

Carlos García-Legaz Martínez
Francisco Valero Rodríguez
Editores

**RIESGOS
CLIMÁTICOS
E IMPACTO
AMBIENTAL**



**CONSORCIO DE
COMPENSACIÓN**
• DE SEGUROS •



**EDITORIAL
COMPLUTENSE
MADRID**

Carlos García-Legaz Martínez
Francisco Valero Rodríguez
Editores

RIESGOS CLIMÁTICOS E IMPACTO AMBIENTAL

C. García-Legaz Martínez y F. Valero Rodríguez

Primera Parte: RIESGOS CLIMÁTICOS

1. Efectos climáticos de los cambios biológicos	1
J. C. Jiménez	
2. Situación de ayuda a la toma de decisiones en caso de una emergencia	20
J. E. García Cuervo	
3. Riesgos naturales	29
M.M. García-Perizero María	
4. Implicación medioambiental de los riesgos hidrológicos españoles	33
A. Rodríguez Fongal	
5. Influencia de la meteorología en la gestión agrícola	33
E. Corral Tena	
6. El riesgo climático de los incendios forestales en España	108
C. Alvarco Moya	
7. La cobertura aseguradora	139
A. Néjoro Juárez	
8. Efecto invernadero. Algunos modelos aplicados	149
J. Muñoz Delgado	

Con el patrocinio de:



CONSORCIO DE
COMPENSACIÓN
• DE SEGUROS •

Segunda Parte: IMPACTO AMBIENTAL

9. Adaptación de la industria química a los requisitos que impone la calidad ambiental	177
A. Ramero Salvador	
10. Elementos básicos de la gestión forestal	197
A. Prieto, J.A. Sola y M. García	

Año 2003

RIESGOS CLIMÁTICOS E IMPACTO AMBIENTAL

Editores

Carlos García-Legaz Martínez

Francisco Valero Rodríguez

ISBN: 84-7491-711-5

Depósito Legal: M-14243 - 2003

Edita: EDITORIAL COMPLUTENSE, Calle Donoso Cortés, 63 - 28015 Madrid

Imprime: IRAGRA, S.A.



EDITORIAL COMPLUTENSE

*...una de las misiones del sabio,
además de la investigación seria,
es también la difusión lúcida
del conocimiento .*

Umberto Eco

(El mago y el científico)

Queda prohibida la reproducción total o parcial de este libro.

b 2042576x

i 37236432

Índice

Relación de autores	VII
Presentación	IX
<i>E. Martín Cabrera</i>	
Prólogo	XI
<i>I. Machetti Bermejo</i>	
Introducción	XIII
<i>C. García-Legaz Martínez y F. Valero Rodríguez</i>	
Primera Parte: RIESGOS CLIMÁTICOS	1
1. Efectos climáticos de las erupciones volcánicas	3
<i>J. C. Antuña</i>	
2. Sistema de ayuda a la toma de decisiones en caso de una emergencia nuclear	20
<i>J. P. García Cadierno</i>	
3. Riesgos naturales meteorológicos	37
<i>M.M. García-Pertierra Marín</i>	
4. Implicación medioambiental de las reservas hidráulicas españolas	69
<i>A. Rodríguez Fontal</i>	
5. Influencia de la meteorología en la producción y precios de productos agrícolas	83
<i>E. Cerdá Tena</i>	
6. El marco climático de los riesgos meteorológicos en España.	108
<i>C. Almarza Mata</i>	
7. La cobertura aseguradora de los riesgos climáticos	139
<i>A. Nájera Ibáñez</i>	
8. Efecto invernadero. Algunos modelos sencillos	149
<i>J. Núñez Delgado</i>	
Segunda Parte: IMPACTO AMBIENTAL	177
9. Adaptación de la industria química a los requisitos que impone la calidad ambiental	179
<i>A. Romero Salvador</i>	
10. Elementos básicos de la gestión forestal	197
<i>A. Prieto, J.A. Sáiz y M. Hernández</i>	

11. Protección contra incendios forestales	223
<i>R. Vélez Muñoz</i>	
12. La gestión medioambiental y su relación con la gestión de calidad y la prevención de riesgos laborales	248
<i>C. García-Legaz Alonso</i>	
13. La información y las predicciones meteorológicas como apoyo a la toma de decisiones en el sector agrario	264
<i>A. Mestre Barceló</i>	
14. Modelización dinámica del viento	283
<i>J. P. Montávez, J. F. González-Rouco y F. Valero Rodríguez</i>	
15. Evaluación de los recursos eólicos	303
<i>I. Martí Pérez</i>	
16. La energía solar	326
<i>C. Armenta Déu</i>	

14 Modelización dinámica del viento

J.P. MONTÁVEZ, J.F. GONZÁLEZ-ROUCO y F. VALERO
Departamento de Física de la Atmósfera, Astronomía y Astrofísica II
Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense
Ciudad Universitaria - 28040 Madrid

I. INTRODUCCIÓN

Las predicciones meteorológicas se usan para multitud de aplicaciones medioambientales, industriales y comerciales. El aumento en la fiabilidad de las mismas y la automatización de los procesos son las causas de que día a día crezca el número de aplicaciones. Una herramienta muy útil a la hora de la optimización del uso de recursos o mitigación de impactos de fenómenos meteorológicos adversos la constituye los modelos numéricos diseñados para predicción. Son muchos los ejemplos de las aplicaciones de las predicciones meteorológicas, cubriendo desde la planificación del ocio hasta la previsión de alertas de eventos meteorológicos extremos tales como avenidas e inundaciones o la predicción de temperaturas para demanda energética.

La energía eólica está empezando a cobrar cierta importancia en el cómputo general de energía producida en nuestro país. Uno de los problemas que presenta este tipo de energía es su dependencia de las condiciones meteorológicas tanto para la predicción de la producción energética como para la gestión de los recursos humanos dedicados al mantenimiento en este sector. Por ejemplo, la predicción eficaz del viento es fundamental para la gestión de los recursos eólicos.

En este artículo, plantaremos en primer lugar la necesidad de las predicciones a escala regional, o incluso local, así como de las técnicas que usualmente se utilizan para la reducción de la escala espacial de las variables meteorológicas dadas por los modelos meteorológicos y climáticos globales. Estas técnicas pueden ser estadísticas (Wilby and Wigley, 1997) o dinámicas (Giorgi et al., 1994). Las técnicas dinámicas se fundamentan en el uso de modelos dinámicos regionales. Este trabajo ilustra la utilización de uno de estos modelos dinámicos, en concreto, el modelo de mesoescala MM5 para la predicción del viento a una determinada altura. Para

ello, se presentan algunos ejemplos de simulación del viento tanto espacial como temporalmente. Finalmente, se añadirán conclusiones y comentarios sobre la utilización de este tipo de modelos para predicción.

