

UN ESTUDIO DE LA ISLA DE CALOR MEDIANTE UN MODELO MESOESCALAR

Juan PEDRO MONTÁVEZ, Jesús Fidel GONZÁLEZ-ROUCO y Francisco VALERO

Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica II. Univ. Complutense de Madrid

RESUMEN

En este trabajo se estudia la dinámica de la Isla de Calor Urbana (ICU) por medio del modelo mesoescalar MM5. Los experimentos realizados han consistido en simular las perturbaciones que se producen en el dominio de integración del modelo al introducir una zona de características físicas urbanas en el interior de este. Los experimentos muestran que el modelo es capaz de simular convenientemente el fenómeno de la ICU. El resultados presentan que la perturbación de temperaturas debida al proceso de urbanización puede tener una expansión horizontal y vertical que afecta a zonas situadas a varios kilómetros a sotavento de la ciudad.

Palabras clave: clima urbano, isla de calor, modelos mesoescalares.

ABSTRACT

In this work the dynamics of the Urban Heat Island is studied by means of the mesoscale model MM5. The experiments simulate the perturbations produced in the model integration domain when introducing an area with urban properties of in the interior of the domain. The experiments show that the temperature perturbation induced by the urbanization process can have a horizontal and vertical expansion that affects areas located several kilometres downwind the city.

Keywords: urban climate, urban heat island, mesoscale model.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de Isla de Calor Urbana (ICU) consiste en la perturbación de temperaturas sufrida por una zona debido al proceso de urbanización (OKE, 1987). Generalmente y especialmente durante la noche y en situaciones de estabilidad con cielos despejados y baja velocidad de viento la ciudad es más caliente que sus alrededores (LANDSBERG, 1981).

Aunque el problema lleva estudiándose más de 160 años, el fenómeno de la ICU no ha sido todavía completamente entendido (HAFNER y KIDDER, 1999). El problema ha sido afrontado desde los puntos de vista experimental (LANDSBERG 1981, LÓPEZ *et al.* 1993, MONTÁVEZ 2000a) y teóricos (MONTÁVEZ 2000b).

Desde el punto de vista teórico se han usado distintos tipos de modelos, que según BORNS-TEIN (1982) se pueden dividir en dos grupos: los modelos de palio urbano (JOHNSON, 1991; MONTÁVEZ, 2000b; MASSON 2000) y los modelos de capa límite planetaria (VUKOVICH, 1980; SEAMAN, 1986). Cada uno de este tipo de modelos se puede clasificar también en dos tipos, dependiendo de si lo que se hace es una simulación por ordenador o un modelo a microescala del proceso (MONTÁVEZ, 2000b). En este trabajo se presenta la simulación del fenómeno de la

ICU a nivel de capa límite planetaria a partir de un modelo meteorológico mesoescalar (PIELKE, 1984).

El objetivo de este trabajo es en primer lugar evaluar la capacidad de este tipo de modelos para el estudio de los efectos de la ICU sobre el campo tridimensional de temperatura. En segundo lugar se pretende estudiar la dinámica de la ICU entendida como las diferencias entre simulaciones con y sin urbanización.

A continuación se describe el método experimental utilizado. Seguidamente se presentan los resultados y las conclusiones obtenidas.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Para la realización de los experimentos se ha usado la tercera versión de la quinta generación de NCAR/Penn State Mesoscale Model, MM5 (DUDHIA, 2001). Se ha utilizado la versión no hidrostática del modelo (DUDHIA, 1993) con capacidad de anidamiento múltiple. Se ha utilizado un triple anidamiento (ver figura 1). Para los dominios 1 y 2 se ha empleado un anidamiento bidireccional, y su integración ha servido básicamente para producir unas condiciones de contorno apropiadas para la integración del dominio 3, cuyo anidamiento ha sido unidireccional. La resolución espacial utilizada ha sido de 27, 9 y 2 km. para los dominios 1, 2 y 3, respectivamente. Se han empleado 26 niveles sigma desigualmente espaciados y con una densidad mayor en los niveles más bajos. Como parametrización de la capa límite se ha elegido la MRF (HONG y PAN, 1996). En el dominio 3 no se ha empleado parametrización alguna de cúmulos mientras en los restantes dominios se ha usado la de GRELL (1993). El esquema de humedad explícita ha sido el de Simple Ice (GRELL *et al.*, 1995). En cuanto al esquema de radiación se ha optado por un esquema que tiene en cuenta las interacciones de la radiación con las nubes y la masa de aire, y que proporciona los flujos de radiación en superficie (GRELL *et al.*, 1995). Para la temperatura del suelo se ha elegido el método Force-Restore (GRELL *et al.*, 1995).

