, función de los múltiples parámetros que influyen en su formación y mantenimiento, sin embargo, asumiendo que estos exceden de los que podemos analizar en el presente estudio, podemos agrupar subjetivamente una cierta cantidad de mapas con estructuras de isla de calor similares y asociarlas a determinadas características meteorológicas, como ya hemos hecho anteriormente con los datos numéricos.

En los planos de la figura 14 se presenta la información continua de temperatura estandarizada, resultado de la interpolación hecha para cada día. Los 19 gráficos mostrados llevan asociada una flecha que indica la dirección del viento o vientos dominantes y en el tamaño va implícita la magnitud de la racha máxima obtenida en el transcurso de la observación.

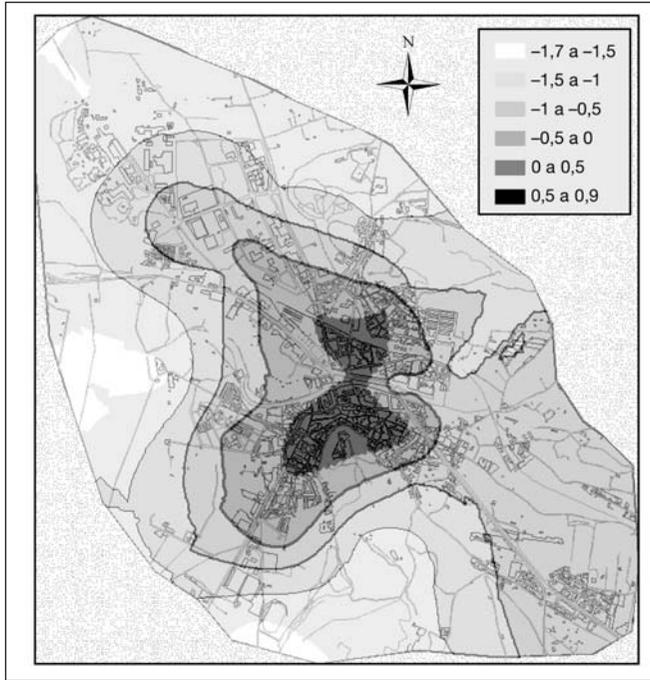
En un análisis cualitativo de los mapas, destacan, cuando menos, dos hechos fundamentales: *a)* la forma de la anomalía térmica cálida se alarga en dirección del viento principal, si este es de cierta magnitud, tanto si es de WNW-NW como si es de SE; *b)* en situaciones de calma o viento muy flojo la forma de dicha anomalía es aproximadamente concéntrica en torno a uno o varios núcleos y en la mayoría de los casos se alarga hacia el SE, acoplándose con la inversión térmica que se produce en dicha zona situada a mayor altitud.

Por último, el mapa promedio de la figura 15 refleja en cierta medida todas las características que hemos ido comentando hasta ahora. Por un lado, la totalidad del casco urbano con una fuerte anomalía positiva ligeramente binuclear producto de la vaguada fresca que produce en sus extremos





**Fig. 14.** Distribución espacial de la isla de calor para los 19 días de observación. Las diferentes líneas representan la temperatura estandarizada; la flecha negra, el viento durante la observación, de un tamaño proporcional a la racha máxima observada.



**Fig. 15.** Mapa promedio de la distribución espacial de temperaturas estandarizadas.

el paso del río Sosa y con el máximo absoluto en el núcleo correspondiente al casco antiguo. Un ligero alargamiento de la forma hacia el SE, y otro de mayor intensidad hacia el NW, motivada por el viento SE predominante en muchas ocasiones, pero en mayor medida por la influencia del calor generado por las industrias del NW del polígono bajo el flujo de poniente. El alargamiento hacia el SE alcanza la zona del barrio de la Carrasca, situado a mayor altitud, 310 m, y sometido por este motivo a continuas inversiones térmicas.

### *Contraste de hipótesis*

A la vista del análisis hecho podemos concluir revisando las hipótesis de partida:

- En todas las observaciones se apreció el fenómeno de isla de calor en el casco urbano. Las mayores intensidades en el fenómeno y los

mayores gradientes térmicos entre el entorno urbano y rural se obtienen asociados a fuerte irradiación con inversiones térmicas, típicas del clima continental.

- La intensidad media de la “isla de calor” es de 3,4 °C, algo menor que la predicha por Oke. La intensidad máxima alcanza los 7,2 °C, y en todas las observaciones el fenómeno se produce con una intensidad mayor a 1,8 °C.
- En todas las observaciones hubo que corregir los datos por el efecto de descenso térmico nocturno.
- Se aprecia mayor intensidad en el fenómeno con viento muy flojo o en calma. En particular, para rachas de viento de más de 10 km/h<sup>-1</sup> el fenómeno disminuye en intensidad, aunque no desaparece, ni siquiera los días de viento moderado.
- La situación sinóptica no es determinante a la hora de establecer relación con la forma e intensidad de la isla de calor.
- La configuración en los días de viento marcado efectivamente se alarga en la dirección del viento dominante.
- El patrón de configuración medio se muestra binuclear y concéntrico con dos máximos, uno al NE sobre el barrio del Palomar y otro al SE del casco antiguo. Reseñable también el máximo relativo en el centro del polígono industrial.
- En las zonas más elevadas se aprecia la influencia de frecuentes inversiones térmicas. En el barrio de la Carrasca al SE (300 m) se constata con un máximo relativo y en el campo de tiro, con un mínimo relativo, poco marcado para una altitud de 350 m.
- No se aprecia relación entre el día de la semana y la intensidad de la isla de calor. De los tres domingos analizados no se puede extraer influencia alguna con el menor tráfico rodado y menor actividad en general.
- Los perfiles medios de los transectos muestran numerosos altibajos debido a la sinuosidad de su recorrido.