Los modelos dinámicos regionales son una herramienta de gran potencial para el estudio de los procesos atmosféricos involucrados en escalas espaciales inferiores a la de resolución de los modelos meteorológicos y climáticos. El modelo MM5 tiene su origen en un modelo de mesoescala desarrollado a comienzos de la década de los setenta por Antes y Warner (1978). Desde entonces el modelo ha experimentado considerables mejoras (Duhdia, 2001) y ha encontrado muchas aplicaciones en diversos campos de la ciencia (Montávez, 2002).

2. REGIONALIZACIÓN DE LAS PREDICCIONES

Uno de los problemas fundamentales de las predicciones que se realizan por medio de modelos meteorológicos o climáticos globales es la escasa resolución espacial de los mismos. La solución al aumento de resolución se apoya en la utilización de modelos de reducción de escala (*downscaling*). En síntesis, el papel fundamental de estos modelos consiste en regionalizar las salidas de los modelos a gran escala apoyado en el hecho de que las señales climáticas o meteorológicas son el resultado de las interacciones entre los procesos físicos que operan en un amplio rango de escalas espaciales (metros a miles de kilómetros) y temporales (minutos a millones de años).

En la Figura 1 se presenta un ejemplo de la resolución espacial usada habitualmente y topografía utilizada en modelos globales para una ventana centra-

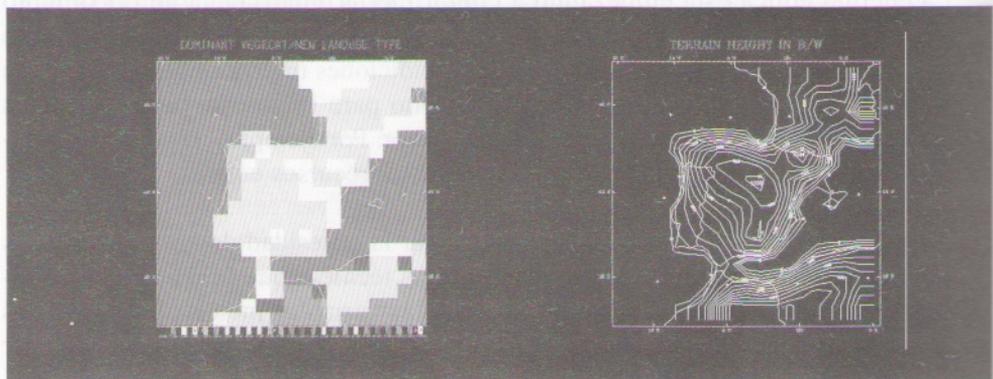


Figura 1. Ejemplo del tamaño de rejilla (izquierda) y topografía (derecha) vista por un modelo MM5 con una resolución similar a la de los modelos meteorológicos de escala global con una resolución aproximada de 80 km.

da en la Península Ibérica. La Figura de la izquierda corresponde a un ejemplo con una resolución espacial de aproximadamente 1° que en estas latitudes equivale a unos 80 km. Como se puede observar, hay provincias que contendrían solamente un punto del modelo. La Figura de la derecha representa la topografía "vista" por el modelo. Resulta realmente pobre para muchas aplicaciones y la reproducción del contorno del continente es bastante burda. No obstante, las predicciones a escala sinóptica¹ de estos modelos son razonablemente aceptables, aunque éstas van perdiendo fiabilidad a medida que aumenta el horizonte predictivo.

Los modelos de *downscaling* se pueden dividir en dos grandes grupos según el tipo de técnica que empleen para regionalizar:

- *Modelos estadísticos* (Wilby and Wigley, 1997). Los modelos estadísticos de este tipo se basan en determinar un conjunto de relaciones estadísticas entre la escala sinóptica y la escala local. Una vez establecidas éstas, a partir de las predicciones a escala sinóptica se pueden obtener predicciones en un cierto punto. Las relaciones pueden ser lineales o no lineales. Algunos ejemplos de modelos estadísticos que usan técnicas lineales pueden ser los modelos de Análisis de Correlación Canónica y los modelos de Regresión (Zorita et al., 1992; Cubasch et al., 1996). Ejemplos de modelos que usan técnicas estadísticas no lineales pueden ser los modelos basados en técnicas de análogos (Zorita y von Storch, 1999).
- *Modelos dinámicos* (Duhdia et al, 2001, Giorgi et al., 1994). Los modelos dinámicos se basan en la resolución de las ecuaciones dinámicas y termodinámicas que rigen el comportamiento de la atmósfera. Utilizan las salidas de los modelos globales únicamente como una forma de imposición de las condiciones iniciales y de contorno que permiten resolver las ecuaciones dinámicas dentro del dominio seleccionado.

Cada uno de estos métodos presenta ventajas e inconvenientes. Los modelos estadísticos son más económicos desde el punto de vista computacional; a veces, las predicciones locales son más precisas, pueden llegar a ser más sencillos en la determinación de las relaciones entre la gran escala y la escala local y no necesitan información sobre la caracterización física del emplazamiento. Los dinámicos, sin embargo, no necesitan medidas meteorológicas previas para calibrar el modelo y las predicciones a escala regional son mucho más precisas, característica que les convierte en una potente herramienta para comprender y simular los fenómenos físicos a mesoescala (cientos de kilómetros). Son pues capaces de predecir el cambio climático local al poder tener en cuenta las propiedades físicas

¹ La dimensión espacial típica de las perturbaciones sinópticas es del orden de 1000 km.

locales y, a priori, son capaces de predecir situaciones extremas que pueden escapar a la "memoria" de los estadísticos.

Podemos encontrar una gran variedad de modelos atmosféricos regionales o de área limitada desarrollados por distintos centros meteorológicos, universidades y centros de investigación. Algunos ejemplos de modelos son el MM5 (Mesoscale Model, Dudhia et al. 2001), HIRLAM (High Resolution Limited Area Model, Machenhauer, 1998) desarrollado por un consorcio de centros meteorológicos europeos entre los que se incluye el español, ARPS (Advanced Regional Prediction Model, Xue et al. 1995) desarrollado en el centro de predicción de tormentas de Oklahoma, WRF (Weather Research Forecast Model, Michalakes et al., 1998), desarrollado por varias instituciones americanas, entre ellas el NCAR, que tiende a ser el sustituto de MM5, RAMS (Regional Atmospheric Meteorological System, Pielke, 1984), MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System), COAMPS (Coupled Ocean Atmospheric Prediction System, Hodur, R.M.), REMO (Regional Model, Majestic 1991), LM (Local Model, Doms et al 1999), etc. Algunos de ellos son de libre disposición para cualquier fin y otros para su utilización en la investigación. Unos están especializados para estudios climáticos y otros para estudios meteorológicos. En resumen, se pueden encontrar un gran número de modelos para multitud de aplicaciones tanto científicas como operativas.

El modelo que se ha utilizado en este trabajo es la tercera versión de la quinta generación del NCAR/Penn State Mesoscale Model, conocido popularmente como MM5.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO MM5

El modelo MM5 (Dudhia, 1993, Dudhia, 2001) es probablemente uno de los modelos más usados en todo el mundo. Las razones que motivan su uso son varias. Es un modelo de libre disposición y mantenimiento gratuito con una gran portabilidad que puede integrarse incluso en un PC. Es un modelo no hidrostático que permite llegar a resoluciones muy altas. Presenta una gran variedad de opciones físicas o parametrizaciones y permite anidamiento múltiple.