Para los tres dominios se ha utilizado: cálculo de la radiación atmosférica cada 15 minutos; difusión de humedad vertical en nubes e interpolación lineal para la advección de temperatura vertical; para la difusión se ha usado también la perturbación de la temperatura; se ha tenido en cuenta la fuerza de Coriolis; se han empleado condiciones de contorno de relajación para los dominios 1 y 3 y dependientes del tiempo para el dominio 3; no se han tenido en cuenta efectos de la cubierta de nieve; se ha utilizado predicción de la temperatura del suelo; se han tenido en cuenta los efectos de la nubosidad sobre la radiación; y la humedad disponible del suelo ha sido tomada constante en el periodo de integración. Para la realización de los experimentos se han tomado tan solo tres tipos de suelo que hemos acordado llamar: rural, urbano y agua. Las características físicas de dichos tipos de suelo las podemos encontrar en la tabla 1.

Los experimentos realizados han consistido básicamente en: a partir de los datos de análisis del modelo AVN (Aviation Model) de NCEP (National Center for Environment Prediction) proporcionados con un intervalo de 6 horas se han realizado integraciones anidadas para los dominios 1 y 2 con salidas cada 15 minutos que han sido utilizados para imponer las condiciones de frontera al dominio 3. Para esta integración tan solo se han utilizado dos tipos de suelo, agua y rural (ver tabla

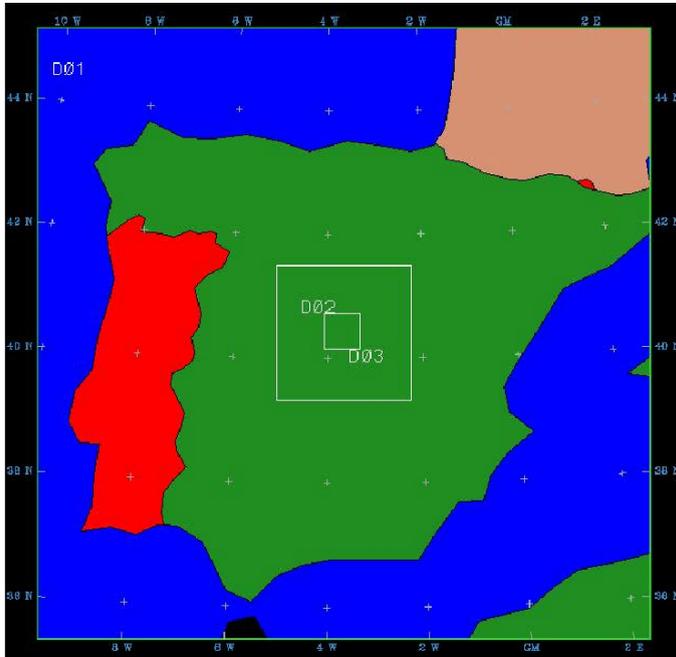


Figura 1: (Explicación en el texto).

1). Una vez obtenidas las condiciones de contorno, se han realizado dos integraciones que denominamos como rural y urbana (ciudad). En la rural tan solo se ha usado el tipo de suelo rural, y para la urbana se ha introducido en una parte del dominio (ver figura 2) un tipo de suelo urbano. El dominio 3 está centrado en el área de la comunidad de Madrid. Con esta metodología se pretende simular los efectos de urbanización por medio de la comparación de ambos experimentos.

Se eligieron las condiciones de contorno correspondientes a los días 4 y 5 de diciembre del 2001. Es una situación anticiclónica caracterizada por una fuerte inversión de temperaturas en altura. Se ha escogido esta situación porque corresponde a las situaciones tipo en las que la intensidad de la ICU suele ser más intensa.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados que se van a presentar ayudan a la comprensión de la dinámica de la ICU en una situación estable. Aunque se han estudiado las modificaciones que se producen sobre distintas variables meteorológicas debidas a la introducción de una ciudad en el dominio de integración, en este trabajo presentamos tan solo las perturbaciones que se originan en el campo de temperatura superficial y en el campo tridimensional de temperatura del aire.

