

PREDICCIÓN DE CAMPOS DE VIENTO A ESCALA LOCAL COMBINANDO EL MM5 Y UN MODELO DE MASA CONSISTENTE

**Elba Rodríguez, Eduardo Rodríguez, Gustavo Montero,
Rafael Montenegro, José María Escobar**

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Edif. Central del Parque Científico y Tecnológico
Campus Universitario de Tafira
35017 – Las Palmas de G.C.
e-mail: elba.rodriguez@estudiantes.ulpgc.es

Palabras clave: MM5, Modelos de masa consistente, Simulación numérica de campos de viento, Elementos finitos, Mallas adaptativas

Resumen. *El MM5 es uno de los modelos atmosféricos de predicción a corto plazo más extendidos entre la comunidad internacional que trabaja en la modelización atmosférica. A partir de su uso podemos obtener información meteorológica con una resolución máxima de $1 \times 1 \text{ km}^2$. Esto supone ciertas limitaciones para su aplicación en el caso de orografías muy complejas. En cambio, los modelos adaptativos de masa consistente para ajuste de campos de viento permiten resolver a escala local con alta precisión. Sin embargo, estos últimos adolecen del carácter predictivo del primero, siendo necesario disponer de datos de velocidades de viento de entrada para el mismo. El objetivo de este trabajo es desarrollar una interfase entre ambos modelos que permita utilizar como campo inicial del modelo de masa consistente los resultados obtenidos a partir del MM5. Para ello será necesario definir un método adecuado de interpolación de velocidades para pasar los datos de la malla grosera del MM5 a la malla adaptativa de tetraedros del modelo de masa consistente. Finalmente, se presentarán aplicaciones del procedimiento propuesto en este trabajo.*

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España y FEDER, proyecto; CGL 2004-06171-C03-02/CLI.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de las predicciones meteorológicas crece día a día en nuestra sociedad. El aumento de la fiabilidad de las mismas, tanto temporal como espacial, se hace fundamental para muchas de las actividades sociales e industriales. En particular, el Real Decreto 436/2004, de 12 de Marzo, obliga a que todas las instalaciones con potencias superiores a 10MW deban comunicar a la distribuidora una previsión de energía eléctrica a ceder a la red en cada uno de los períodos de programación del mercado de producción de energía eléctrica. Así mismo deberán comunicar las previsiones de los 24 períodos de cada día con al menos 30 horas de antelación respecto al inicio de dicho día.

Los modelos numéricos meteorológicos tales como el MM5, pueden ser utilizados para la simulación de contaminación atmosférica, prevención y extinción de incendios, predicción del estado de la mar y predicción de potencia eólica o solar. El MM5 nos proporciona información meteorológica con una resolución máxima de $1 \times 1 \text{ km}^2$. A partir de ahí tendremos que desarrollar una interfase que permita incorporar la información obtenida a partir del MM5 como entrada a un modelo de masa consistente con elementos finitos adaptativos. Este modelo tiene una mayor resolución que el anterior, siendo capaz de resolver a escala de metros. Por ello, el uso de nuestro modelo de masa consistente proporcionará resultados con una mayor resolución que el modelo MM5, estimando previsiblemente mejor la potencia suministrada por los parques eólicos. En la sección 2 expondremos las principales características que posee el modelo de mesoescala MM5, así como las principales ecuaciones en las que está basado. La sección 3 se dedica a la introducción del modelo tridimensional de masa consistente para ajuste de campos de viento utilizando mallas adaptativas de tetraedros. En particular, la generación de mallas, así como su adaptación al terreno utilizando técnicas de refinamiento/desrefinamiento se estudiará en la sección 4. La técnica seguida para la construcción del campo inicial de velocidades de viento, punto de partida del modelo de masa consistente, a partir de las velocidades de viento proporcionadas por el MM5 sobre la superficie del terreno, se presenta en la sección 5. En la sección 6, desarrollamos experimentos numéricos para la evaluación de las medidas de viento en los diferentes puntos de control. Finalmente, resumimos las conclusiones derivadas de este estudio y los trabajos futuros necesarios para completarlo y mejorarlo.

2. MM5

El modelo MM5 es un modelo comunitario de acceso totalmente libre basado en las ecuaciones no hidrostáticas, soportado por NCAR (National Center for Atmospheric Research),[1].

Las principales características de este modelo son:

- (i) Capacidad de anidamiento múltiple con interacción en ambas direcciones (two-way) entre los dominios, lo que facilita el estudio de fenómenos atmosféricos bajo distintas escalas espaciales y el diseño de predicciones a muy alta resolución.

- (ii) Formulación de una dinámica no hidrostática en diferencias finitas, la cual permite que el modelo pueda ser empleado eficazmente para representar fenómenos con dimensiones de muy pocos kilómetros.
- (iii) Adaptación informática para múltiples plataformas y para su ejecución en modo multitarea sobre computadoras de memoria compartida o distribuida.
- (iv) Inicialización automática con diferentes fuentes de análisis meteorológicos y observaciones, incluyendo su capacidad de asimilación 4-dimensional de datos.
- (v) Asimilación variacional de datos convencionales y de satélite durante la predicción.
- (vi) Incorporación de los más modernos y realistas esquemas de parametrización de los procesos físicos relacionados con la radiación atmosférica, microfísica de nubes y precipitación, convección por cúmulos, turbulencia, y flujos de energía y momento sobre la superficie terrestre.