## ESTIMACIÓN OBJETIVA DE LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA

### *Metodología*

Una vez obtenida la distribución de la isla de calor en forma de base de datos continua para los 19 casos, el planteamiento fue reducir el número de casos a un número mínimo de patrones temporales, independientes entre ellos, de forma objetiva, que aglutinaran la mayor parte de la información existente en el estudio. La solución estaba en la extracción por medio del análisis de componentes principales (ACP) en modo temporal T, de este modo, con unas pocas variables conseguimos explicar mucha de la varianza contenida en las variables temporales originales (HAIR et alii, 1998).

Los datos de origen introducidos en el sistema son, por un lado, las 19 variables para cada día de observación y los casos que corresponden a los 50 puntos de medición que reúnen los tres transectos, con su valor de temperatura normalizado, para que de este modo sean comparables entre sí. Para obtener el número de componentes principales (CP) adecuado se adoptó el criterio de autovalor  $> 1$  (HAIR et alii, 1998).

Después los CP se rotaron para así redistribuir la varianza explicada por el método de Varimax (KAISER, 1958), el cual se considera que produce estructuras más estables y robustas (WHITE et alii, 1991).

### *Resultados*

El número de componentes principales aconsejables según la condición de autovalor  $> 1$  fue de tres. La varianza explicada entre los tres fue del 75,1%, algo baja pero suficiente para sacar conclusiones, teniendo en cuenta además que si añadimos un cuarto componente tan solo ganamos un 4,5% de varianza explicada y generamos bastante incertidumbre en los resultados.

El reparto de porcentaje de varianza explicada por componentes es bastante equitativo, producto de la redistribución producida por la rotación. El CP 1 explica el 30,7%, y el CP 2 y CP 3 el 22,2% (Tabla VIII).

Como nexo de unión entre los CP y las variables iniciales, se obtiene también una matriz formada por tres columnas, una para cada componente

principal (EOF 1, EOF 2, EOF 3, *Empirical Orthogonal Function*), y en cada columna 19 coeficientes que correlacionan cada componente con cada una de las variables iniciales (Tabla IX). Es decir, nos da una idea del parecido entre la estructura de isla de calor de cada día de observación con el patrón obtenido de cada componente.

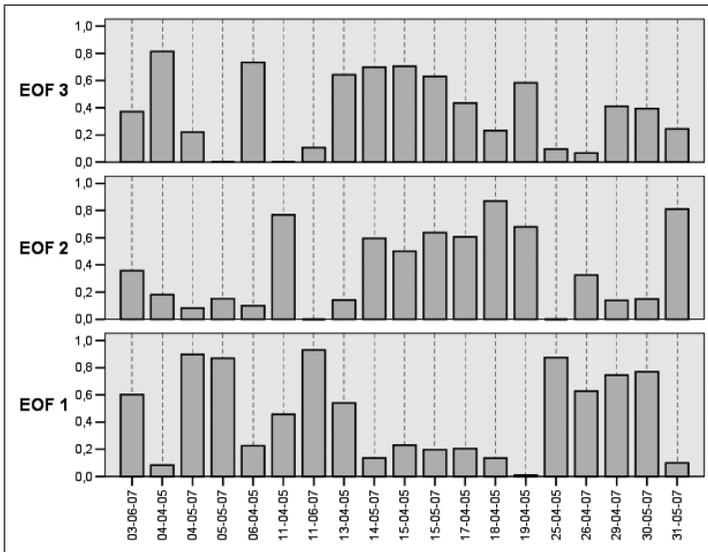
En la gráfica de la figura 16, se representan las EOF correspondientes a cada componente principal, con sus coeficientes en forma de barras. A grandes rasgos, se observa, por un lado, cierto parecido entre la EOF 2 y la EOF 3, donde muchas de las correlaciones significativas tienen el mismo origen, sin embargo, la EOF 1 es casi complementaria a las otras dos, validando en una primera aproximación el haber excluido un cuarto componente principal.

**Tabla VIII.** Varianza explicada por los componentes principales.

Componente	Autovalores iniciales			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	8,988	47,307	47,307	5,835	30,712	30,712
2	3,794	19,968	67,275	4,219	22,204	52,916
3	1,483	7,806	75,080	4,211	22,165	75,080
4	,860	4,525	79,605			
5	,815	4,287	83,892			
6	,589	3,099	86,992			
7	,541	2,849	89,841			
8	,424	2,234	92,074			
9	,316	1,662	93,736			
10	,281	1,481	95,217			
11	,209	1,101	96,319			
12	,174	,916	97,234			
13	,117	,613	97,848			
14	,110	,580	98,428			
15	,100	,527	98,955			
16	,072	,377	99,332			
17	,060	,318	99,650			
18	,045	,238	99,888			
19	,021	,112	100,000			

**Tabla IX.** Matriz de correlaciones (EOF: *Empirical Orthogonal Function*).

	<i>Componente</i>		
	<i>EOF 1</i>	<i>EOF 2</i>	<i>EOF 3</i>
VAR00001	,083	,181	,814
VAR00002	,225	,101	,734
VAR00003	,457	,769	-,116
VAR00004	,540	,142	,643
VAR00005	,231	,501	,705
VAR00006	-,205	,606	,435
VAR00007	,134	,870	,232
VAR00008	,011	,679	,583
VAR00009	,875	-,064	,097
VAR00010	,628	,324	,066
VAR00011	,745	,138	,412
VAR00012	,897	,082	,219
VAR00013	,869	,152	-,149
VAR00014	,136	,595	,698
VAR00015	,198	,637	,631
VAR00016	,770	,149	,394
VAR00017	,099	,811	,244
VAR00018	,603	,358	,371
VAR00019	,930	-,064	,107