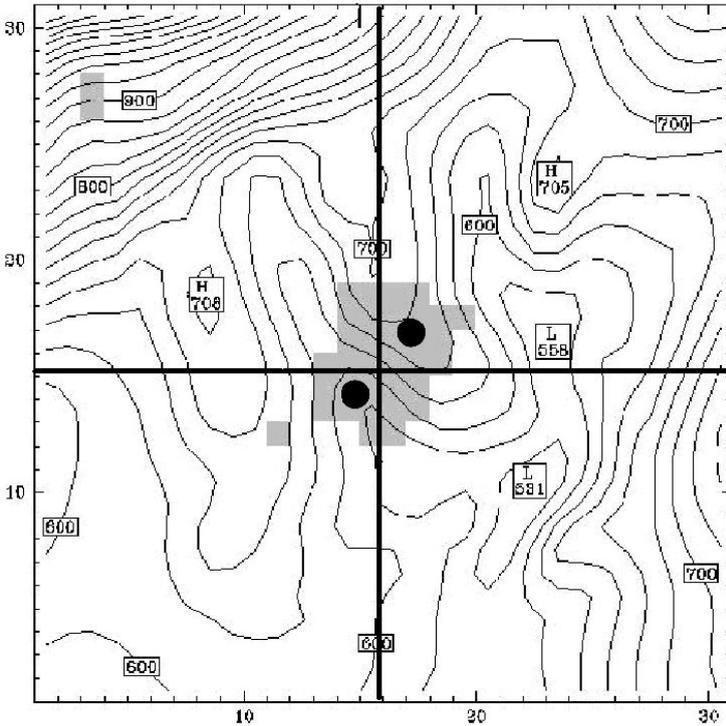


Figura 2: (Explicación en el texto).

En primer lugar se estudian las series de temperatura de aire (primer nivel) y superficie para algunos puntos de la ciudad de ambos experimentos. En segundo lugar se investigan las diferencias en la distribución espacial en varios instantes. Y por último se estudian las diferencias en la distribución vertical de temperaturas.

En la figura 3 se presentan los mapas de isoterma, de superficie y aire del nivel sigma más bajo, del experimento *ciudad* para las 06 y 16 horas, situaciones de mayor y menor intensidad de la ICU respectivamente. La zona que aparece con tonos grises demarca de forma aproximada los límites de la ciudad. Los resultados presentan que el modelo es capaz de simular el efecto de la ICU. El campo de temperatura nocturno revela que la ciudad aparece como la zona más caliente del dominio, apareciendo las típicas isoterma que rodean la ciudad. Sin embargo de la figura se extrae que en esta situación la distribución de temperatura es compleja, presentando una fuerte dependencia con la topografía, dándose las temperaturas menores en los valles y zonas llanas más bajas. La isla de calor en superficie parece seguir los límites de las zonas en las que se han introducido las características físicas del medio urbano presentando un gradiente muy fuerte en los límites, mientras que las temperaturas del aire presentan una extensión mayor que el perímetro

Tabla 1: Descripción de los tipos de suelo empleados en los experimentos.

Descripción suelo	Albedo (%)	Humedad Disp.	Emisividad	Rugosidad (cm)	In. térmica $\text{Cal cm}^{-2} \text{ k}^{-1} \text{ s}^{1/2}$
Urbano	12	0.05	0.88	200	5.0
Rural	16	0.15	0.93	15	2.0
Agua	8	1.0	0.98	0.01	6.0

de la ciudad. A primeras horas de la tarde esas diferencias prácticamente desaparecen, tanto en superficie como en el aire.

Aunque el patrón de temperaturas de la ICU parece estar claro, la duda que surge es como diferenciar los efectos topográficos de los urbanos. A priori parece ser que el máximo de intensidad de la ICU se encuentra en el centro de la ciudad, que es donde las temperaturas son mayores. Ese sería el resultado si se tomara como intensidad de la ICU la comparación de esas temperaturas con un punto del extrarradio, pero la pregunta que surge es si tal punto central es el que presenta la máxima perturbación de temperatura debida al efecto urbano. Gracias al diseño de los experimentos y tomando como la ICU la diferencia entre los casos rural y ciudad se puede encontrar la respuesta. En los siguientes apartados se realiza la comparación de ambos experimentos y se extraen una serie de conclusiones.

