

# Modelización de los efectos urbanos en modelos meteorológicos

Alberto Martilli CIEMAT

## Introducción

Los edificios de una ciudad reducen la intensidad del viento, modifican su dirección, y producen remolinos de diferentes tamaños. La compleja estructura urbana refleja la radiación solar e infrarroja en diferentes direcciones y forma zonas de luz y sombra que, junto con la variedad de materiales urbanos y la emisión de calor antropogénico, afectan a los intercambios de calor con la atmósfera. Todos estos fenómenos tienen impacto en la estructura de la Urban Canopy Layer (UCL) [capa canopial urbana] de la atmósfera (capa atmosférica situada entre el suelo y el tope de los edificios). Se trata de una capa atmosférica de gran importancia ya que más de la mitad de la población mundial vive en ciudades, y se prevé que en los próximos 25 años este porcentaje subirá hasta 75%. Además, el número de grandes ciudades (megalópolis) con más de 10 millones de habitantes está también en aumento. En un futuro cercano más gente vivirá en ciudades, y en particular en ciudades muy grandes, con lo que el estudio de la atmósfera urbana tomará una importancia creciente.

Los procesos atmosféricos de la UCL afectan la vida de los ciudadanos en dos formas principales: la contaminación y la microclimatología.

La existencia de contaminación ha sido reconocida desde hace siglos. Por ejemplo, ya en el siglo XII Moses Maimónides, el gran filósofo y médico judío que nació en Córdoba en 1135, escribía: "En la ciudad a causa de la altura de sus edificios, lo angosto de sus calles, y de todo lo que se vierte desde sus habitantes y sus líquidos....el aire se torna estancado, turbio, espeso, brumoso y neblinoso....Si el aire se altera alguna vez ligeramente, el estado del espíritu psíquico será alterado perceptiblemente".

Los niveles de contaminantes en una ciudad son determinados por las emisiones, por la dispersión en el interior de la UCL y por los intercambios entre la UCL y la parte de la Urban Boundary Layer (UBL) [capa límite urbana] que está sobre la ciudad (véase Fig. 1). Las fuentes de las emisiones pueden ser variadas: tráfico automovilístico, industrias, calefacción doméstica, etc. En estos últimos años, ha habido un gran auge de los estudios de dispersión de contaminantes en áreas urbanas debido al interés por investigar el caso de una emisión imprevista de una gran cantidad de material tóxico causada por un accidente o un ataque terrorista.

La ausencia de vegetación, las características térmicas de los materiales utilizados en las construcciones, los fenómenos de "atrapamiento radiativo" en los cañones urbanos, y las emisiones de calor antropogénico son las principales causas del fenómeno llamado Urban Heat Island (UHI) [Isla de Calor Urbano]. La temperatura en las ciudades puede llegar a ser algunos grados más alta que en las zonas rurales cercanas. Al

igual que la contaminación, la temperatura en las ciudades está afectada por los fenómenos de dispersión del calor en la UCL y entre la UCL y la UBL. Es importante recordar que, en algunas condiciones climáticas, las temperaturas en las ciudades influyen sobre el uso de los sistemas de aire acondicionado. Estos aparatos, además de reforzar la UHI (porque aumentan el calor antropogénico emitido en la atmósfera), son muy costosos en términos de energía. Varios estudios han sido llevados a cabo en estos últimos años en Japón, Estados Unidos y Europa para designar y evaluar estrategias para mitigar las temperaturas en las ciudades con el objetivo de reducir el consumo de energía.

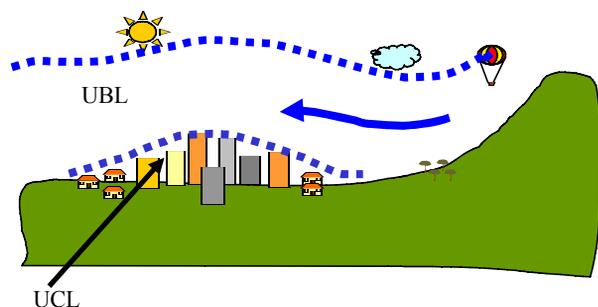


Figura 1. Representación esquemática de la CCU y CLU (UCL y UBL)

## ¿Cómo se investigan estos procesos?

Para investigar estos procesos es necesario considerar tanto los fenómenos en la UCL como en la UBL. La velocidad del viento y la temperatura en la UBL no dependen solamente de los fenómenos en la UCL, que está justo debajo, sino también de la advección desde zonas cercanas a la ciudad. La escala espacial relevante para estos estudios tiene que ser más grande que la ciudad, del orden de varias decenas, hasta pocas centenas de kilómetros. Los modelos numéricos utilizados son modelos de mesoscala. La estructura de estos modelos y las ecuaciones básicas resueltas son las mismas que las de los modelos utilizados para el pronóstico del tiempo.