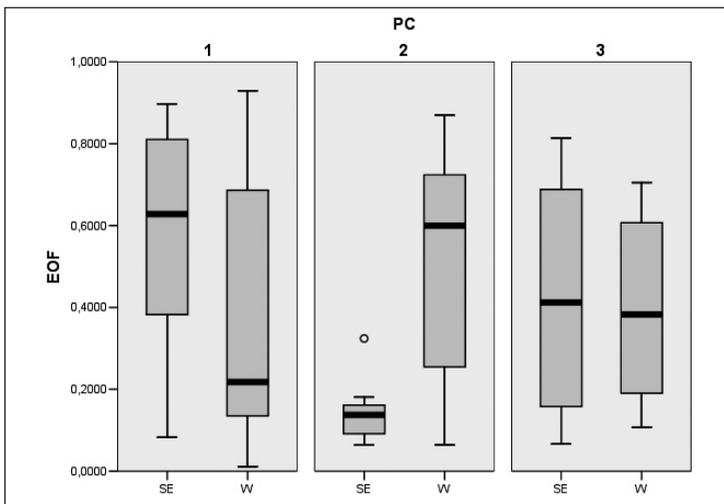
**Fig. 16.** Diagrama de barras con los coeficientes de correlación de las EOF.

Un estudio en profundidad de las EOF obtenidas a partir de los componentes principales, nos va a proporcionar mucha información acerca de la interdependencia de factores meteorológicos en la forma y estructura de la isla de calor en Monzón.

Los factores que se analizaron fueron la dirección del viento durante las horas previas y durante la misma observación, la velocidad de la racha máxima sostenida del viento durante la medición y el estado cualitativo del cielo.

### *Influencia de la dirección del viento sobre la variabilidad de la isla de calor*

Mediante la representación de las EOF por medio de un diagrama de cajas podemos agrupar las cargas factoriales de cada mapa diario de medición según diversos factores de influencia. En un primer estudio analizamos el factor dirección de viento dominante a lo largo del día de medición. Originalmente, el abanico de direcciones de viento era bastante amplio, pero siempre dentro del 2º, 3º y 4º cuadrante, que tras diversos análisis se convirtió en una reducción a dos categorías: una que reúne todas las direcciones correspondientes al 2º cuadrante (SE), que abarcan seis días, y la



**Fig. 17.** Diagrama de cajas que representa las cargas factoriales de cada componente principal, agrupados según las dos direcciones principales del viento: W (3º-4º cuadrante) y SE (2º cuadrante).

otra, las correspondientes a los vientos de poniente (3<sup>er</sup> y 4<sup>o</sup> cuadrante, W), que hacen un total de trece días. Con esta disposición, la interpretación de los datos mejoraba sustancialmente (Fig. 17).

El patrón correspondiente al PC 1 explicaría una isla de calor modelo para los días con viento de levante (SE), ya que, sin ser excluyente correlaciona bastante mejor que los casos con viento de poniente. Con el PC 2 no hay duda puesto que las dos categorías son excluyentes, representando un modelo de isla de calor para los días con viento de poniente. El tercer patrón incluye por igual a ambas categorías, luego cabe suponer que representa un patrón base de isla de calor para todos los días.

Como el análisis subjetivo anterior se hace en función de la mediana y de percentiles, vamos a realizar un estudio comparativo de medias para ver si las diferencias entre los agrupamientos son significativas. El método utilizado es el combinado formado por la prueba de Levene y el t-test (VICENTE et álui, 2005).

**Tabla X.** Media, desviación estándar y error típico para cada agrupación (superior). Resultado de la prueba de Levene y el t-test para el factor dirección del viento (inferior).

<i>Estadísticos de grupo</i>					
	Viento	N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
EOF 1	W	13	0,424455	0,3402506	0,0943686
	SE	6	0,519738	0,3108452	0,1269020
EOF 2	W	13	0,471213	0,3068686	0,0851100
	SE	6	0,161373	0,0868816	0,0354693
EOF 3	W	13	0,346036	0,2554677	0,0708540
	SE	6	0,481232	0,2987181	0,1219512

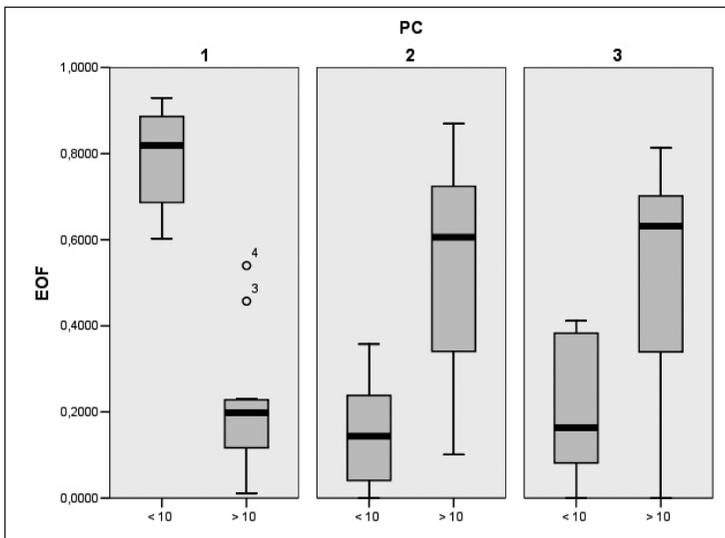
<i>Prueba de muestras independientes</i>						
	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias			
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilat.)	
EOF 1	0,679	0,421	-0,582	17	0,568	Se han asumido varianzas iguales
EOF 2	10,795	0,004	3,360	15,414	0,004	No se han asumido varianzas iguales
EOF 3	0,315	0,582	-1,019	17	0,323	Se han asumido varianzas iguales

En la tabla X podemos observar que las medias de las agrupaciones no son tan diferentes a como se esperaba observando las medianas de las cajas. Tan solo el componente o patrón 2 muestra una clara discriminación con un resultado significativo (sombreado) para la diferencia de las medias, por lo que se puede concluir que dicho patrón explica la estructura de isla de calor bajo flujo de viento de poniente (W). Los otros dos patrones parecen influenciados en mayor medida por el flujo de levante (SE), aunque los estadísticos obtenidos no son significativos.