3.1. Evolución de temperaturas de superficie y del aire

En la figura 4 se presenta, para dos puntos de la ciudad, la evolución de temperaturas de superficie y del aire y sus diferencias para los experimentos rural y urbano. La posición de dichos puntos está indicada en la figura 2. Ha de notarse que de esta manera se está evaluando la perturbación verdadera que en cada punto ocasiona el colocar la ciudad. Los dos puntos están dentro de la ciudad, con la diferencia de que uno está situado más al sur que el anterior. Como se verá en el siguiente apartado, es en el sur de la ciudad donde, en este caso, se dan las mayores intensidades de la ICU. Los resultados más interesantes que se extraen son:

- A priori cabría esperar que la evolución de temperaturas en esos dos puntos, así como la de diferencias de temperatura de superficie y del aire fuera muy parecida, pero no es así. Como se puede observar en la figura 4, el punto situado más al sur presenta diferencias de temperatura del aire y superficie que alcanzan 4.5 grados y 8 respectivamente. Los máximos de las diferencias de temperatura se dan a últimas horas de la noche coincidiendo con las mínimas. En el punto situado más al noreste, pese a aparecer con temperaturas del mismo orden en la figura 3, las intensidades de la ICU son mucho menores, 5 grados en superficie y apenas 2.5 grados para temperaturas del aire.
- Durante las horas diurnas las diferencias en la temperatura de superficie se hacen muy pequeñas, llegándose a hacer incluso negativas en el punto más meridional, mientras que para las del aire ocurre un máximo relativo algo después del medio día. Parece ser que la princi-

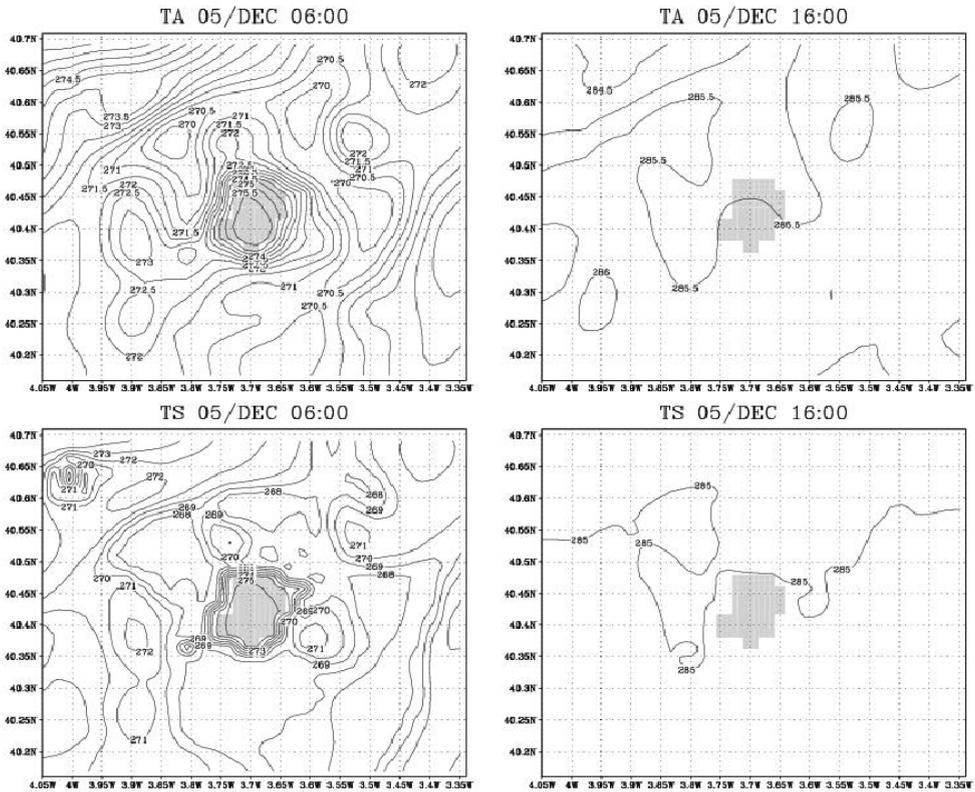


Figura 3: (Explicación en el texto).

pal razón que motiva este hecho es la diferencia de calor latente puesto en juego, debido a la diferencia de agua disponible.

- Un aspecto interesante de los resultados que se obtienen analizando estos dos puntos de la ciudad es que, dependiendo del punto que se elija, la hora a la que se da la máxima intensidad de la ICU es distinta. En un punto el máximo ocurre unas horas después de la puesta de sol, mientras que en el otro ocurre a últimas horas, coincidiendo con las mínimas. En la literatura no se encuentra un consenso en la hora a la que se da la máxima diferencia. Se concluye pues que dependerá, entre otros factores, de los puntos de comparación que se elijan.
- Se observa un retardo entre la posición de los máximos relativos de intensidad en aire y superficie después de la puesta de sol.