Los modelos utilizados para el pronóstico del tiempo están pensados para simular sobre todo frentes, precipitaciones, nubes y eventos extremos. Las interacciones con la escala sinóptica son cruciales, y no se preocupan de simular en detalle los procesos de capa límite. Además, el tiempo de cálculo es un factor limitante, puesto que tienen que integrarse en tiempo real. Por otra parte, los modelos utilizados para los estudios de contaminación o de microclimatología mencionados arriba, están diseñados para simular condiciones de vien-

to débil y pocas nubes, ya que son las más críticas. Estos tipos de estudios, requieren una simulación detallada de los fenómenos en la UCL y la UBL. Además, las simulaciones se centran sobre todo en casos de estudio (se intenta reproducir un episodio pasado). Como el tiempo de cálculo no es un factor limitante, se pueden utilizar parametrizaciones o resoluciones detalladas.

### Parametrizaciones urbanas

La resolución horizontal de este segundo tipo de simulaciones puede variar desde varias centenas de metros hasta pocos kilómetros. Los efectos sobre las variables meteorológicas de los grupos de edificios presentes al interior de una celda computacional tienen que ser parametrizados.

Una solución podría ser adaptar las fórmulas derivadas para terrenos llanos y homogéneos basadas en la teoría de la semejanza de Monin-Obukhov (Monin-Obukhov Similarity Theory, MOST) a las ciudades, cambiando los valores de la rugosidad y la capacidad térmica del suelo. Comparaciones con medidas de varios estudios experimentales, han mostrado que esta aproximación es incapaz de reproducir las características más importantes de la estructura de la UCL. Las razones de este fracaso hay que buscarlas en que:

1°. Existe una capa llamada Subcapa de Rugosidad Urbana (Urban Roughness Sublayer), desde el suelo hasta 1-3 veces la altura media de los edificios donde los flujos turbulentos no son constantes con la altura. O sea, no respetan la condición básica de la MOST (Rotach, 1993).

2°. No existe una sola superficie que intercambia calor con la atmósfera, sino varias a diferente altura, con diferente orientación, y con diferentes propiedades térmicas. En particular las varias orientaciones de las superficies urbanas (techos, muros, calles) generan fenómenos de reflexión y "atrapamiento radiativo" (tanto de la radiación solar como de la radiación infrarroja), que modifican las tasas de calentamiento y enfriamiento. Además, hay que considerar las emisiones de calor antropogénico.

En esta última década, también gracias al aumento de la capacidad de cálculo que permite utilizar parametrizaciones más sofisticadas y detalladas, varias técnicas han sido propuestas. Por simplicidad, las agrupamos en dos categorías: térmicas (relacionadas con los intercambios de calor) y mecánicas (relacionadas con la turbulencia y el intercambio de momento).

### Parametrizaciones térmicas

La aproximación más simple se basa en el modelo de histeresis de Grimmond et al. (1991), que supone una relación entre la cantidad de energía almacenada en los edificios, la radiación neta y su variación temporal. Esta aproximación es semi-empírica, porque necesita que se determinen los valores de tres constantes a partir de una serie de medidas experimentales. Estas constantes, en principio, dependen de cada lugar. Otras técnicas un poco más complejas se basan en la física del fenómeno resolviendo un balance de energía para tres tipos de superficies: tejados, muros y calles (Masson,

2000, Kusaka et al. 2001, Martilli et al. 2002). Las radiaciones para los balances energéticos de los muros y de las calles tienen en cuenta las reflexiones y las sombras (ver fig. 2).