La información que nos proporciona el MM5 será: Las velocidades de viento horizontales, u (m/s) y v (m/s), la temperatura (K), la razón de mezcla del vapor de agua (kg/kg) (cantidad del meteoro considerado en Kg por cada Kg de aire), la razón de mezcla del agua de nube (kg/kg), la razón de mezcla del hielo de nube (kg/kg), la razón de mezcla de nieve (kg/kg), graupel (kg/kg), número de concentración de hielo, turbulencia obtenida a partir del modelo $k - e$ (j/kg), tendencia de radiación atmosférica (K/día), w (m/s) velocidad vertical del viento (sobre niveles σ , following terrain coordinates reference) y la perturbación de la presión (Pa). Se utilizan diferentes paquetes de los que consta el modelo empezando por el paquete TERRAIN, el cual interpola horizontalmente la elevación del terreno y el uso de suelos en los dominios de mesoescala escogidos para ejecutar el modelo meteorológico. También se encargará de calcular latitud y longitud, factor de escala del mapa y parámetro de Coriolis en cada punto de la malla horizontal. A partir de los resultados de TERRAIN. REGRID será el encargado de leer los ficheros meteorológicos y/o análisis en niveles de presión de la malla original y transferirlos a la malla de cálculo definida por el pre-procesador TERRAIN. PREGRID, lee los datos meteorológicos y REGRIDDER, interpola los datos a la malla horizontal de cálculo del MM5, generada por TERRAIN. A continuación el paquete INTERPF realiza la transformación de los datos de análisis y/o predicción meteorológica a datos para el modelo de mesoescala. Para ello la información relativa de presión se convierte en niveles sigma utilizando la siguiente relación:

$$P_{ijk} = \sigma_k \times p_{ij}^* + P_{top} \quad (1)$$

donde $\sigma = 1$ corresponde al suelo y $\sigma = 0$ a la frontera superior del dominio en estudio, p^* será la diferencia aritmética entre la presión en superficie y la constante de presión en la cima y finalmente (P_{top}), P_{top} será la constante de presión en la cima del modelo.

Finalmente, el paquete MM5 constituye la parte del sistema de modelización meteorológica que realiza la predicción numérica. Las ecuaciones básicas que utiliza son las siguientes: Ecuación de la presión:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot \mathbf{V} = -\mathbf{V} \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (2)$$

donde $p = p_0 + p'$, $\gamma = c_p/c_v$, c_p y c_v son los calores específicos, g es la gravedad, w la velocidad del viento en la vertical, T la temperatura, $\rho = \rho_0 + \rho'$ la densidad, \mathbf{V} el vector de la velocidad horizontal, \dot{Q} el calor cedido al sistema dependiente del tiempo y finalmente $\theta = \theta_0 + \theta'$ la temperatura potencial.

Ecuación de momento (componente x)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla u + \nu \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - \nu \frac{\partial m}{\partial x} \right) - e w \cos \alpha - \frac{u w}{r_{earth}} + D_u \quad (3)$$

donde $e = 2\Omega \cos \lambda$ y $\alpha = \phi - \phi_c$, siendo λ la latitud, ϕ la longitud y ϕ_c la longitud central. Ecuación de momento (componente y)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - \nu \frac{\partial m}{\partial x} \right) - e w \sin \alpha - \frac{\nu w}{r_{earth}} + D_v \quad (4)$$

Ecuación de momento (componente z)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g}{\gamma p} p' = -\mathbf{V} \cdot \nabla w + g \frac{p_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} + e (u \cos \alpha - \nu \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{earth}} + D_w \quad (5)$$

donde u y v serán las velocidades horizontales, w la velocidad vertical, $p^* = p_{sup} - p_{top}$, r_{earth} será la curvatura de la tierra, R_d la constante de los gases y $D_w = \frac{Dw}{Dt} + \alpha \frac{\partial p}{\partial z} + g$ Termodinámica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (6)$$

Términos de Advección

$$\mathbf{V} \cdot \nabla A \equiv m u \frac{\partial A}{\partial x} + m v \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (7)$$

donde

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v \quad (8)$$

siendo m el factor de escala del mapa.

Término de Divergencia

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (9)$$

donde $\sigma = \frac{p_0 - p_{top}}{p^*}$

3. MODELO DE MASA CONSISTENTE EN 3-D

Este modelo, [2] está basado en la ecuación de continuidad para un fluido incompresible, considerando constante la densidad del aire en el dominio Ω y condiciones de impermeabilidad en Γ_b , es decir, en el terreno y en la frontera superior.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad \text{en } \Omega \quad (10)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0 \quad \text{en } \Gamma_b \quad (11)$$

Se formula un problema de mínimos cuadrados en Ω con el objetivo de ajustar $\vec{u}(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w})$

$$E(\vec{u}) = \int_{\Omega} [\alpha_1^2 ((\tilde{u} - u_0)^2 + (\tilde{v} - v_0)^2) + \alpha_2^2 (\tilde{w} - w_0)^2] d\Omega \quad (12)$$

donde el viento interpolado $\vec{v}_0 = (u_0, v_0, w_0)$ se obtiene a partir de medidas experimentales y α_1, α_2 son los módulos de precisión de Gauss. El problema equivale a encontrar el punto silla (\vec{v}, ϕ) del Lagrangiano, [3].