A la vista de estos resultados necesitamos buscar más causas que justifiquen la estructura de los patrones obtenidos. En el siguiente punto se analiza la influencia de la velocidad del viento.

#### *Influencia de la velocidad máxima del viento sobre la variabilidad de la isla de calor*

Dado que existe cierta ambigüedad en la interpretación del primer y tercer componente, se buscó otra influencia en la morfología de isla de calor. Observando el análisis del primer componente se puede apreciar que el caso mejor correlacionado se encuentra con viento de poniente, un viento



**Fig. 18.** Diagrama de cajas que representa las cargas factoriales de cada componente principal, agrupados según sea mayor o menor de 10 km/h la racha de viento máxima.

(cierzo en el valle del Ebro) que normalmente sopla de forma moderada y alguna vez como flujo débil. En el siguiente diagrama se buscó la influencia de la velocidad en la racha máxima continuada del viento durante la medición en la morfología de la isla de calor a través de sus CP.

En efecto, el patrón correspondiente al PC 1 es muy sensible a la racha máxima sostenida del viento durante la medición, ya que se observa una elevada correlación para aquellos días en los que la racha máxima no superó los 10 km/h. En los otros dos patrones, aun sin llegar a elevadas correlaciones, dominan los días con rachas superiores a 10 km/h (Fig. 18).

Los resultados obtenidos en el diagrama de cajas de la figura 18 se confirman a través de los estadísticos de la tabla XI, mostrando para los tres patrones diferencias significativas en las medias de las agrupaciones y estableciendo claras dependencias entre la velocidad máxima del viento y la estructura de la isla de calor definida por dichos patrones.

**Tabla XI.** Media, desviación estándar y error típico para cada agrupación (superior). Resultado de la prueba de Levene y t-test para el factor racha máxima de viento (inferior).

<i>Estadísticos de grupo</i>					
	Viento	N	Media	Desviación típica	Error típico de la media
EOF 1	< 10	8	0,789601	0,1243881	0,0439778
	> 10	11	0,210867	0,1581342	0,0476792
EOF 2	< 10	8	0,150406	0,1326486	0,0468983
	> 10	11	0,535523	0,2741835	0,0826694
EOF 3	< 10	8	0,208371	0,1642156	0,0580590
	> 10	11	0,519900	0,2580891	0,0778168

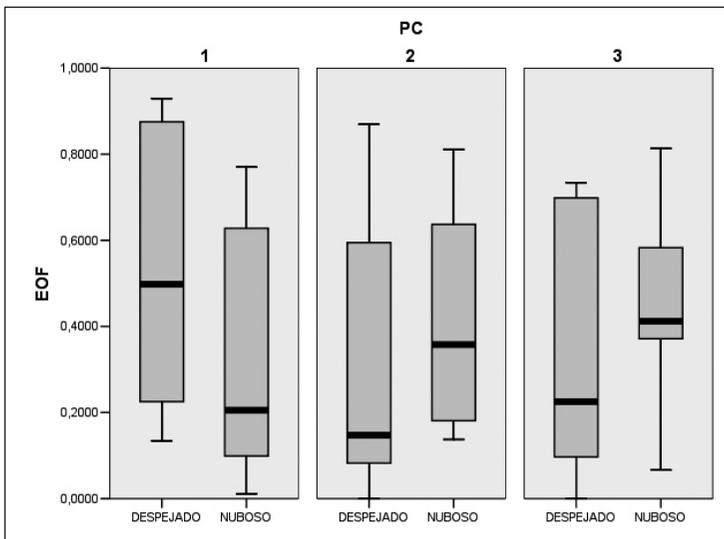
<i>Prueba de muestras independientes</i>						
	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias			
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilat.)	
EOF 1	0,035	0,855	8,578	17	0,000	Se han asumido varianzas iguales
EOF 2	4,731	0,044	-4,052	15,220	0,001	No se han asumido varianzas iguales
EOF 3	2,026	0,173	-2,990	17	0,008	Se han asumido varianzas iguales

Con estos dos análisis queda claramente establecida la relación unívoca entre la estructura de isla de calor representada por los tres CP y unas condiciones determinadas de viento en superficie.

La estructura que se obtiene de CP 1 quedaría asociada a los días con viento de levante, pero además a todos aquellos cuyas rachas de viento al anochecer no superen los 10 km/h. La CP 2 explicaría todos los días con viento de poniente, pero con rachas sostenidas de cierta entidad, y la CP 3 correlaciona bastante mejor con los días con viento que en calma.

### *Influencia del estado del cielo sobre la variabilidad de la isla de calor*

Por último, se sabe que existe una fuerte influencia de la nubosidad en la irradiación nocturna, y que el aumento de esta en días despejados puede producir diferencias importantes de temperatura entre el núcleo urbano y la periferia rural (BONAFÈ et alii, 2003), debido fundamentalmente a las distintas emisividades de los materiales. Por ello, hemos realizado también el estudio de cajas agrupando según la nubosidad en el momento de la medición. La discriminación es muy subjetiva y cualitativa, haciendo dos grupos según el cielo estuviera despejado o predominantemente nuboso.