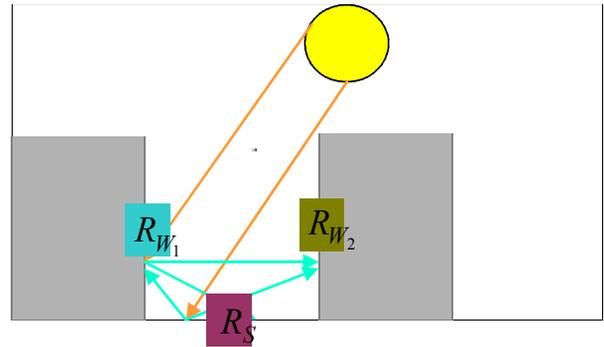


Figura 2. Representación esquemática del cañón urbano tal y como es simulado por la parametrización urbana. Los efectos de radiación son tenidos en cuenta

### Parametrizaciones mecánicas

Una de las técnicas más comunes para representar la disminución de la velocidad del aire debido a la presencia de los edificios, consiste en introducir un término sumidero en la ecuación de conservación del momento proporcional a la densidad de los edificios y al cuadrado de la velocidad del viento (Uno et al. 1989, Brown and Williams, 1998, Martilli et al. 2002, Coceal and Belcher, 2004). Esta es una técnica similar a la adoptada en la simulación del flujo a través de la vegetación (Vegetation Canopy Modelling). Además, los modelos que resuelven una ecuación para la energía cinética turbulenta (Turbulent Kinetic Energy, TKE), introducen un término de fuente proporcional al cubo de la velocidad. Esto se justifica porque los edificios son muy eficientes en romper los grandes remolinos transformándolos en otros de tamaño más pequeño, comparables con los edificios mismos. En otras palabras, hay una transferencia desde la energía cinética media a la turbulenta. De la misma manera, la transferencia hacia la disipación es también acelerada. Las longitudes de escala turbulenta (utilizadas en la ecuación de la TKE y para el cálculo de los coeficientes de difusión) son también afectados.

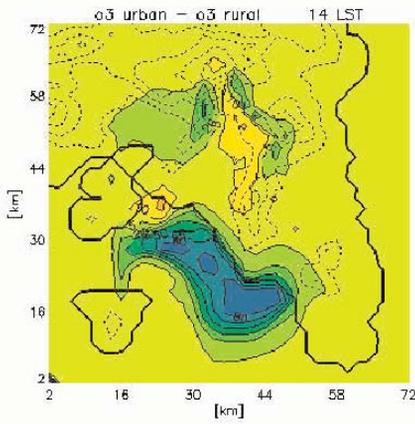
### Caso de Atenas

Comparaciones con medidas experimentales han mostrado cómo estas nuevas técnicas representan una mejora comparadas con las técnicas tradicionales, aunque continúan existiendo discrepancias, por lo que se hace necesario un ulterior trabajo de desarrollo.

Ya han sido evaluados los impactos de estas nuevas técnicas en resultados de simulaciones a mesoscala. Por ejemplo, un estudio de circulación atmosférica y contaminación sobre la ciudad de Atenas (Martilli et al. 2003) ha mostrado cómo el hecho de tener en cuenta la ciudad con este tipo de parametrizaciones modifica el régimen de brisa marina y terrestre. En particular, reduce la intensidad de la brisa terrestre nocturna, y aumenta la intensidad, reduciendo la velocidad de penetración de la brisa marina diurna. Lógicamente, esto afecta la distribución de los contaminantes (e.g. O<sub>3</sub> en Figura 3).

Figura 3

Diferencia en la distribución de ozono sobre la ciudad de Atenas en las proximidades del suelo, a 1400 LST entre una simulación con parametrización urbana (urb) y una simulación sin parametrización (rur). Los tonos azules corresponden a valores en los que "rur" simula valores más altos, mientras que los tonos amarillos corresponden a valores en los que "urb" simula valores más altos.



### Desarrollos futuros

El continuo incremento de capacidad de cálculo junto con la mejor comprensión de los mecanismos físicos de la UCL hará posible un desarrollo más completo de las parametrizaciones.