$$E(\vec{v}) = \min_{\vec{u} \in K} \left[E(\vec{u}) + \int_{\Omega} \phi \vec{\nabla} \cdot \vec{u} d\Omega \right] \quad (13)$$

siendo $\vec{v} = (u, v, w)$, ϕ el multiplicador de Lagrange y K el conjunto admisible de funciones. Aplicando la técnica de los multiplicadores de Lagrange para minimizar 13, resultan las siguientes ecuaciones de Euler-Lagrange

$$u = u_0 + T_h \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = v_0 + T_h \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad w = w_0 + T_v \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (14)$$

donde $T = (T_h, T_h, T_v)$ es el tensor diagonal de transmisividad, con $T_h = \frac{1}{2\alpha_1^2}$ y $T_v = \frac{1}{2\alpha_2^2}$. Como α_1 y α_2 son constantes en Ω , de la aproximación variacional resulta un problema elíptico al sustituir 14 en 10.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{T_v}{T_h} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{1}{T_h} \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right) \quad \text{en } \Omega \quad (15)$$

Se consideran condiciones de tipo Dirichlet en las fronteras abiertas del dominio y de tipo Neumann en el terreno y frontera superior

$$\phi = 0 \quad \text{en } \Gamma_a \quad (16)$$

$$\vec{n} \cdot T \vec{\nabla} \mu = -\vec{n} \cdot \vec{v}_0 \quad \text{en } \Gamma_b \quad (17)$$

El problema definido por las ecuaciones 15–17 se resuelve usando elementos finitos con mallas de tetraedros.

4. ADAPTACIÓN DE MALLAS AL TERRENO

El proceso de generación de mallas comienza con la determinación de la localización de los nodos en superficie. Su distribución debería ser adaptada a las características de la orografía y la rugosidad para así minimizar el número de nodos requeridos. El primer procedimiento será construir un conjunto de mallas anidadas $T = \{\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_m\}$, procedentes de la triangulación regular τ_1 de la región rectangular estudiada, tal que el nivel τ_j sea obtenido por el refinamiento global de los niveles previos τ_{j-1} con el algoritmo 4-T de Rivara, [4]. Todos los triángulos del nivel τ_{j-1} son divididos en 4 subtriángulos con un nuevo nodo en el punto medio de los bordes y conectando los nodos insertados en los bordes con el vértice opuesto y con los otros dos nuevos nodos. De esta manera, en el nivel de malla τ_j , aparecen nuevos nodos, bordes y triángulos que son definidos como corresponde al nivel j . El número de niveles m de la secuencia es determinado por los grados de discretización del terreno, por ejemplo, el diámetro de la triangulación τ_m debería ser del orden del paso espacial del mapa digital que nosotros estemos usando (el paso espacial del mapa de longitud de rugosidad es frecuentemente mayor o igual que el mapa orográfico). Por ello, nosotros podemos asegurar que la malla regular es capaz de capturar toda la información orográfica y de rugosidad para la interpolación de la altura y longitud de rugosidad en los nodos de la malla. Finalmente, definimos una nueva secuencia $T' = \{\tau_1 < \tau_2' < \dots < \tau_{m'}'\}$, $m' \leq m$, aplicando el algoritmo de desrefinamiento, [5, 6]. Seguidamente los dos parámetros de desrefinamiento ϵ_h y ϵ_r son introducidos determinando así la precisión de la aproximación de la superficie del terreno y la longitud de rugosidad. La diferencia absoluta entre la altura obtenida en un punto de la malla $\tau_{m'}'$ y la altura exacta será menor que ϵ_h . Una condición similar se estableció para la rugosidad y ϵ_r . Un nodo puede ser eliminado solamente si se verifica las dos condiciones de desrefinamiento simultáneamente.

4.1. Refinamiento local alrededor de un punto de control.

El resultado de las mallas adaptadas a la orografía y a la rugosidad no es siempre suficiente para asegurar una precisión preinscrita del modelo numérico en algunas regiones del dominio y ello puede requerir una discretización más fina. Nosotros tenemos que resolver este problema para redefinir la malla de la superficie del terreno en esas regiones tal que los nodos insertados dentro no son eliminados después de que se haya producido el proceso de desrefinamiento. La función de espaciado vertical y el algoritmo de triangulación 3-D de Delaunay, [7, 8, 9] completa nuestro generador de mallas 3-D, proporcionará una malla de tetraedros refinada alrededor de las regiones seleccionadas. Por lo que el usuario puede definir la forma y localización de esas regiones y el número adicional de subdivisiones de triángulos que será llevada a cabo para obtener el tamaño de elemento requerido.