En esta sección se van a describir simplemente las características más relevantes del sistema de modelado MM5. El objetivo de esta sucinta descripción es dar una idea al lector de las posibilidades del modelo. Una descripción más detallada de la estructura, instalación y características físicas principales del modelo viene dada en Dudhia et al. (2001) y una descripción más profunda de

las ecuaciones físicas en las que está basado se encuentra en (Grell et al, 1995).

Modelo no hidrostático

La desviación del equilibrio hidrostático de la atmósfera se produce cuando la presión ejercida por el aire sobre un punto no queda perfectamente definida por la masa de aire que la rodea. Pues bien, cuando los tamaños de rejilla horizontal empleados son del mismo orden o parecido a la altura vertical del dominio estamos en tales condiciones y, entonces, se ha de trabajar con una versión no hidrostática. Así pues, si se pretenden realizar integraciones de alta resolución es conveniente trabajar con un modelo no hidrostático. Los modelos no hidrostáticos consideran la aceleración vertical que contribuye al gradiente vertical de presión (Grell et al., 1995).

Rejilla horizontal y vertical

Los modelos numéricos en general necesitan discretizar tanto espacial como temporalmente las variables que rigen las ecuaciones del sistema. La discretización espacial en MM5 se realiza de forma diferente en la dimensión vertical que en la discretización horizontal. En la Figura 2 se ilustran esquemáticamente los tipos de rejilla utilizados.

- La rejilla horizontal es del tipo Arakawa-Lamb de diferenciación de magnitudes escalares y vectoriales. Las magnitudes escalares se definen en el interior de la rejilla y las vectoriales en las esquinas.
- En la discretización vertical del área de integración del modelo se emplea la coordenada sigma. Se define como:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}$$

donde p y p_t son la presión en un punto cualquiera y en la cima de la atmósfera, respectivamente, y p_s en la superficie de la Tierra. Es una coordenada adimensional que se adapta al terreno en sus niveles más bajos y que coincide con superficies de presión constante en niveles altos. Cada nivel sigma queda definido por un número entre 0 y 1, donde 1 corresponde a la superficie y 0 al nivel más alto. Cada cada dos niveles definen una capa sigma y el centro de ésta un nivel sigma medio. El cálculo de la velocidad y de la aceleración vertical se realiza en los niveles sigma mientras que el resto de variables se determinan en los niveles sigma medios.

de mayor resolución. MM5 tiene dos formas de llevar a cabo este acoplamiento entre ambos dominios de integración, mediante:

- *Anidamiento unidireccional*. En este tipo de acoplamiento sólo se permite la interacción en un sentido. La rejilla madre impone las condiciones frontera a la rejilla hija y la información de aquélla es totalmente independiente de la de ésta.
- *Anidamiento bidireccional*. En este tipo de interacción existe realimentación entre ambas rejillas. La madre transfiere dinámicamente, en cada paso de integración del dominio, las condiciones frontera a la hija y ésta, a su vez, es capaz de modificar las condiciones de los puntos coincidentes de la rejilla madre y, por ende, afectar a su dominio respectivo.

Comentarios sobre las opciones físicas

Aún así, existen procesos que ocurren en escalas inferiores a la de resolución del modelo. Estos procesos han de ser parametrizados. Los distintos esquemas se aplican a la capa límite planetaria, parametrización de cúmulos (sólo para tamaños de rejilla inferiores a 5 km), humedad explícita, radiación y temperatura de suelo.

Una de las características más llamativas del MM5 es la gran variedad de opciones físicas o parametrizaciones que permite utilizar. Existen cientos de combinaciones posibles de parametrizaciones. Quizás, lo más complicado sea la elección del esquema óptimo. No existe *a priori* una metodología generalizada para la obtención de dicho esquema ya que éste depende de la zona geográfica de aplicación, del tamaño de la rejilla, etc. Aún más, puede en muchos casos buscarse una solución de compromiso que nos ayude a decidir la selección de esquemas menos complicados pero más rápidos desde el punto de vista computacional.

Asimilación de datos

La fase de asimilación de datos en un modelo de estas características se refiere al método de incorporación de datos procedentes de diversas fuentes al modelo.

MM5 comprende dos formas de asimilar los datos: asimilación simple y asimilación cuatridimensional. La asimilación simple tiene por objeto mejorar las condiciones iniciales y de frontera imponiendo mayor resolución que los datos originales. La cuatridimensional consiste en integrar el modelo forzándolo dinámicamente a los valores observados. Entre algunas aplicaciones de la asimilación están la inicialización dinámica de los modelos para predicción y obtención de análisis regionales más precisos.

En la actualidad se están desarrollando otros tipos de asimilación variacional de datos (3DVAR y 4DVAR) que parecen ser más exactas que las que actualmente están implementadas pero de mayor coste computacional.

Sistema de modelado

El sistema de modelado MM5 comprende un conjunto de programas constituyendo su núcleo el modelo MM5. En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo correspondiente y, a continuación, se destaca el papel de cada uno de los programas que lo integran.