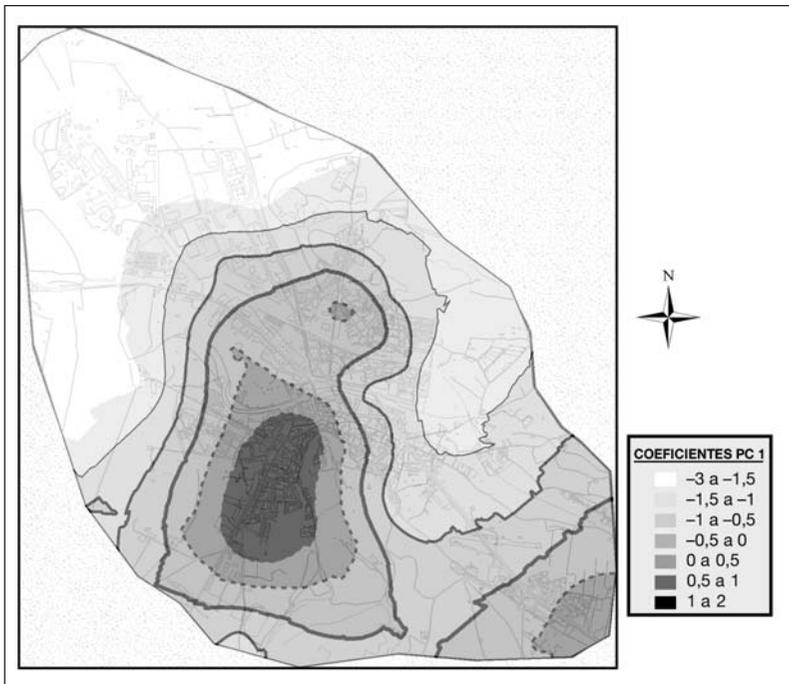


**Fig. 19.** Diagrama de cajas que representa las cargas factoriales de cada componente principal, agrupados según el estado del cielo.

Los resultados no son muy claros, existe mucho solapamiento en las tres CP (Fig. 19), aunque sí que se puede extraer alguna débil, pero razonable conclusión. En el primer grupo la mediana correspondiente a los días despejados, con una correlación de 0,5, es bastante mayor que la que corresponde a los día nublados. Esto estaría en consonancia con los resultados anteriores donde existe un día tipo con viento en calma o ligera brisa del SE y totalmente despejado. En las otras dos CP no se pueden extraer resultados concluyentes, lo que induce a pensar que el fenómeno de isla de calor en Monzón no se ve claramente influenciado por la nubosidad existente.

*Representación de la estructura espacial de la isla de calor a partir de los componentes principales*

Nuevamente a través de ArcGis, se han introducido los valores normalizados de los puntos de medida obtenidos para cada componente principal y mediante interpolación por Kriging Ordinario se ha representado la estructura de isla de calor correspondiente a dichos componentes.

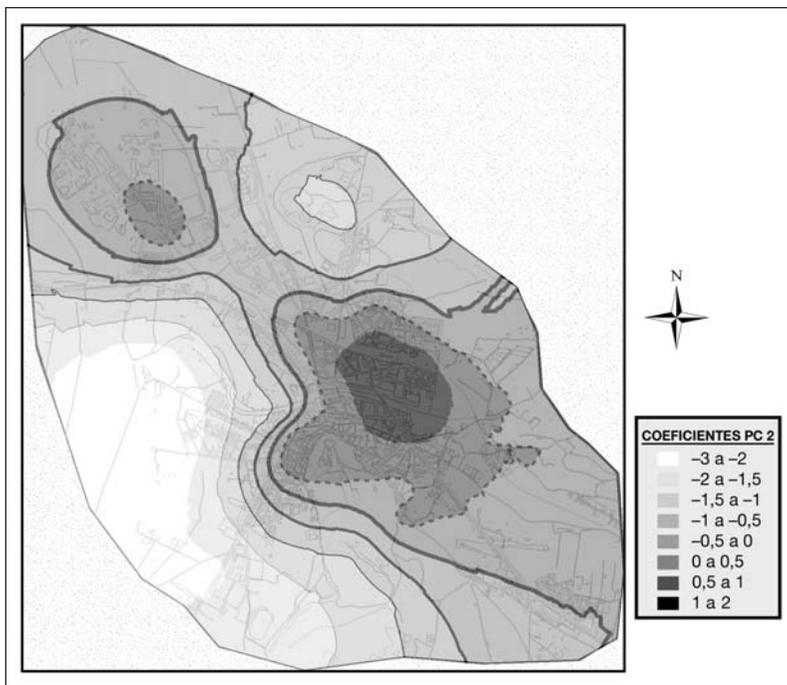


**Fig. 20.** Representación espacial del patrón de isla de calor explicado por la PC 1.

En el mapa de la figura 20 se representa el patrón de isla de calor correspondiente al primer componente principal. Lo más característico que se observa es el núcleo cálido al sur de la población, dentro del casco urbano, que se une al SE con otra zona cálida que corresponde con el barrio de la Carrasca, quedando en el medio el cerro del castillo, también con anomalía positiva de temperatura. Como estas dos últimas zonas se encuentran entre 300 y 350 m, más de 50 m por encima del casco urbano, estaríamos hablando de una inversión térmica unida al fenómeno de isla de calor urbano.

Si relacionamos ahora lo comentado del mapa con los diagramas de cajas construidos a partir de las cargas factoriales y discriminadas en función de la velocidad y de la dirección del viento, observamos que la casuística que se ajusta perfectamente a lo expuesto en el mapa es la de una noche con viento del SE muy débil, con rachas máximas por debajo de los 10 km/h.