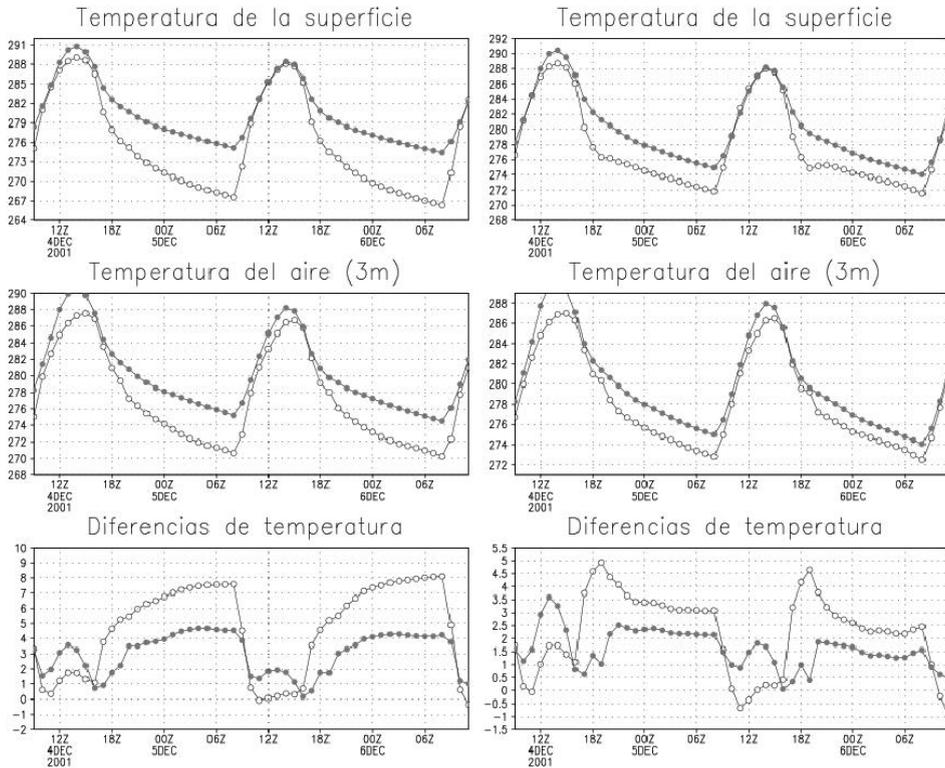


Figura 4: (Explicación en el texto).

- Las máximas diferencias encontradas para la intensidad de la ICU en temperaturas de la superficie coinciden de forma aproximada a las predichas por el modelo Monte Carlo (MONTÁVEZ, 2000b). Para ello se han comparado superficies planas con las propiedades físicas indicadas en la tabla 1.

3.2. Campos de temperatura superficiales

En este apartado se estudian los campos de diferencias de temperaturas tanto del aire como de superficie entre los experimentos ciudad y rural. De este modo se pretende evaluar el impacto espacial de la inclusión de la zona urbanizada en el dominio de integración. La figura 5 representa las diferencias de los campos de temperaturas del aire y de superficie derivados del experimento rural y urbano, para cuatro instantes del día. También se representan los campos de vientos originales para el experimento urbano y las diferencias de vientos de ambos experimentos. Los principales resultados que se obtienen son:

- Los puntos donde la modificación de la temperatura es máxima no coinciden con los que la temperatura es máxima (centro de la ciudad ver figura 3). Las máximas diferencias ocurren en las zonas más bajas de la ciudad, donde el enfriamiento antes de la urbanización es mayor. Dicho enfriamiento se evita por dos motivos: la rugosidad de la ciudad, y el efecto del cambio en las propiedades térmicas. Ésto sucede tanto para el campo de temperaturas de superficie como del aire.
- Aparece una expansión a sotavento de la perturbación de temperaturas. Puntos situados a varios kilómetros de la ciudad se ven afectados por la ICU. Este resultado es de gran importancia sobre todo a la hora de tomar la decisión de tomar una estación situada en las afueras de la ciudad como afectada o no por el proceso de urbanización.
- El tamaño de la ciudad juega un papel importante en la intensidad de la ICU. En las ciudades pequeñas introducidas en el dominio se observan fuertes intensidades de la ICU en superficie, mientras que en el aire son más pequeñas. Se ha de notar que aunque este resultado ha sido presentando en la literatura, la resolución del modelo debe de ser tomada en cuenta a la hora de interpretar estos resultados, debido a como se simula la advección del aire.
- Al igual que en el apartado anterior se observa que en general una ICU en superficie lleva asociada una ICU en aire, excepto para las horas centrales del día, en que aparece una pequeña ICU solo en las temperaturas del aire. Este hecho puede ser atribuible a las diferencias de calor latente puesto en juego.
- Se observa como en algunas zonas adyacentes a la ciudad, se dan temperaturas más bajas en el experimento *ciudad*. Este efecto puede ser debido al cambio de la dirección y módulo del viento que ocurre en estas zonas. Estas diferencias pueden ocasionar una modificación en la advección de calor sensible y por lo tanto perturbar la temperatura.