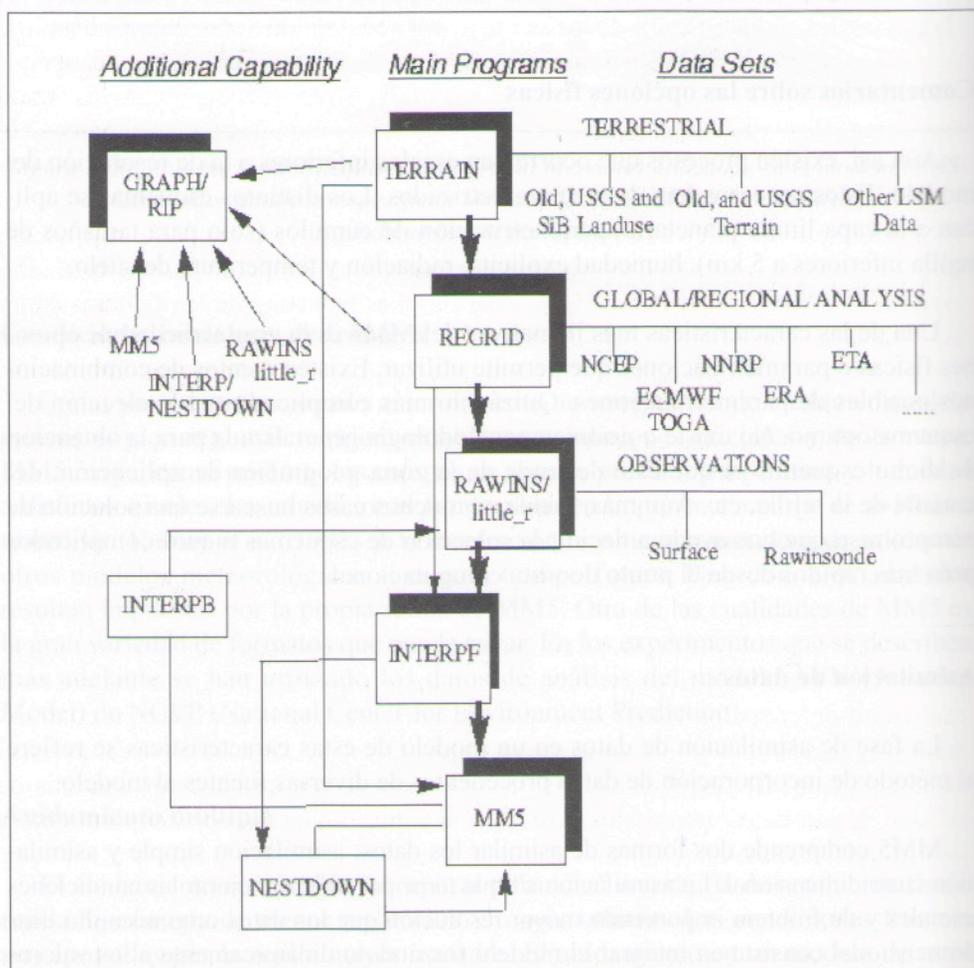


Figura 3. Diagrama de flujo descriptivo del sistema de modelado MM5.

TERRAIN. Siempre que se realiza una simulación de área limitada el primer paso a realizar es la elección y caracterización de los dominios en los que se vaya a llevar a cabo la integración. TERRAIN crea los dominios de integración necesarios, interpola la topografía incorporando datos externos, caracteriza los usos de suelo de cada punto de la rejilla del dominio a partir de dichos datos y calcula el factor de escala y el parámetro de Coriolis para cada uno de los puntos de la red. Los datos externos que utiliza para la creación de la topografía y la caracterización de los usos de suelo pueden ser suministrados por el usuario, para lo cual tendrían que ponerse en el formato adecuado. Si no es así, utiliza por defecto la base de datos USGS (United States Geographical Survey).

REGRID. Los modelos de área limitada requieren condiciones iniciales y de contorno para su integración. Éstas se pueden obtener de distintas fuentes e incluso si se quieren realizar experimentos teóricos se pueden crear artificialmente, aunque esto último no forma parte de sistema de modelado MM5. Generalmente las condiciones iniciales y de contorno se extraen de salidas de modelos meteorológicos/climáticos o de análisis. El sistema MM5 viene preparado para poder procesar una amplia gama de formatos de ficheros, prácticamente todos los proporcionados por el NCEP (National Center for Environment Research) y el ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast). REGRID consta de dos partes bien diferenciadas. La primera parte es *pregrid* y su papel es la lectura de los ficheros externos y de creación de ficheros intermedios en los que se ha guardado la información que el sistema MM5 necesita. El formato intermedio es un formato bastante simple cuyo objetivo es grabar los datos en este formato si el usuario proporciona datos que a priori REGRID no reconoce. El segundo paquete es *regridder* que se encarga de leer los ficheros previamente creados por *pregrid* e interpolar los datos a la malla creada por TERRAIN. También comprueba si los datos contenidos en dichos ficheros son suficientes para que MM5 sea capaz de realizar la integración. Estos programas trabajan siempre en niveles de presión.

RAWINS/ LITTLE_R: Mejoran las condiciones iniciales o de frontera a partir de datos meteorológicos en superficie o en altura. RAWINS además posee la capacidad de crear los ficheros necesarios para realizar la asimilación cuatridimensional de los datos y el *nudging* (von Storch *et al*, 2000) durante el proceso de integración. El papel de ambos programas consiste en hacer un análisis de calidad de los datos asimilados y realizar las interpolaciones de acoplamiento a la rejilla del modelo.

INTERPF: El modelo MM5, como ya se ha mencionado anteriormente opera con la coordenada sigma. El papel de INTERPF consiste en interpolar los datos provenientes de los programas anteriores (REGRID o RAWINS o LITTLE_R) a los niveles sigma para crear los ficheros que incluyen las condiciones iniciales y de

contorno necesarias para la integración. En INTERPF se indican los niveles a emplear en la simulación y el tope del dominio.

MM5: Este paquete es el modelo en sí mismo.

NESTDOWN: Si se quiere realizar un anidamiento unidireccional, NESTDOWN es la herramienta para tal fin. Este programa se encarga de crear las condiciones iniciales y de contorno para una integración de MM5 a partir de la propia salida de MM5.

INTERPB: La asimilación de datos se realiza siempre en niveles de presión. Para realizar la asimilación de datos en una rejilla menor que la principal (anidamiento unidireccional), INTERPB proporciona los datos de la salida del MM5 en niveles de presión para poder ser utilizados como datos de entrada en los programas RAWINS o LITTLE_R.

POSTPROCESADO DE DATOS: Una parte fundamental de cualquier modelo meteorológico es el postprocesado de datos, no sólo para el manejo y visualización de los mismos sino también para la obtención de variables de diagnóstico. Entre los programas que se han adaptado para la visualización y postprocesado de los datos de MM5 están RIP, GRAPH, GrADS y Vis5D.

4. EJEMPLOS DE SIMULACIÓN DEL CAMPO DE VIENTO

Para ilustrar el potencial efectivo de predicción del campo de viento mediante el modelo MM5 se van a presentar los resultados de dos experimentos realizados en diferentes escenarios físicos. El primero de ellos consiste en la comparación de las predicciones de MM5 con datos reales, lo que podría ser ya una aplicación directa para el cálculo de la energía potencial que podría generar una central eólica. El segundo, consiste en simular el viento catabático, las modificaciones del viento debido a la inclusión de una ciudad y el efecto de la isla de calor urbana.

4.1. Predicción de series temporales de viento

Para apreciar la bondad del modelo MM5 en la predicción del viento se ha realizado un experimento consistente en la simulación de la velocidad del viento durante 8 días y su posterior comparación con los datos de una torre de medida situada en la provincia de Sori, a una altitud de unos 1050 m. La torre tiene anemómetros situados en niveles sobre la misma que van desde los 10 a los 100 m.

Se ha utilizado una configuración (Figura 4) de cuatro dominios en los que se ha empleado anidamiento bidireccional entre los dominios 1-2, 2-3 y 3-4. La resolución de los dominios es de 27, 9, 3 y 1 km para los dominios 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Los niveles sigma del modelo se han elegido de manera que hasta la altura de 100 m haya 4 capas sigma.



Figura 4. Configuración de dominios para el estudio de las series de viento.