La zona sureste del mapa se corresponde con una suave pendiente que baja hacia el casco urbano. En noches de mucha calma la brisa formada por

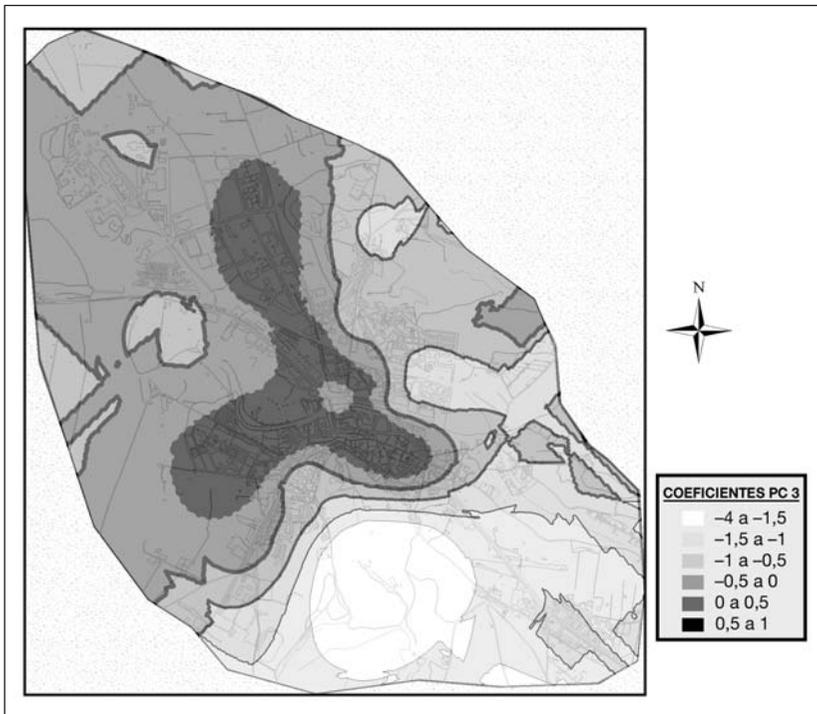


**Fig. 21.** Representación espacial del patrón de isla de calor explicado por la PC 2.

corrientes de drenaje facilitaría la formación de la inversión térmica. Si a eso unimos el encajonamiento que supone el cerro del castillo para facilitar su establecimiento y el efecto barrera que supone para la zona urbana sur que queda a sotavento del cerro, quedaría también explicado el que en esta zona se alcance la máxima intensidad de isla de calor.

El patrón de isla de calor correspondiente al segundo componente principal muestra cómo el centro de la anomalía cálida se desplaza hacia el E alargándose dicha anomalía hasta la zona sureste de la población (Fig. 21). Aparece también otro núcleo menos cálido en el centro del polígono de Las Paúles en la zona donde se ubica la fundición de ferroaleaciones. Al NE y SW, aparecen enseguida las anomalías frías, dejando una estructura de isla de calor claramente alineada con la dirección NW-SE.

Los diagramas de cajas corroboran lo que ya se intuye en el mapa, los días más correlacionados con este mapa soplaba viento cierzo del WNW moderado con rachas máximas por encima de los 10 km/h.



**Fig. 22.** Representación espacial del patrón de isla de calor explicado por la PC 3.

En este caso la figura 22 muestra el patrón de isla de calor correspondiente al tercer componente principal. La estructura de la isla de calor en este patrón presenta tres núcleos de anomalía cálida correspondientes al centro y sur urbano y al polígono industrial, y un núcleo frío muy marcado en el cerro del castillo y zona alta del SE del mapa. Aunque este contraste aparente gran intensidad del fenómeno explicado por el patrón, la leyenda advierte de su menor importancia en relación con la anomalía explicada en los otros dos patrones, del orden de la mitad.

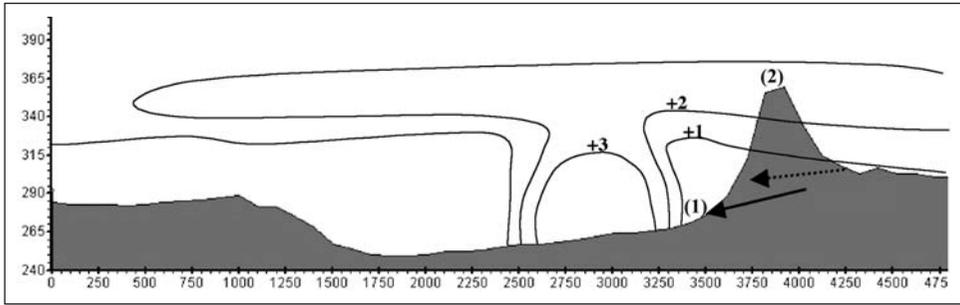
El análisis de cargas factoriales solo revela mayor correlación con los días de viento moderado, pero indistintamente para las dos direcciones de viento dominante, de ahí que la intensidad de la isla de calor sea baja y que no muestre direccionalidad en su estructura.

Se podría concluir diciendo que este sería un patrón base para muchos de los casos de isla de calor que se producen en Monzón, tal y como ocurre en Zaragoza (VICENTE et alii, 2005).

#### *Acoplamiento entre isla de calor urbana e inversión de zonas adyacentes*

El mapa obtenido a partir de la PC 1 revela que una de las situaciones típicas en las noches de Monzón es la asociada con una inversión térmica de baja cota que deja por encima de ella al cerro del castillo, que se eleva 90 m sobre el casco urbano. Si a eso unimos la intensidad moderada de isla de calor que existe en el casco urbano, prácticamente en cualquier situación meteorológica, podemos concluir que la configuración orográfica a un lado y a otro del cerro y la situación del casco urbano bajo este conforman un microclima característico local. La figura inferior presenta un esquema idealizado de lo que sería dicho acople; en él juegan un papel fundamental las corrientes de drenaje que descienden por las laderas hacia los ríos Sosa y Cinca. La estación que denominamos urbana, queda más bien en la zona periférica del casco urbano por lo que a medida que va transcurriendo la noche va quedando fuera de la isla de calor urbana, quedando reducida esta al centro de la población.

Para constatar este hecho hemos recurrido a los datos proporcionados por el sensor de temperatura que la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) tiene instalado en el repetidor de lo alto del cerro. Justo debajo de este queda la estación urbana.