3.3. Secciones verticales de temperatura

En este apartado se estudian las diferencias temperaturas del aire en la vertical para 4 instantes del día (figura 6). Se representan dos secciones verticales, una longitudinal (S-N) y otra transversal (O-E), desde el nivel de superficie hasta el nivel sigma 0.98 que equivale a una altura aproximada de 110m sobre la altura del terreno. La posición de las secciones se indica en la figura 2. Los resultados que se pueden extraer son:

- La ICU tiene una expansión vertical que alcanza varias decenas de metros.
- Aparece un movimiento de la perturbación de temperaturas a sotavento de la ICU cuando está alcanza un desarrollo importante y el viento comienza a soplar. Este efecto está relacionado con el penacho de la ciudad.
- La estructura vertical de las diferencias de temperatura presenta un dipolo consistente en que las zonas a barlovento presentan incluso temperaturas más bajas mientras las situadas a sotavento presentan temperaturas más altas. Este hecho está relacionado con los movimientos forzados de ascensión del aire. El viento ve la ciudad como un obstáculo y esto provoca

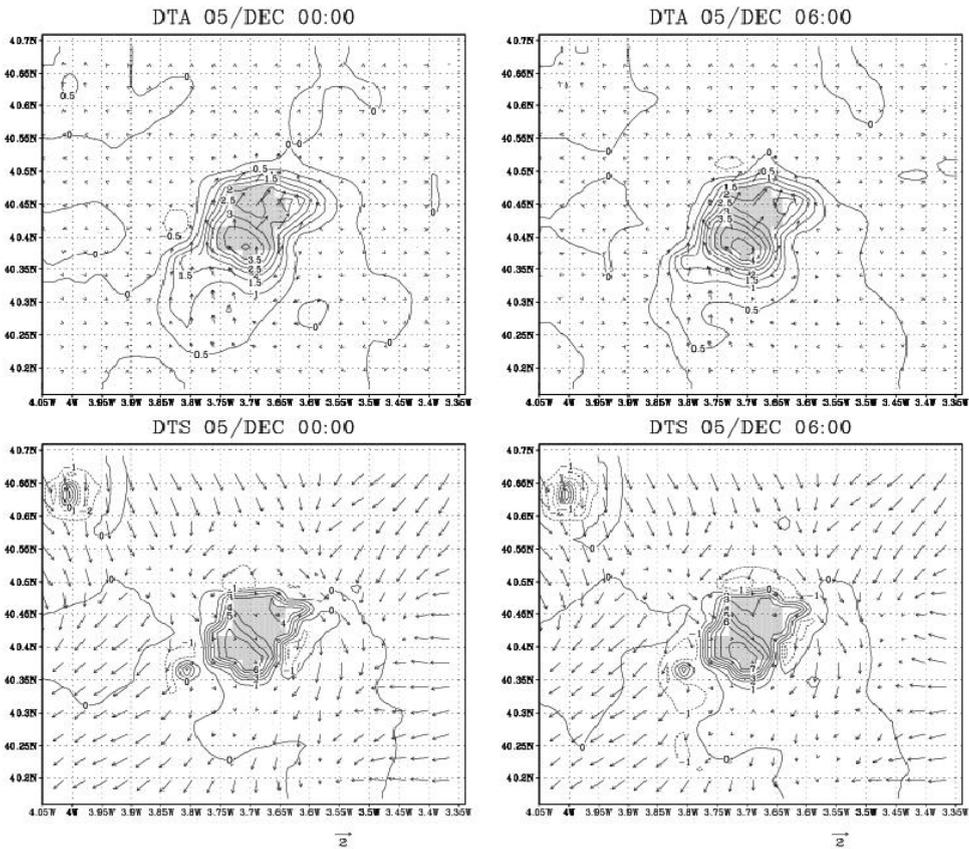


Figura 5: (Explicación en el texto).

una ascensión dinámica que lleva el aire de la superficie, más frío, a capas más altas. Por otro lado y debido al descenso de aire y a la mayor temperatura superficial se obtiene el calentamiento situado sobre y a sotavento de la ciudad.