En la Figura 5, se presentan los resultados aportados por la aplicación del modelo y los valores observados de la velocidad del viento a una altura de 100 m sobre el nivel del suelo. Los datos comprenden el periodo que va desde el 1 al 8 de abril. La variabilidad de baja frecuencia se reproduce aceptablemente, si bien no es capaz de reproducir la variabilidad de alta frecuencia, lo cual es esperable dada la limitada resolución espacio temporal del MM5 en este experimento comparada con el intervalo temporal de medición (10 minutos). La simulación presentada en este ejemplo podría mejorarse notablemente modificando los parámetros del suelo tales como la rugosidad, usar otras opciones físicas, etc.

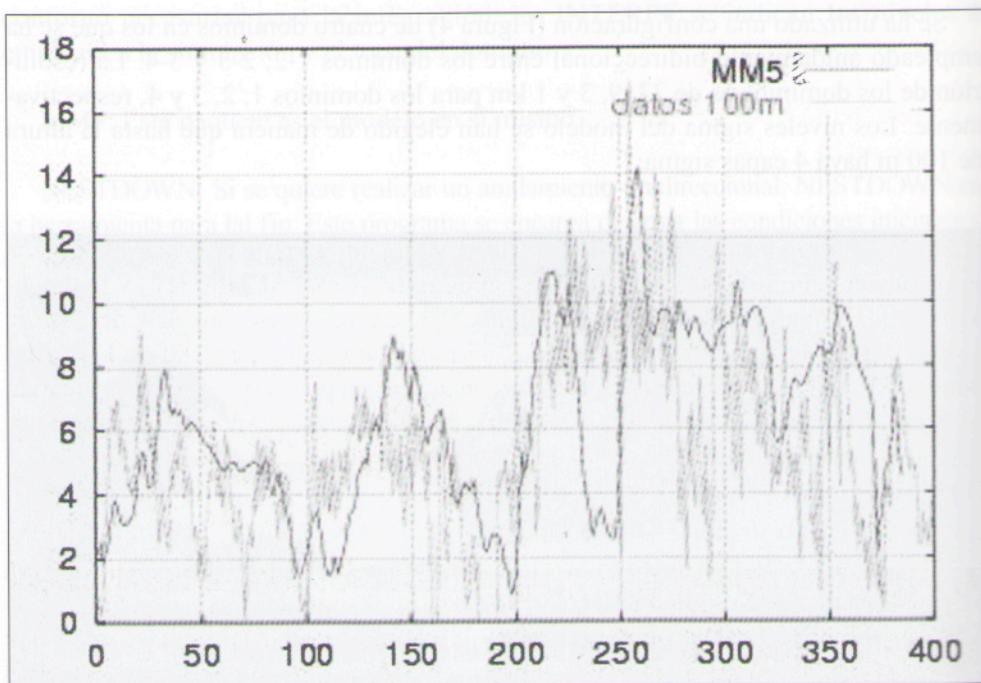


Figura 5. Simulación del módulo del viento por MM5 y observaciones de datos a 100 m. Los datos se representan cada media hora para MM5 y datos reales registrados cada 10 min. El intervalo cubre 8 días de integración del modelo (del 1 al 9 de Marzo del 2002) para una estación del CIEMAT situada en la provincia de Soria.

4.2. Simulación del viento catabático y del efecto urbano sobre el campo de viento

Para la simulación de los vientos catabáticos y del efecto de la urbanización sobre el campo de viento urbano se ha diseñado un experimento consistente en hacer dos integraciones bajo las mismas condiciones iniciales y de contorno especificando un área con características urbanas dentro del dominio. El intervalo de tiempo elegido de simulación fue del 4 al 6 de diciembre de 2001 dado que en este periodo se daban las condiciones ambientales adecuadas para la formación de una isla de calor urbana (ICU) intensa (Montávez, 2000). El fenómeno ICU consiste, en síntesis, en el establecimiento de diferencias de temperatura entre las zonas urbana y rurales adyacentes. Las causas que se imputan a dicho fenómeno son fundamentalmente debidas a las diferencias entre los tipos de suelo rural y urbano, la estructura tridimensional de la ciudad y las diferencias de humedad, así como otras que no son tenidas en cuenta en

este experimento como son el efecto invernadero local y los calores de origen antrópico (Landsberg, 1981, Oke, 1991).

En la Figura 6 se presentan los tres dominios seleccionados de resoluciones respectivas 27, 9, y 2 km. Se ha utilizado anidamiento bidireccional para los dominios 1 y 2, y unidireccional para los dominios 2 y 3. A partir de la salida del dominio 2 se ha hecho NESTDOWN y se han creado las condiciones de contorno para el dominio 3. El modelo se integra dos veces para este dominio: la primera integración sólo considera un tipo de suelo para todo el dominio (experimento rural) y la segunda, introduce una ciudad dentro de dicho dominio (experimento urbano). En la misma figura se puede apreciar así mismo la topografía considerada y las zonas donde se ha introducido suelo de características urbanas en el dominio 3. Las características del suelo urbano vienen dadas principalmente por su mayor inercia térmica, mayor rugosidad, menor cantidad de agua disponible y menor emisividad radiativa que la rural.

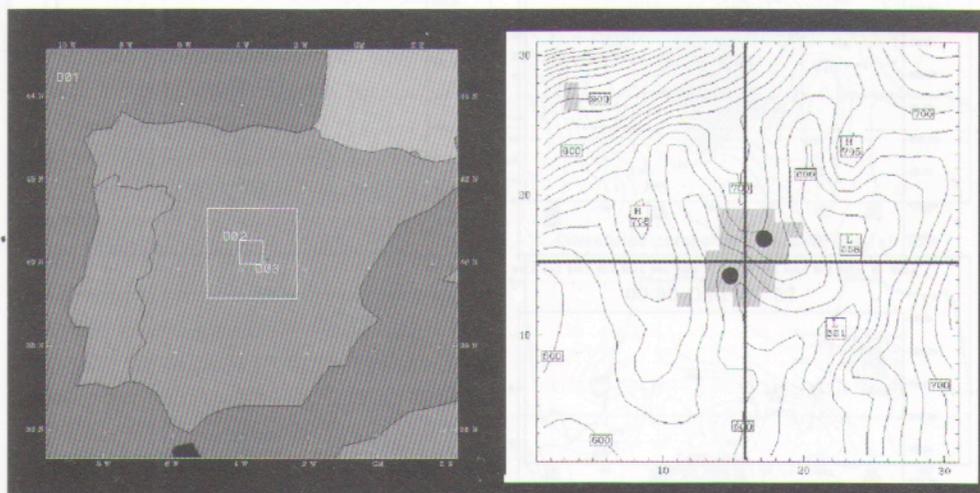


Figura 6. En el panel izquierdo se representa la configuración de dominios utilizada. En el panel derecho se representa el dominio 3 que se encuentra centrado en Madrid. Las isolíneas indican la topografía vista por el modelo. Las zonas en gris representan las zonas urbanas introducidas en el experimento ciudad. Los puntos negros señalan la ubicación de los puntos de muestreo.

El propósito de dicho experimento fue estudiar el fenómeno ICU (Oke, 1987, Montávez, 2000) por medio de un modelo mesoescala (Pielke, 1984) así como las modificaciones meteorológicas que se establecen en respuesta al proceso de urbanización.