5. CONSTRUCCIÓN DEL CAMPO INICIAL A PARTIR DE LAS VELOCIDADES PROPORCIONADAS POR EL MM5 SOBRE LA SUPERFICIE DEL TERRENO

EL MM5 proporciona medidas de velocidades en m/s sobre el terreno a una altura z_s de 10 m en cada punto de grid mediante una técnica de parametrización. La localización de los puntos de grid se encontrarán en aquellos lugares donde seamos capaces de contrastar resultados, por ello será necesario tener una distribución adecuada de los mismos por todo el dominio de estudio. La dirección del viento viene en grados sexagesimales medidos en sentido horario y tomando como referencia la dirección norte. El cambio al sistema clásico antihorario, se realiza de la siguiente manera:

$$\alpha' = 180 + \theta' + \phi_g \quad (18)$$

donde, si $\bar{\theta}$ es el ángulo de las velocidades en las estaciones dados en grados norte y sentido horario, entonces θ' es su complementario, asumiendo que el viento en la superficie gira un ángulo ϕ_g con respecto a la dirección del viento geostrófico \bar{V}_g .

5.1. Interpolación horizontal

La técnica más común de interpolación se formula en términos de la inversa de la distancia al cuadrado entre el punto y la estación de medida, [3]. Sin embargo, otros autores usan simplemente la altitud de dichos puntos, [10]. Aquí se considera una fórmula que tiene en cuenta ambas consideraciones,

$$\vec{v}(z_e) = \epsilon \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\vec{v}_n}{d_n^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{d_n^2}} + (1 - \epsilon) \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\vec{v}_n}{|\Delta h_n|}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{|\Delta h_n|}} \quad (19)$$

El valor de \vec{v}_n corresponde a la velocidad obtenida en cada punto de grid por el MM5 n , donde N es el número de estaciones utilizadas en la interpolación, d_n es la distancia horizontal desde la estación n hasta el punto donde estamos calculando la velocidad del viento, $|\Delta h_n|$ es la diferencia de altura entre la estación n y el punto de estudio, y ϵ es un parámetro que toma valores entre 0 y 1. Cuando $\epsilon \rightarrow 1$, aumenta la importancia de la distancia horizontal de cada punto a las estaciones de medida. Esta aproximación se emplea en problemas con una orografía regular o en análisis bidimensionales. De manera análoga, si $\epsilon \rightarrow 0$, entonces la diferencia de altura entre cada punto y las estaciones de medida resulta determinante en detrimento de la distancia horizontal. Esta segunda aproximación se usa cuando la orografía del terreno es irregular. En la práctica, la regiones geográficas estudiadas suelen combinar zonas de orografía irregular con otras orografías más regulares, por lo que tomar un valor intermedio de ϵ suele ser lo más apropiado.

5.2. Extrapolación vertical

Se considera un perfil logarítmico lineal, [2] en la capa límite planetaria, que tiene en cuenta la interpolación horizontal, [11] el efecto de la rugosidad en la intensidad y dirección

del viento, y la estabilidad del aire (neutra, estable o inestable) según la clasificación de Pasquill. En la capa superficial se construye un perfil logarítmico de velocidades de viento definido por,

$$\vec{v}_0(z) = \frac{\vec{v}^*}{k} \left(\log \frac{z}{z_0} - \phi_m \right) \quad z_0 < z \leq z_{sl} \quad (20)$$

donde \vec{v}_0 es la velocidad del viento, $k \approx 0,4$ es la constante de von Karman y z es la altura sobre el terreno del punto estudiado. El término \vec{v}^* representa la velocidad de fricción. En el flujo turbulento atmosférico las fuerzas que se oponen al movimiento están caracterizadas por la acción que ejercen las rugosidades propias de la orografía del terreno. La velocidad de fricción se obtiene en cada punto a partir de las medidas interpoladas a la altura de las estaciones (interpolación horizontal),

$$\vec{v}^* = \frac{k\vec{v}_0(z_e)}{\log \frac{z_e}{z_0} - \phi_m(z_e)} \quad (21)$$

Asimismo, z_0 corresponde a la longitud de rugosidad de la zona. El concepto de longitud de rugosidad viene a definir una altura por encima del terreno diferente de $z = 0$, donde, en teoría de la capa superficial, la velocidad del viento es cero. El valor de z_0 depende de las características del terreno. Una forma de estimarla es mediante valores estándar para diferentes tipos de terreno, [12]. Otros autores la definen como $z_0 = \frac{e}{30}$, donde e es la altura media de los obstáculos existentes en la zona de estudio.

Por último, ϕ_m es una función que depende de la estabilidad del aire, [13]

$$\phi_m = 0 \quad (\text{neutra}) \quad (22)$$

$$\phi_m = -5\frac{z}{L} \quad (\text{estable}) \quad (23)$$

$$\phi_m = \log \left[\left(\frac{\theta_m^2 + 1}{2} \right) \left(\frac{\theta_m + 1}{2} \right)^2 \right] - 2 \arctan \theta_m + \frac{\pi}{2} \quad (\text{inestable}) \quad (24)$$

donde

$$\phi_m = \left(1 - 16\frac{z}{L} \right)^{1/4} \quad (25)$$

El viento geostrófico es una buena aproximación al viento real con flujo uniforme en la alta atmósfera (atmósfera libre), donde la fricción y las aceleraciones no son importantes. Los valores de dicho viento geostrófico se tomarán a partir de un valor medio de la velocidad del viento proporcionada por el MM5 a una cierta altura, donde este se mantiene aproximadamente constante. En nuestro modelo, desde z_{sl} hasta z_{pbl} se realiza una interpolación lineal en $\rho(z)$ con el viento geostrófico \vec{v}_g

$$\vec{v}_0(z) = \rho(z) \vec{v}_0(z_{sl}) + [1 - \rho(z)] \vec{v}_g \quad \text{con} \quad z_{sl} < z \leq z_{pbl} \quad (26)$$

donde $\rho(z)$ es

$$\rho(z) = 1 - \left(\frac{z - z_{sl}}{z_{pbl} - z_{sl}} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{z - z_{sl}}{z_{pbl} - z_{sl}} \right) \quad (27)$$