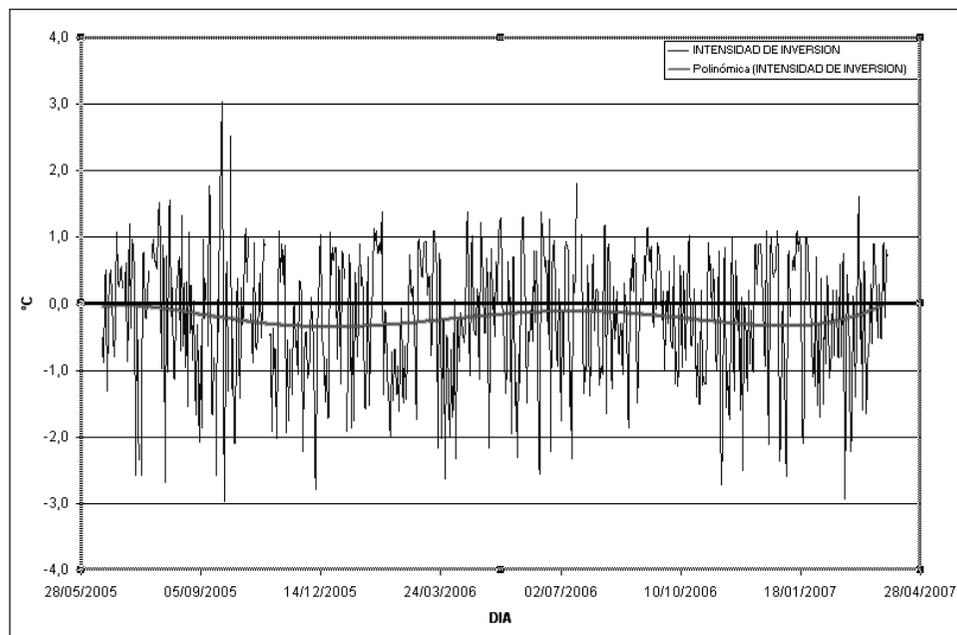
**Fig. 23.** Idealización del solapamiento de la isla de calor e inversión adyacente. Las líneas indican isotermas. Las flechas indican corrientes de drenaje hacia el centro desde el SE y hacia el SE desde el cerro. (1) estación urbana, (2) termómetro CHE.

Se realizó un estudio de las temperaturas mínimas observadas en los dos puntos de medición entre 2005 y 2007. De los 643 días contabilizados, en 345 ocasiones (53%) se registró una temperatura mínima mayor en lo alto del cerro, por 288 (45%) en las que fue superior en el casco urbano. La media de todas las diferencias de temperaturas mínimas queda en 0,2 °C mayor en la estación del cerro.

La tabla XII muestra cómo algunas de las inversiones llegan a ser moderadas (4,4°) teniendo en cuenta que la medición de altura se hace sobre superficie y que la estación inferior tiene características urbanas. Estudios hechos en Helsinki (KARPPINEN et alii, 2002) hablan de inversiones de baja cota muy frecuentes y con una intensidad de hasta 8 °C en 50 m.

**Tabla XII.** Valores máximos de inversión térmica registrados entre los dos puntos de medición y otros parámetros meteorológicos.

	<i>Intensidad de inversión (°C)</i>	<i>Racha máxima de viento (km/h)</i>	<i>Dirección del viento</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>
16/2/2007	-4,4	< 8	ENE	70-85
10/1/2007	-3,8	< 5	ENE	97-100
15/10/2005	-3,4	< 10	NNE	97
16/7/2005	-3,3	< 5	NNE	55
3/1/2006	-3,0	< 5	NNW	70-85



**Fig. 24.** Intensidad de la inversión térmica medida por diferencia entre las temperaturas del casco urbano y del cerro.

En todas ellas se observa como factor común la baja velocidad del viento cuyas rachas máximas no superaron el umbral de los 10 km/h durante ninguna de las noches, y la dirección de la brisa NE que corresponde a la composición de las corrientes de drenaje que descienden desde el N por el Cinca y el E desde el cerro.

La evolución estacional de la figura 24 muestra cómo la mayor frecuencia e intensidad de la inversión se produce en los periodos de invierno, cuando la velocidad del viento se reduce a sus valores mínimos bajo la influencia del anticiclón invernal sobre la Península Ibérica. Los valores de inversión llegan a alcanzar una intensidad moderada de hasta 2 y 3° diferenciales, fácilmente explicable si asumimos el acoplamiento comentado en el párrafo anterior y pensamos que la intensidad de isla de calor urbana alcanza esa e incluso mayor magnitud.

Los valores positivos quedan entre 1 y 1,5° grados diferenciales, acorde con la diferencia de altitud y cierta amplificación por el fenómeno de calor urbano.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son satisfactorios, mostrando que el pequeño tamaño de la población no impide la formación del fenómeno, en ocasiones con intensidad moderada, y que en ella juega un papel fundamental la orografía local y regional y otros parámetros meteorológicos. El estudio estadístico con la estación rural depara los siguientes resultados:

- La intensidad de isla de calor nocturna, medida con el valor de las temperaturas mínimas alcanza un valor promedio de entre 1 y 1,5 °C, llegándose a los máximos en primavera y otoño.
- El fenómeno se atenúa por el día hasta desaparecer. Incluso en verano se invierte formándose una “isla de frescor” de baja intensidad (0,4 °C).
- El 75% de los días se produce anomalía térmica nocturna en la ciudad y en el 50% esta anomalía tiene una intensidad mayor de 1,5 °C, siendo septiembre el mes con máximas intensidades con un 5% de días en los que se superan los 5 °C.
- La amplitud térmica diaria en el casco urbano se muestra en todo momento inferior al entorno rural con una diferencia máxima en verano de 2,5 °C y un mínimo de 0,5 °C en invierno.