- En el comienzo de la formación de la ICU (18 horas) la expansión vertical de la ICU es pequeña, pero presenta un fuerte dipolo en la vertical, apareciendo temperaturas superiores en las zonas más bajas e inferiores en las capas inmediatamente por encima de ellas.

4. REFERENCIAS

BORNSTEIN, R. (1982): Urban Climate Models, Nature Limitations and Applications. *Proc. Technical Conf. Mexico*, WMO. 672, pp 237-276.

- DUDHIA, J. (1993): A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.* 121, pp 1493-1513.
- DUDHIA, J., GUO, D. G.Y., MANNING, K., MICHALAKES, J., Y WANG, W. (2001): *PSU/NCAR Mesoscale Modeling System. Tutorial Class Notes and User's Guide. MM5 Modeling System Version 3*. Mesoscale and Microscale Meteorology division. National Center for Atmospheric Research, Boulder.
- GRELL, G. (1993): Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parametrizations. *Mon. Wea. Rev.* 121, pp 764-787.
- GRELL, G., DUDHIA, J., Y STAUFFER, D. (1995): *A Description of the Fifth- Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. Technical report, National Center for Atmospheric Research.
- HAFNER, J. Y KIDDER, S. (1999): Urban heat island modelling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. *J. Appl. Meteorol.* 38, pp 448-465.
- HONG, S. Y PAN, H. (1996): Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium range forecast model. *Mon. Wea. Rev.* 124, pp 2322-2339.
- JOHNSON, G.T., OKE, T.R., STEYN, D.G., WATSON, I.D., Y VOOGT, J.A. (1991): Simulation of Surface Urban Heat Island under Ideal Conditions at Night. Part 1, Theory and Tests against Field Data. *Boundary-Layer Meteorol.* 56, pp 275-294.
- LANDSBERG, H.E. (1981): *The Urban Climate*. New York: Academic Press. LÓPEZ, A., FERNÁNDEZ, F., ARROYO, F., MARTÍN-VIDE, J., Y CUADRAT, J. (1993): *El Clima de las Ciudades Españolas*. Madrid: Ed. Madrid.
- MASSON, V. (2000): A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteor.* 94, pp 357-397.
- MONTÁVEZ, J.P., RODRÍGUEZ, A.J., Y JIMÉNEZ, J.I. (2000a): A Study of the Urban Heat Island of Granada. I. *J. Climatol.* 20, pp 899-911.
- MONTÁVEZ, J., JIMÉNEZ, J., Y SARSA, A. (2000b): A Monte Carlo model of the nocturnal surface temperatures in urban canyons'. *Bound.-Layer Meteor.* 96, pp 433-452.
- OKE, T.R. (1987): *Boundary Layer Climates*. London and New York: Routledge.
- PIELKE, R.: 1984, *Mesoscale Meteorological Modeling*. Orlando: Academic Press.
- SEAMAN, N. (1989): Numerical studies of urban planetary boundary-layer structure under realistic synoptic conditions. *J. Appl. Meteorol.* 28, pp 760-781.
- VUKOVICH, F. Y KING, W. (1980): A Theoretical study of the St Louis Heat island. Comparisons between observed data and simulation results on the urban heat island circulation. *J. Appl. Meteorol.* 19, pp 761-770.