Finalmente, este modelo considera

$$\vec{v}_0(z) = \vec{v}_g \quad \text{si} \quad z > z_{pbl} \quad (28)$$

$$\vec{v}_0(z) = 0 \quad \text{si} \quad z \leq z_0 \quad (29)$$

6. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

El caso estudiado corresponde a una zona localizada en la región de Lugo, a 43N de latitud, que está definida por cuatro puntos dados en coordenadas UTM A(609980,4799020), B(626000,4799020), C(626000,4813040) y D(609980,4813040). Las alturas mínima y máxima serán de 420m y 1020m respectivamente. El mapa digital de la topografía ha sido proporcionado por la compañía DESA (Desarrollos Eólicos, S.A.) sobre una malla de cuadrículas de 20×20 m. El eje X corresponde a la dirección Este-Oeste y el eje Y a la dirección Norte-Sur. En este experimento se ha utilizado un dominio de 16020×14020 m y altura máxima de 4000m. El cuadro 1 muestra la topografía del terreno, donde asimismo se ha representado las estaciones de medida (puntos de control donde se dispone de datos de velocidades de viento), encontrándonos de Norte a Sur, E243, E208, E212, E242, E206 y E283. La tabla 1 contiene las coordenadas de sus ubicaciones.

Para nuestra simulación numérica con el paquete MM5, construimos previamente tres dominios anidados, centrados aproximadamente en la zona donde están ubicadas las estaciones disponibles. El dominio más grosero se define con una resolución de 18 km y una malla de 40×40 , el intermedio corresponde a una resolución de 6 km y una malla de 52×52 y, finalmente, el más fino posee una resolución de 2 km y una malla de 94×94 . El período de tiempo en el que se estudia el fenómeno es desde el 20/03/2003 a las 00h. hasta el día 23/03/2003 a las 18h. Se plantea la obtención de datos cada diez minutos a partir del MM5, centrándonos únicamente en los resultados obtenidos para el dominio más fino.

Estation	UTM-E	UTM-N	Altitud
E206	615396	4805218	924.8
E208	616917	4807256	945.0
E212	617423	4806382	895.0
E242	618290	4806136	873.2
E243	616629	4808235	947.0
E283	617473	4804111	849.0

Cuadro 1: Coordenadas en *m* de las estaciones de medida.

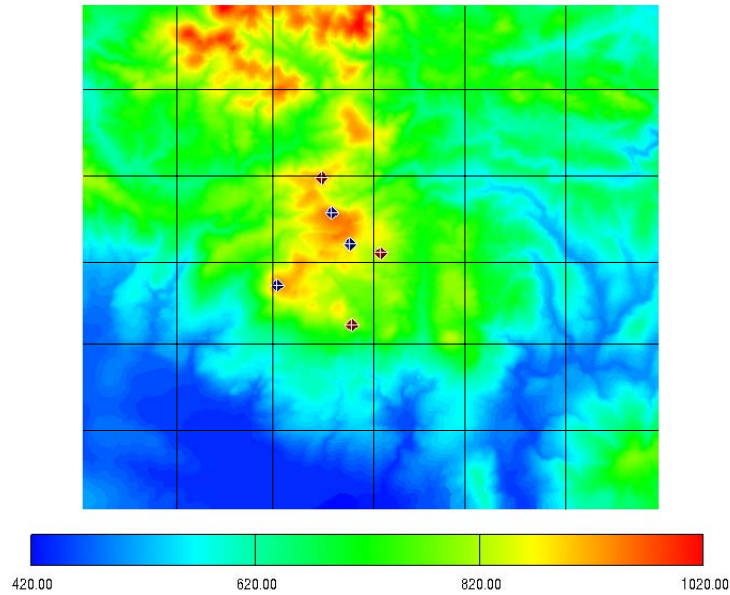


Figura 1: Mapa Topográfico de la región de estudio en Lugo. De Norte a Sur, podremos ver los siguientes puntos de control E243, E208, E212, E242, E206 and E283.

A partir de los resultados obtenidos por el MM5 para el episodio estudiado, hemos extraído el valor de la velocidad de viento en un *grid* definido a 10 m sobre el terreno mediante la técnica de parametrización de que dispone el modelo. El *grid* consta de 30 puntos, de los cuales 24 han sido equidistribuidos en la zona de estudio y los 6 restantes coinciden con los puntos de control, tal y como se muestra en la figura 1.