El estudio de campo con transectos muestra resultados en el mismo sentido. A través de un análisis subjetivo inicial se obtuvieron los siguientes datos:

- En todas las observaciones se apreció el fenómeno de isla de calor en el casco urbano. Las mayores intensidades en el fenómeno y los mayores gradientes térmicos entre el entorno urbano y rural se obtienen asociados a fuerte irradiación con inversiones térmicas, típicas del clima continental.
- La intensidad media de la “isla de calor” es de 3,4 °C, algo menor que la predicha por Oke. La intensidad máxima alcanza los 7,2 °C, y en todas las observaciones el fenómeno se produce con una intensidad mayor a 1,8 °C.
- Se aprecia mayor intensidad en el fenómeno con viento muy flojo o en calma. En particular, para rachas de viento de más de 10 km/h<sup>-1</sup> el fenómeno disminuye en intensidad, aunque no desaparece, ni

siquiera los días de viento moderado. Además, su configuración en dichos días se alarga en la dirección del viento dominante.

- La situación sinóptica no es determinante a la hora de establecer relación con la forma e intensidad de la isla de calor.
- El patrón de configuración medio se muestra binuclear y concéntrico con dos máximos, uno al NE sobre el barrio del Palomar y otro al SE del casco antiguo. Reseñable también el máximo en el centro del polígono y el mínimo acusado en el campo de tiro.
- Un análisis objetivo posterior por medio de componentes principales permite corroborar alguna de las conclusiones anteriores. De los tres patrones principales de isla de calor generados, el primero quedó asociado a un flujo muy débil de levante, con un núcleo de anomalía térmica positiva en el centro-sur de la población y formación de inversión térmica al E. El patrón 2 queda claramente ligado a los días de cierzo moderado y una estructura del calentamiento urbano alargada en dirección WNW-ESE. El último patrón parece comprender ambos flujos, pero predominando aquellos por encima del umbral de 10 km/h en el flujo de viento, siendo su estructura trinuclear con máximos repartidos por el casco urbano y el polígono industrial. Por otra parte, parece demostrada la influencia de la atmósfera creada sobre el palio urbano por el efecto térmico y la formación de inversiones térmicas al E de la población.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDERSON, M. R. (1985). Season and mortality. *Healths Trends*, 17: 87-96.
- ALONSO, M. S.; FIDALGO, M. R., y LABAJO, J. L. (2004). El clima de las ciudades: isla de calor de Salamanca. *Rev. Salud Ambiental*, 4(1-2): 25-29.
- BONAFÈ, G.; DESERTI, M.; MINGUZZI, E.; TAGLIAZUCCA, M., y TRIVELLONE, G. (2003). The urban atmospheric boundary layer: experimental campaigns in Bologna (Italy). *The Fourth International Conference on Urban Air Quality Measurement, Modelling and Management*, 25-28 March 2003, Charles University Prague, Czech Republic, submitted to Atmospheric Environment.
- CAPEL MOLINA, J. J. (2000). *El clima de la Península Ibérica*. Ariel. Barcelona.
- CASTILLO CASTÁN, V. (2007). *El clima del Cinca Medio*. Comarca del Cinca Medio: 45-51. Colección Territorio, 26.

- CUADRAT, J. M.; VICENTE, S., y SAZ, M. A. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la AGE*, 40: 311-327.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F.; ALMENDROS COCA, M. A., y LÓPEZ GÓMEZ, A. (1996). La influencia del relieve en la isla de calor de Madrid: las vaguadas del Manzanares y el Albroñigal. *Estudios Geográficos*, 224: 473-494.
- FERNÁNDEZ, F.; MONTÁVEZ, J. P.; GONZÁLEZ, J., y VALERO, F. (2004). Relación entre la estructura espacial de la isla térmica y la morfología urbana de Madrid. Asociación Española de Climatología. Congreso (4. 2004. Santander).
- FIGUEROLA, P., & MAZZEO, N. (1998). Urban-rural temperature differences in Buenos Aires. *Int. J. Climatol.*, 18: 1709-1723.
- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L., y BLACK, W. (1998). *Multivariate data analysis*. Prentice Hall. Nueva York.
- KAISER, H. E. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psikometrika*, 23: 187-200.
- LANDSBERG, H. E. (1981). *The urban Climate*. Academic Press. Nueva York.
- LÓPEZ GÓMEZ, A., et alii (1993). *El clima de las ciudades españolas*. Cátedra. Madrid. 268 pp.
- LÓPEZ GÓMEZ, A., et alii (1998). *Temperaturas nocturnas y diurnas en Madrid a partir de teledetección aeroportada*. CSIC. Madrid. 83 pp.
- LÓPEZ GÓMEZ, A., y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1984). La isla de calor en Madrid: avance de un estudio de clima urbano. *Estudios Geográficos*, 174: 5-34.
- LÓPEZ GÓMEZ, A.; FERNÁNDEZ GARCÍA, F., y MORENO JIMÉNEZ, A. (1993). *Clima urbano: teledetección de la isla de calor en Madrid*. MOPT. Madrid. 157 pp.
- LOWRY, W. P. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *Journal of Applied Meteorological*, 36: 1377-1391.
- MONTÁVEZ, J. P.; RODRÍGUEZ, A. J., & JIMÉNEZ, J. I. (2000). A Study of the Urban Heat Island of Granada. *J. Climatol.*, 20: 899-911.
- MONTÁVEZ, J. P. (2002). *Variabilidad climática y cambio climático. Estudio teórico y modelización de la isla de calor*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- MORENO, M. C. (1993). *Estudio del clima urbano de Barcelona: la isla de calor*. Tesis doctoral, 1990. Barcelona. XI + 193 pp.
- MORENO, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *Int. Journal Climatol.*, 14: 705-710.
- MORENO, M. C. (1999). *Climatología urbana*. Edicions Universitat de Barcelona. Textos Docents, 160.
- MORRIS, C. J.; SIMMONDS, I., & PLUMMER, N. (2001). Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J. Appl. Meteorol.*, 40: 169-182.