En la Figura 7 se representan los campos de temperatura del suelo y del aire a 2 metros de altura para el experimento ciudad y las diferencias de temperatura entre los experimentos rural y urbano. Se puede apreciar que el modelo es capaz de simular bastante aceptablemente las diferencias térmicas en la zona antes y después de la urbanización. Una de las conclusiones que se derivan de este resultado es que aunque a priori la máxima temperatura se aprecia en el centro de la ciudad no es, sin embargo, en este punto donde se experimenta la mayor perturbación, sin duda, por el papel tan relevante que juega la topografía en la intensificación del fenómeno. Otros resultados indican que la ICU observada en el suelo tiende a ajustarse a los límites de la ciudad, mientras que la ICU en el aire se expande a sotavento, siendo la primera más intensa y la segunda más extensa.

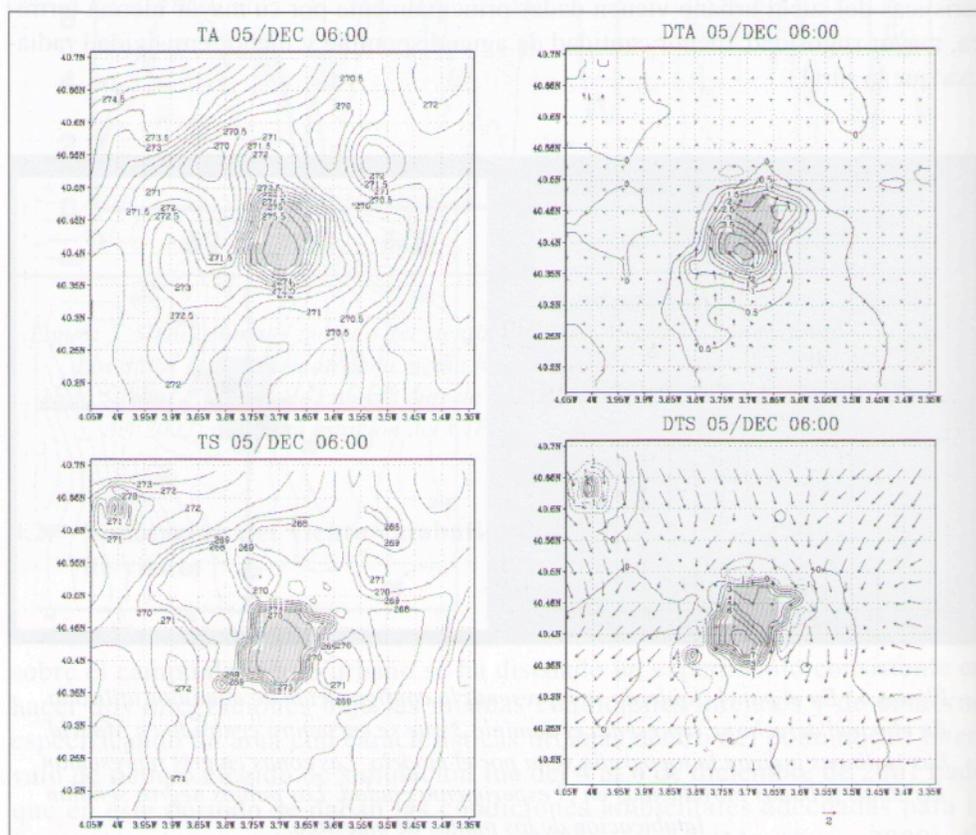


Figura 7. En el panel izquierdo se representan los campos de temperatura (K) a 2m (superior) y de suelo (inferior) para el experimento ciudad. En el panel derecho se presentan las diferencias de temperatura del aire y la diferencia del vector viento entre el experimento rural y el experimento ciudad (superior) y las diferencias de temperatura de superficie y el vector viento a 10m para el experimento ciudad (inferior).

Pero el fenómeno de urbanización no sólo afecta al campo de temperaturas, sino también al de viento, humedad, etc. Las modificaciones sufridas por el viento son bastante notables. Entre las causas atribuibles a estos cambios fundamentalmente está el incremento de rugosidad que experimenta la ciudad como consecuencia de su desarrollo así como la promoción de movimientos verticales que se generan en respuesta a la perturbación térmica urbana (Seaman, 1987).

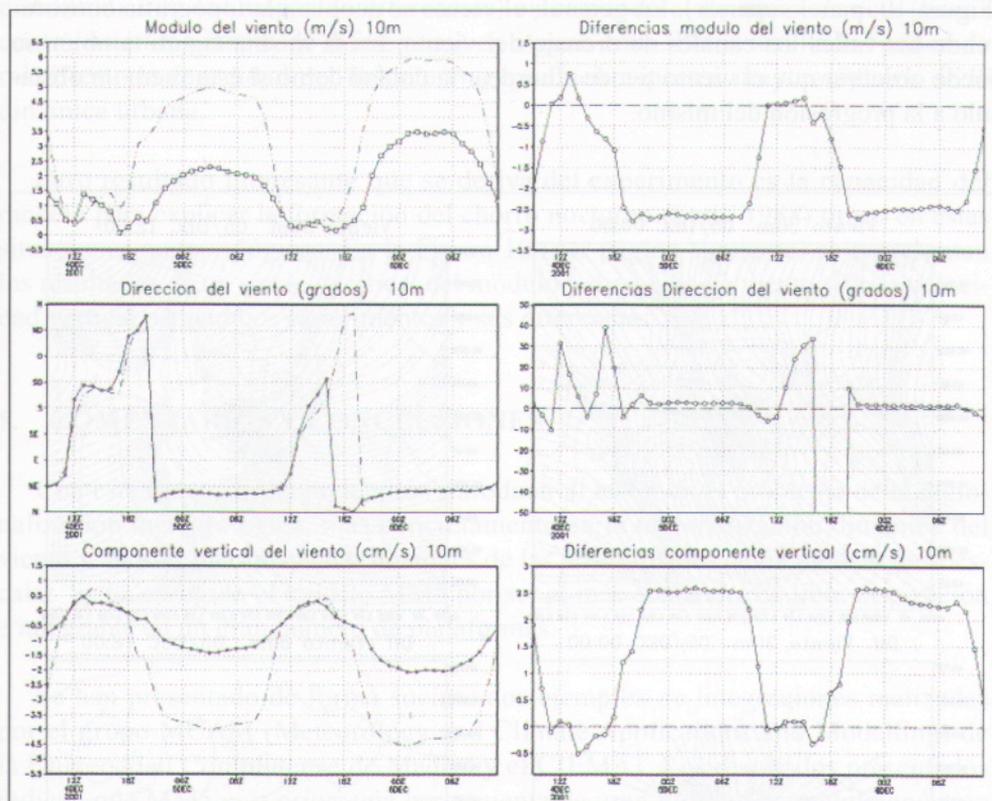


Figura 8. En el panel izquierdo se representan series de módulo y dirección de viento horizontal así como la componente vertical para el punto situado más al sur de la Figura 6 para los experimentos rural (línea a trazos) y urbano (línea continua con puntos). En el panel derecho se presentan las diferencias entre ambas series de datos y se indica con línea horizontal como referencia el valor de diferencia nula.