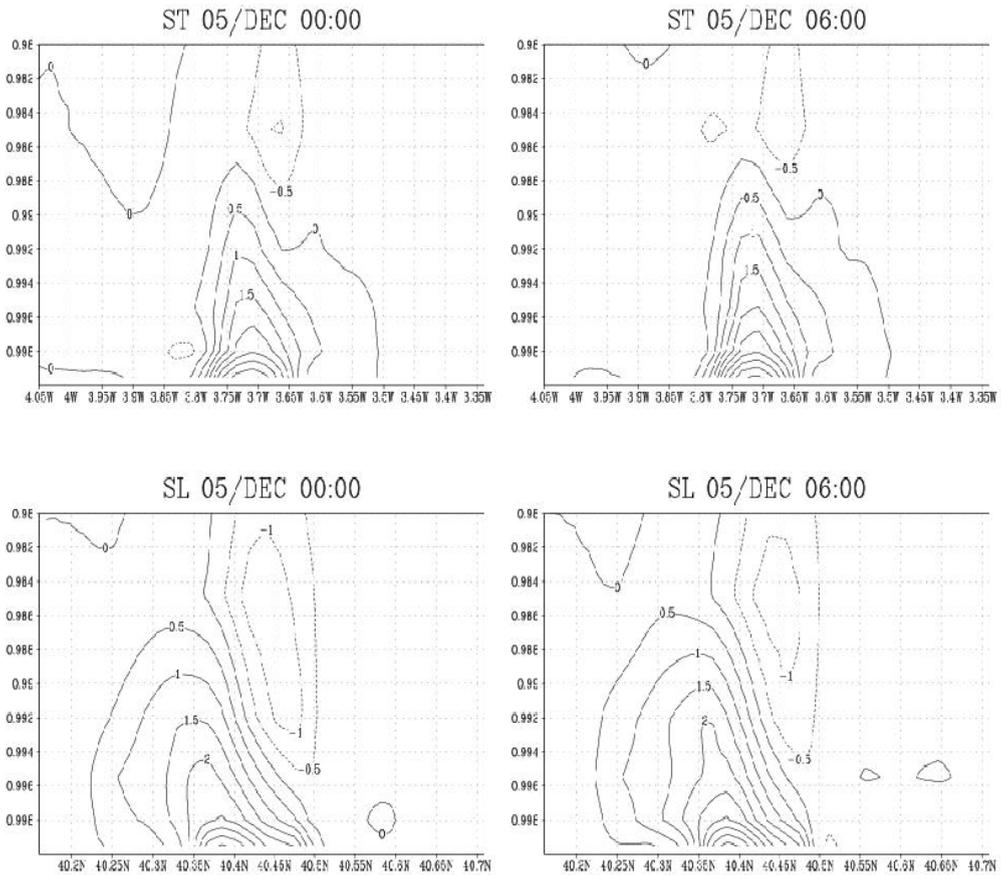


Figura 6a: (Explicación en el texto).

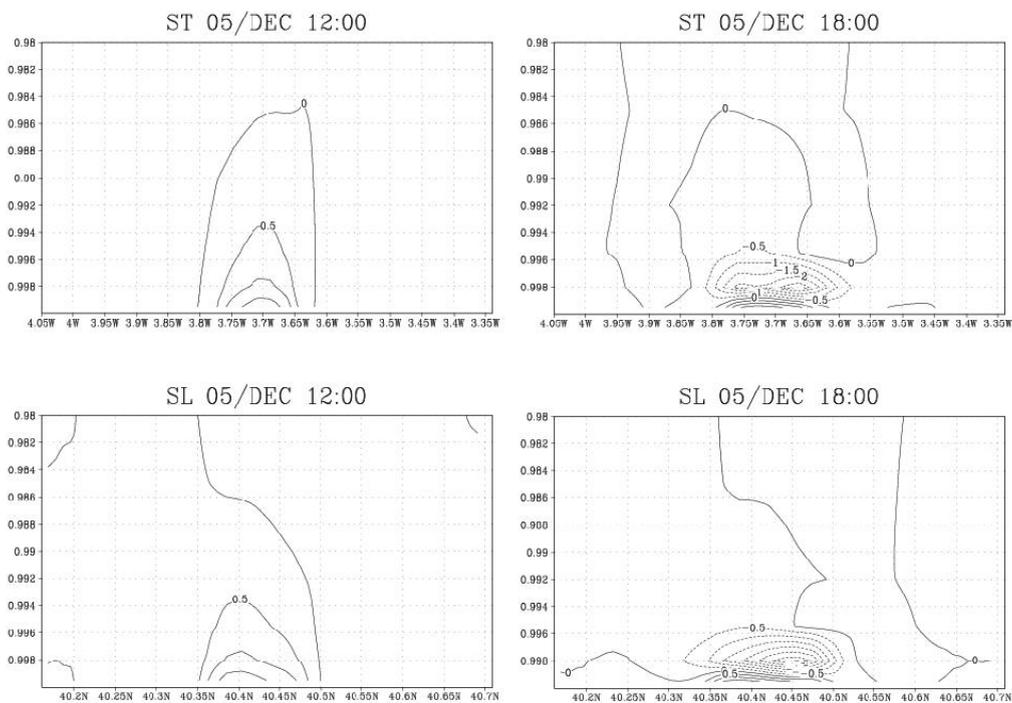


Figura 6b: (Explicación en el texto).