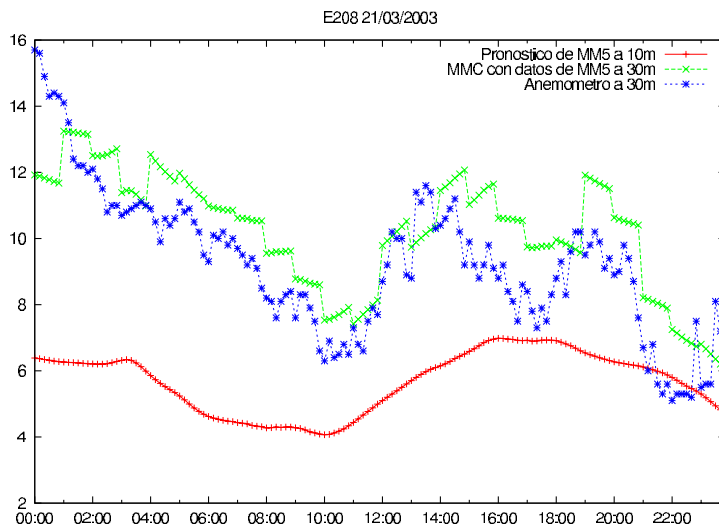


Figura 2: punto de control E208 a 30 m.

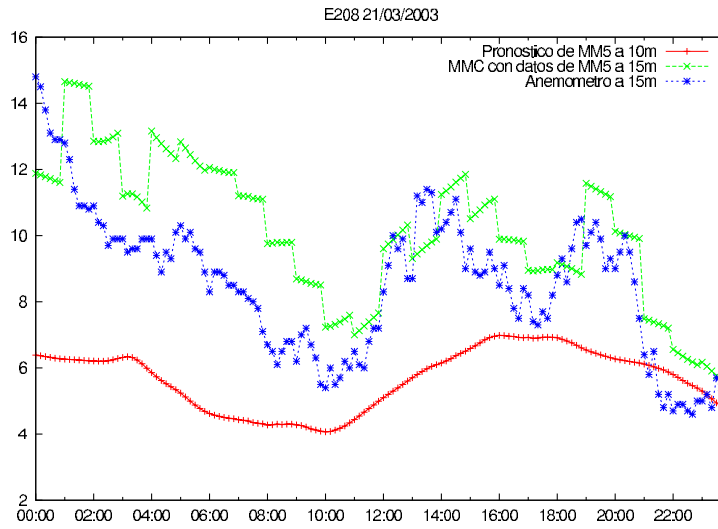


Figura 3: punto de control E208 a 15 m.

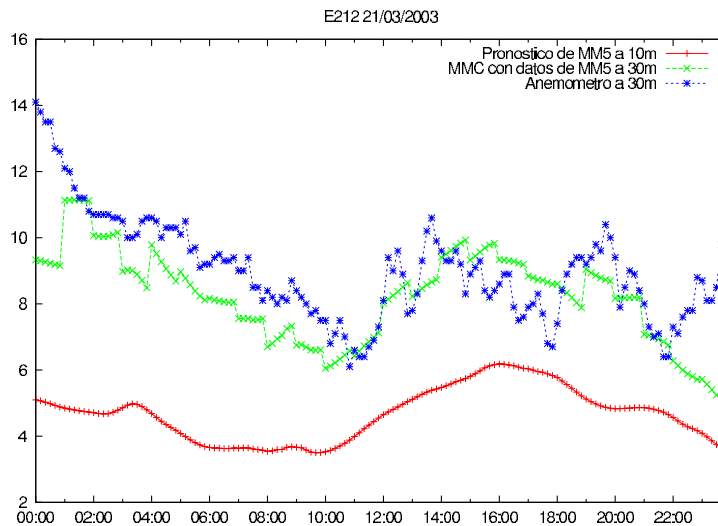


Figura 4: punto de control E212 a 30 m.

Con los valores de velocidad obtenidos en dichos puntos se construye, mediante las técnicas de interpolación horizontal y extrapolación vertical descritas en la sección 5, el campo inicial correspondiente a cada paso de tiempo que utilizará nuestro modelo de masa consistente. En la aplicación del modelo de masa consistente, hemos estimado los parámetros que gobiernan el modelo, en particular α, ϵ y γ , mediante algoritmos genéticos minimizando una función objetivo definida en términos del error cometido en los puntos de control (ver, por ejemplo, [15, 16]). Esta estimación se ha actualizado para cada hora del episodio.

En las gráficas 2-8 se muestran las medidas de velocidades de viento tomadas con

el anemómetro (en azul), los valores obtenidos con el modelo de masa consistente a la misma altura que las estaciones de medida (verde) y los resultados del MM5 a 10 m sobre el terreno (roja), para los puntos de control E208, E212, E242, E206 y E283. Para la estación E243 no se representan los resultados ya que en el episodio concreto que se ha estudiado no habían medidas disponibles.