Observando las series del módulo y dirección del viento representadas en la Figura 8, se observa que en situación anticiclónica el modelo es capaz de reproducir los vientos catabáticos asociados al valle del Río Manzanares. Estos vientos están caracterizados claramente por un ciclo diario. Durante el día los vientos son muy

suaves y de dirección variable aunque básicamente en sentido valle arriba mientras que por la noche corresponden a vientos valle abajo intensificados o vientos de drenaje. Por otro lado, se aprecia que el papel de la ciudad es atenuar estos vientos.

En la Figura 9 se representa el viento a 30 m para el experimento ciudad a las 00Z y a las 12Z para el experimento urbano (panel superior) y las diferencias entre el experimento rural y urbano (panel inferior) así como el viento a 10 m a las 00Z (Figura 10, panel superior). En general, el viento se acopla a la topografía constituyendo los valles los canales de drenaje del viento. En la misma figura también se puede observar que el viento tiende a bordear la ciudad como si ésta fuera un obstáculo a la progresión del mismo.

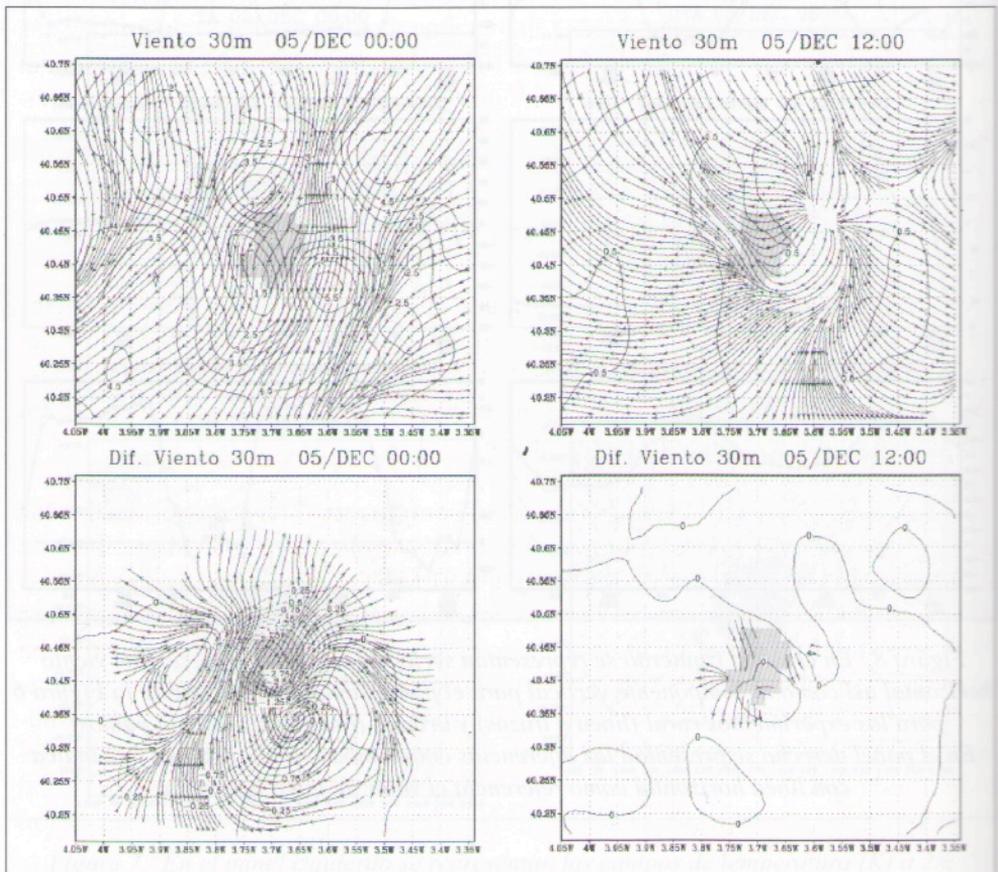


Figura 9. Viento a 30 m para el experimento ciudad a las 00Z y a las 12Z para el experimento urbano (panel superior) y las diferencias entre el experimento rural y urbano (panel inferior). Se representan las líneas de flujo y el módulo en m/s.

El efecto de la ciudad sobre el flujo de viento (ver diferencias entre los experimentos) es similar a las líneas de flujo del movimiento de un objeto en el interior de un fluido generando un *doblete* o *dipolo* circulatorio por efecto del obstáculo urbano: se pueden apreciar dos zonas de giro en la periferia de la ciudad con sus centros ligeramente desplazados a sotavento. El giro anticiclónico parece ser de mayor intensidad que el ciclónico por fortalecimiento de este giro por efecto de Coriolis. También se observa que aunque el módulo del viento disminuye (líneas discontinuas en los mapas de diferencias) en casi todo el dominio, arrecia (líneas continuas en los mapas de diferencias) en alguna zona. Estos resultados ponen de manifiesto la capacidad del modelo en reproducir aspectos muy complejos de la dinámica urbana.

Otro resultado interesante que se deriva del experimento es la capacidad del modelo para explicar la formación del chorro nocturno (Stull, 1988) típico en estas situaciones meteorológicas. En la Figura 10 (ver página siguiente) se representan los resultados de un sondeo vertical del módulo y dirección de viento y de la velocidad vertical para ambos experimentos y sus diferencias.

5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Con este trabajo se ha pretendido introducir al lector en el problema de la regionalización meteorológica, más concretamente en la regionalización dinámica del viento y aportar unas pequeñas nociones de las posibilidades de un modelo mesoescalar. Se ha escogido el modelo MM5 por ser el más conocido, de libre disposición e integrable en un gran número de plataformas.

Se han presentado de forma sucinta dos ejemplos de integraciones realizadas por el grupo MCAM (Meteorology and Climate Applications and Modelling) de la Universidad Complutense de Madrid y el CIEMAT. Los resultados presentados indican que MM5 es a priori una herramienta de gran utilidad para el diagnóstico y predicción del viento al nivel de utilización en parques eólicos. También se ha presentado que el modelo es capaz de simular efectos locales del viento tan complejos como el drenaje de los vientos catabáticos y la formación de chorros nocturnos en condiciones de estabilidad. Por otro lado se ha mostrado la utilidad del modelo para fines de investigación y como una herramienta con posible utilidad en la toma de decisiones, por ejemplo, en las que hacen referencia a la evaluación de impactos ambientales.

En resumen, los modelos de mesoescala se presentan aquí como una potente herramienta para la predicción meteorológica regional y se pueden usar tanto para labores operativas de diversa índole como de investigación.