Para la parte térmica, en particular, los nuevos desarrollos apuntan a tomar en cuenta la generación de energía en interior de los edificios y los intercambios con el ambiente externo. Esto es particularmente importante en estudios de atenuación de la UHI para poder estimar el consumo de energía eléctrica conectado, por ejemplo, con la utilización de sistemas de aire acondicionado.

Para la parte mecánica, ya se han empezado a utilizar modelos de microescala que son capaces de integrarse en dominios pequeños y con alta resolución, permitiendo visualizar los edificios. Con los resultados de estas simulaciones, vali-

dados con medidas en túnel de viento, será posible mejorar la comprensión del comportamiento del flujo atmosférico en la UCL, y, consecuentemente, mejorar las parametrizaciones urbanas.

### Referencias

- Brown M.**, Williams M., 1998: An Urban Canopy Parameterization for Mesoscale Models, AMS 2nd Urban Environment Symposium, Albuquerque, NM, USA
- Coceal O.**, Belcher S. E., 2004: A canopy model of mean winds through urban areas Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 130 (599): 1349-1372 Part B
- Grimmond C.S.B.**, Cleugh H. A., Oke T. R., 1991: An objective urban heat-storage model and its comparison with other schemes. Atmos Environment, Part B-Urban Atmosphere 25 (3): 311-326
- Kusaka H.**, Kondo H., Kikegawa Y., 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, Bound.Layer Met., 101 (3): 329-358
- Martilli A.**, Clappier A., Rotach M. W., 2002: An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models, Boundary Layer Meteorology, 104(2) : 261-304
- Martilli A.**, Roulet Y. A, Junier M., Kirchner F., Rotach M. W., and Clappier A., 2003: On the impact of urban surface exchange parameterizations on air quality simulations: the Athens Case. Atmospheric Environment, 37, 4217-4231.
- Masson V.**, 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Bound. Layer Met., 94 (3): 357-397
- Rotach M. W.**, 1993: Turbulence close to a rough urban surface. Part I: Reynolds Stress. Boundary Layer Meteor., 65 (1-2): 1-28
- Uno I.**, Ueda H., Wakamatsu S., 1989: Numerical modelling of the nocturnal Boundary-Layer. Boundary Layer Meteor., 49 (1-2): 77-98



### Contaminación

LOS periodos de calma largos y persistentes ligados a los potentes anticiclones, mantienen las masas de aire días y días estancadas sobre una misma región. Ello incrementa la polución local próxima al suelo, contribuyendo a contaminar el aire en bajos niveles, ayudada por la inversión térmica en la vertical del aire cálido descendente del anticiclón.

Las partículas sólidas y líquidas, procedentes del tubo de escape de los automóviles -los humos negros de la gasolina y gas-oil-, los residuos de hollín que provienen de las chimeneas de las grandes fábricas, de los quemadores de basura, de la calefacción, de las centrales térmicas..., aportan cenizas y

corpúsculos. Todos estos residuos ensucian la atmósfera y producen agresión a la mucosa bronquial. No olvidemos que por nuestro organismo pasan cada día más de 12 metros cúbicos de aire y que los fenómenos respiratorios son la base del metabolismo celular de nuestra vida.

En Otoño-Invierno, la contaminación de las grandes ciudades se acrecienta por la aportación de partículas e impurezas. Si además, existe un alto índice de humedad se forman nieblas contaminadas, a las que los ingleses llaman **smog** (smoke-humo, fog-niebla) con grandes concentraciones de hollín y vapor de agua. Un oportuno fregado (por lluvia) o barrido (por viento) contribuye entonces a limpiar la atmósfera contaminada. En Primavera-Verano, la contaminación más acusada se presenta en el campo, ya que la floración de árboles y plantas liberan gran cantidad de pólenes, que provocan molestias producidas por alergia, asma y fiebre del heno; también el ozono troposférico provoca efectos adversos, mientras que el polvo en suspensión da lugar a calimas y fenómenos de espejismo.

En zonas templadas y tropicales, la atmósfera se ensucia con sustancias higroscópicas: polvo, humos, aerosoles, sal marina (rociones de las olas forzadas por el viento)... Estas sustancias sirven de soporte, cuando aparece aire húmedo, para que se formen nieblas a ras del suelo, o bien nubes en el seno del aire. El ambiente sucio con sustancias higroscópicas es la base de la formación de nubes y nieblas.