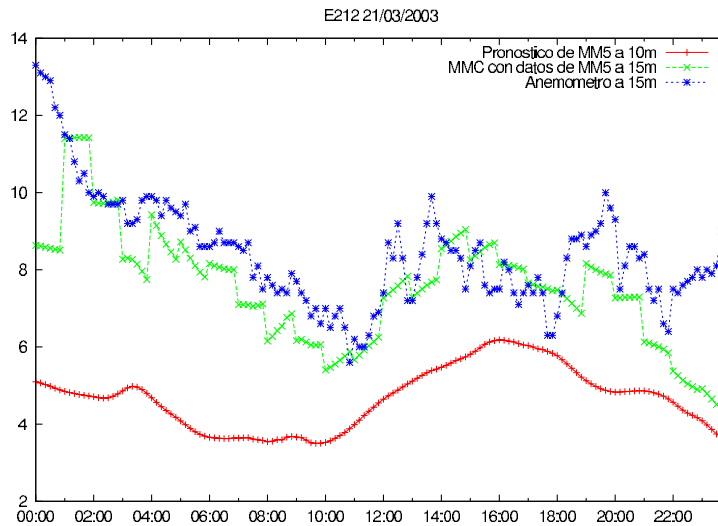


Figura 5: punto de control E212 a 15 m.

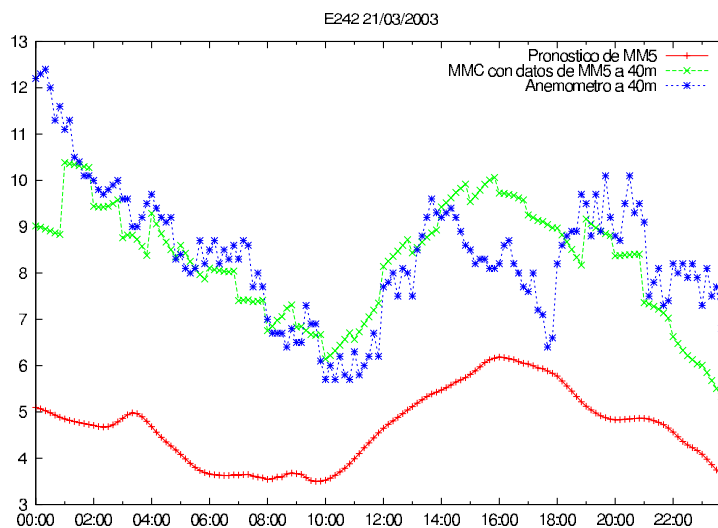


Figura 6: punto de control E242 a 40 m.

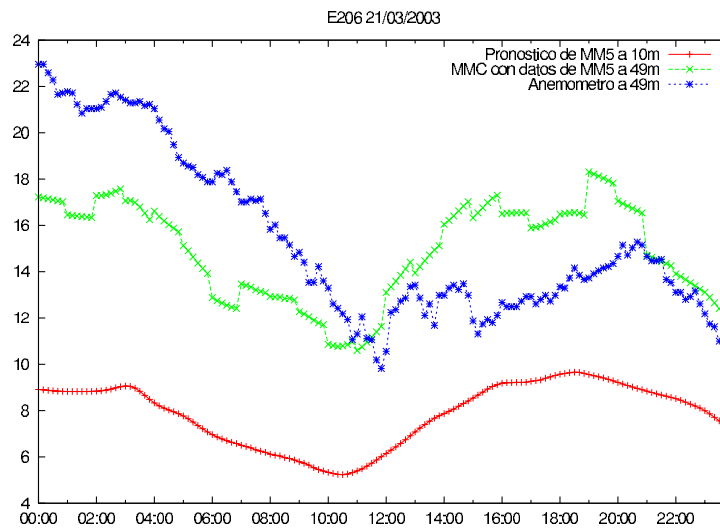


Figura 7: punto de control E206 a 49 m.

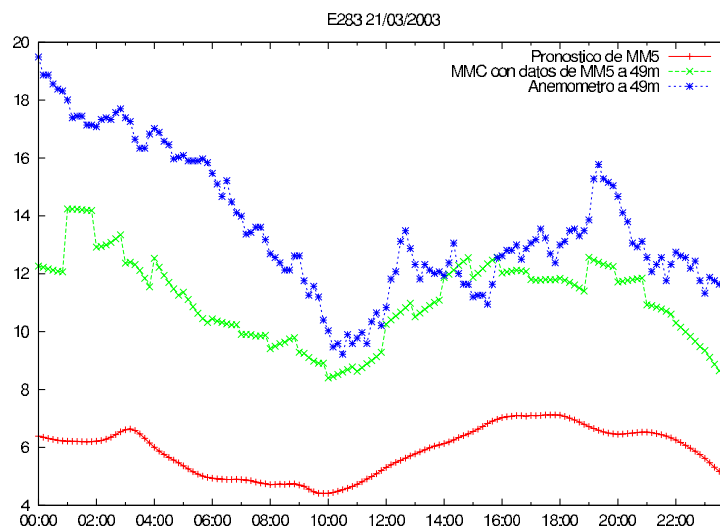


Figura 8: punto de control E283 a 49 m.

En general, se puede observar que el MM5 predice razonablemente la evolución de las velocidades de viento a lo largo del episodio, si bien se observan mayores errores en el período nocturno. No obstante, nuestro modelo de masa consistente ha sido capaz de mejorar notablemente dichos resultados, acercando las curvas de velocidades obtenidas a las curvas de velocidades medidas. En principio, esto podría explicarse desde el punto de vista de que nuestro modelo tridimensional utiliza más información local sobre topografía y perfil de viento, así como mallas de tetraedros suficientemente refinadas en las zonas donde se necesita mayor precisión. Asimismo, la utilización del método de elementos finitos generalmente produce mejores resultados que diferencias finitas. Sin embargo, no podemos ignorar que los parámetros del modelo se han estimado para minimizar el error

en las estaciones y esta técnica no siempre es posible puesto que para ello es necesario disponer de medidas en un cierto número de estaciones. Esto resulta evidente en el caso de que la simulación esté orientada a la predicción. En estos casos será necesario definir a partir de un histórico la forma de asignar valores a los parámetros que gobiernan el modelo de forma directa sin tener que recurrir a su estimación mediante técnicas de optimización.

7. CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo tridimensional de masa consistente para ajuste de campos de viento utilizando elementos finitos con mallas adaptadas de tetraedros. En el modelo se parte de resultados de velocidades sobre la superficie del terreno que proporciona el MM5. De los experimentos numéricos realizados podemos concluir que la solución que aporta el Modelo de Masa Consistente conjuntamente con el MM5, mejora considerablemente los resultados de este último, aunque para ello es necesario ajustar periódicamente los parámetros que gobiernan el modelo.

Si bien las aportaciones de este trabajo corresponden a estudios preliminares de un modelo mucho más complejo que se está desarrollando en la actualidad, los resultados obtenidos son bastante esperanzadores y permiten afirmar que la combinación presentada de nuestro modelo de masa consistente con el MM5 puede ser una herramienta eficiente para la predicción del potencial eólico de una región, además de su aplicación para la elaboración de mapas eólicos.

Para evitar errores, lo adecuado sería disponer de un histórico del lugar de estudio para estimar los parámetros óptimos y no tener que adaptarlos periódicamente. También sería conveniente evitar la parametrización del MM5 a 10 m y utilizar los datos de velocidad horizontal U y V obtenidos sobre el *grid* del MM5. Otro aspecto interesante sería estudiar técnicas para interpolar adecuadamente estos resultados y de esta forma evitar la interpolación horizontal y extrapolación vertical de nuestro modelo.

REFERENCIAS

- [1] MM5 Community Model, <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>
- [2] D. Lalas y C. Ratto, *Modelling of Atmospheric Flow Fields*, World Sci., Singapore, (1996).
- [3] G. Winter, G. Montero, L. Ferragut, R. Montenegro, *Adaptative strategies using standard and mixed finite elements for wind field adjustment*, Solar energy, Vol. **54(1)**, pp. 49–56, (1995).
- [4] M.C. Rivara, *A Grid Generator Based on 4-Triangles Conforming Mesh-Refinement Algorithms*, Int J Num Meth Engrg, Vol. **24**, pp. 1343–1354, (1987).

- [5] L. Ferragut ,R. Montenegro, A. Plaza, *Efficient refinement/derefinement algorithm of nested meshes to solve evolution problems*, Comm Num Meth Engrg, Vol. **10**, pp. 403–12, (1994).
- [6] A. Plaza , R. Montenegro , L. Ferragut, *An improved derefinement algorithm of nested meshes*, Advances in Engineering Software, Vol. **27 (1-2)**, pp. 51–57, (1996).
- [7] R. Montenegro, G. Montero, J.M. Escobar, E. Rodríguez, J.M. González- Yuste, *Tetrahedral Mesh Generation for Environmental Problems over Complex Terrain*, Lect Notes Comp Sci, Vol. **2329**, pp. 335-44, (2002).
- [8] R. Montenegro, G. Montero, J.M. Escobar, E. Rodríguez, *Efficient Strategies for Adaptive 3-D Mesh Generation over Complex Orography*, Neural, Par Sci Comput, Vol. **10**, pp. 57–76, (2002).
- [9] G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar, E. Rodríguez, *Generación automática de mallas de tetraedros adaptadas a orografías irregulares*, Rev Int Mét Num Cálculo Dis Ing, Vol. **19 (2)**, pp. 127-44, (2003).
- [10] I. Palomino, F. Martín, *A simple method for spatial interpolation of the wind in complex terrain*, J. Appl. Meteor, Vol. **34**, pp. 1678–1693, (1995).
- [11] G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar, *A 3-D Diagnostic Model for Wind Field Adjustment*, J Wind Engrg Ind Aer, Vol. **74-76**, pp. 249—61, (1998).
- [12] G.J. McRae, W.R. Goodin, J.H. Seinfeld, *Development of a second generation mathematical model for urban air pollution I. Model formulation*, Atm Env, Vol. **16 (4)**, pp. 679—696, (1982).
- [13] P. Zannetti, *Air Pollution Modeling*, Comput Mech Publ, Boston, (1990).
- [14] C. Ratto, The Aiolos and Winds Codes, en *Modelling of Atmospheric Flow Fields*, D.P. Lalas & C.F. Ratto eds., World Sci., Singapore, pp. 421–431, (1996).
- [15] E. Rodríguez, G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar, J.M. Gonzalez, *Parameter estimation in a three-dimensional wind field model using genetic algorithms*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. **2329**, pp. 950–959, (2002).
- [16] G. Montero, E. Rodríguez, R. Montenegro, J.M. Escobar, J.M. González-Yuste, *Genetic algorithms for an improved parameter estimation with local refinement of tetrahedral meshes in a wind model*, Advances in Engineering Software, Vol. **36**, pp. 3–10, (2005).