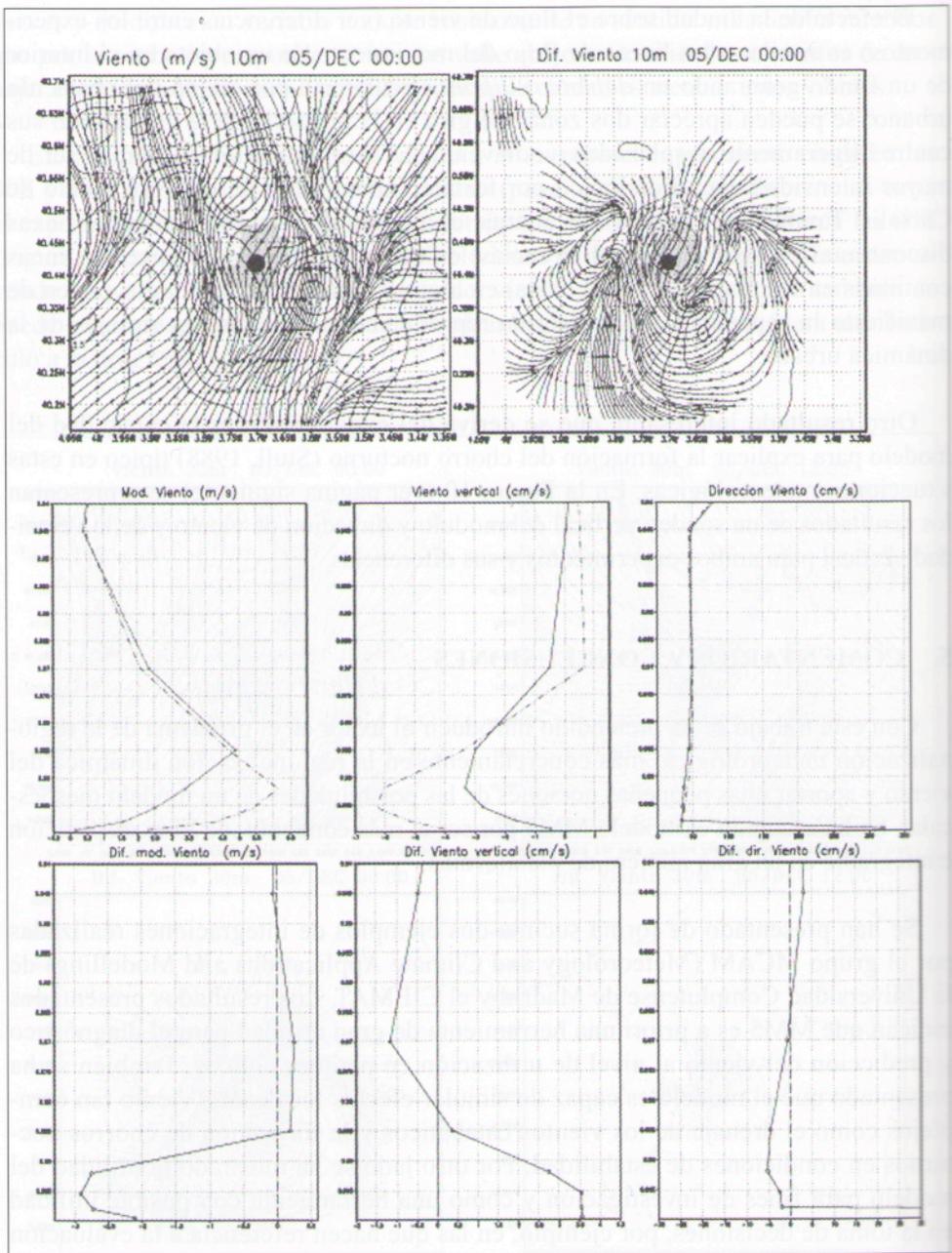


Figura 10. En el panel superior se representa el viento a 10 m para el experimento urbano y las diferencias con respecto al rural. En el resto se representan las variaciones del viento y diferencias con la altura en el punto indicado en la figura de los paneles superiores.

REFERENCIAS

- Anthes, R, y Warner, T. (1978): *Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meteorological studies*. Mon. Wea. Rev. 106,1045-1078.
- Cubasch, U., Von Storch, H., Waszkezewitz, J. y Zorita E. (1996): *Estimates of climate changes in southern Europe using different downscaling techniques*. Clim. Res., 7, 129-149.
- Doms, G., Schättler, U. *The nonhydrostatic limited-area model LM (Lokal Modell) of DWD, Part I: Scientific documentation*, Deutscher Wetterdienst, Meteorologische Analyse und Modellierung, Postfach 10 04 65, 63004 Offenbach, Germany, 1999.
- 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, 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.
- Giorgi, F., Shields, C. y Batesand, G. T. (1994) *Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model: spatial and seasonal characteristics*. J. Climate, 7, 375-399.
- 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.
- Hodur, R. M. (1996) *The U. S. Navy's Coupled Ocean Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS)*", Monthly Weather Review, 7, 375-399.
- Kalnay, E., et al., (1996) : *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. Bull. Amer. Met. Soc., 77, 437-471.
- Landsberg, H.E. (1981): *The Urban Climate*. New York: Academic Press.
- Majewski, D., 1991: *The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst*, ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models, Vol.2, 147-191.

- Machenhauer, B. (1998) *HIRLAM Final Report*. Copenhagen.
- Michalakes, J., J. Dudhia, D. Gill, J. Klemp And W. Skamarock (1998). *Design of a next-generation regional weather research and forecast model : Towards Teracomputing*, World Scientific, River Edge, New Jersey, 1998, pp. 117-124.
- Montávez, J.P., Rodríguez, A.J., y Jiménez, J.I. (2000): *A Study of the Urban Heat Island of Granada*. I. J. Climatol. 20, pp 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.
- Oke, T.R. (1987): *Boundary Layer Climates*. London and New York: Routledge.
- Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn, D.G., Watson, I.D., y Voogt, J.A. (1991): *Simulation of Surface Urban Heat Island under Ideal Conditions at Night. Part II, Diagnosis of Causation*. Boundary-Layer Meteorol.56 , pp 339-358.
- Pielke, R.: (1984). *Mesoscale Meteorological Modeling*. Orlando: Academic Press.
- Seaman, N. (1989): *Comparations between observed data and simulation results on the urban heat island circulation*. J. Appl. Meteorol. 19, pp 761-770.
- Stull, R. (1988): *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Von Storch, H., Langenberg, H. Y Feser, F. (2000): *A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes*. Mon. Wea. Rev. 128, 3664-3673.
- Wilby, R. L. y Wigley, T. M. L. (1997): *Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations*. Prog. Phys. Geogr., 21, 530-548.
- Zorita, E., Kharin, V. y Von Storch, H. (1992): *The atmospheric circulation and sea surface temperature in the North Atlantic Area in winter: their interaction and relevance for Iberian precipitation*. J. Climate, 5, 1097-1108.
- Zorita, E. y Von Storch, H. (1999): *The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods*. J. Climate, 12, 2474-2489.