

Predicción del viento a escalas sub-kilométricas

Imanol Guerrero, Javier Calvo y Mariano Hortal
Agencia Estatal de Meteorología, c/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28040 Madrid
iguerrerop@aemet.es

1. Introducción

La continua mejora en la potencia de cálculo de los ordenadores nos permiten aumentar la resolución en los modelos de predicción numérica del tiempo, y de esta forma poder utilizar los modelos de mesoescala de forma operativa. Actualmente podemos hablar de un modelo de alta resolución para resoluciones por debajo de unos 4 km en los que se considera que la convección profunda puede tratarse explícitamente. El modelo HARMONIE es uno de estos modelos.

HARMONIE es un modelo de área limitada espectral no-hidroestático, desarrollado por Meteo-France y ALADIN, en colaboración con el Centro Europeo de Predicción Meteorología a Medio Plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) y el consorcio HIRLAM. Las características generales del modelo HARMONIE podemos encontrarlo en Morales et al. (2014) aunque describiremos brevemente algunas características.

Esta construido sobre el núcleo dinámico ALADIN-NH (no-hidroestático), que es espectral bi-Fourier (asumiendo una zona de extensión para la bi-periodicidad de los campos). En su parte temporal es semi-implícito y semi-lagrangiano de dos pasos de tiempo con una coordenada híbrida en la vertical.

Existen varias parametrizaciones posibles para la física. Nosotros utilizaremos la configuración AROME, adecuada para resoluciones por debajo de 2.5 km (ver Seity et al., 2011 para una descripción más detallada).

En principio HARMONIE pueda ser ejecutado a muy alta resolución incluyendo simulaciones LES (Large Eddy Simulation) pero el modelo está especialmente preparado para resoluciones de unos 2.5 km. El objetivo de este trabajo es explorar el potencial del modelo HARMONIE para la predicción a escalas sub-kilométricas y en particular su utilización para simulaciones de viento a muy alta resolución.

El aumento de la resolución horizontal requiere bases de datos topográficos y fisiográficos de resolución varias veces mayor a la del modelo. En la práctica el modelo utiliza una topografía media partiendo de estas bases de datos. Por otra parte se ha demostrado que es beneficioso suavizar algo esta topografía media resultante para evitar problemas de *ruido* en pequeña escala en los niveles inferiores del modelo, que pueden trasladarse a escalas mayores y

niveles más altos (ondas de gravedad). Por eso HARMONIE realiza un suavizado espectral orográfico evitando así un posible *aliasing*. La resolución efectiva del modelo (Skamarock, 2004) es del orden de unas 6-8 veces el espaciado de la malla.

Un problema frecuente es el de la aparición de inestabilidad numérica en los modelos cuando aumentamos la resolución horizontal debido a que el ruido puede producir una acumulación de energía en las escalas pequeñas.

El trabajo está organizado como sigue. La sección 2 explica el diseño de los experimentos. En la sección 3 describe la topografía del modelo, la actualización de las bases de datos orográficas por unas de mayor resolución. La sección 4 introduce el análisis espectral que será necesario para entender los problemas de estabilidad que pueden aparecer en alta resolución, y las estrategias seguidas para estabilizar el modelo se describen en la sección 5. Por último, resumen y conclusiones en la sección 6.

2. Diseño de los experimentos

El área de estudio (Fig. 1) se ha situado en Gran Canaria (100 × 100 km), para un primer conjunto de experimentos, y Canarias (512 × 240 km), para otro grupo de experimentos. El dominio de integración está centrado en las coordenadas (28°N, 15°W), caracterizado por ser un terreno complejo. Las simulaciones se centran en el día 2010/02/17 caracterizado por un sistema de bajas presiones que origina el paso de sistemas convectivos y que produce fuertes vientos sobre las Islas. Las resoluciones horizontales probadas han sido 2.5, 1 y 0.5 km, con 65 niveles en la vertical. Las condiciones de contorno las toma del modelo global ECMWF cada 3 horas para los experimentos de 2.5 km, y los experimentos de mayor resolución son anidados a HARMONIE 2.5 km cada hora.

En el primer grupo de experimentos testamos el modelo HARMONIE centrado en dominio de Gran Canaria, con diferentes bases de datos orográficas: la operativa (GTOPO30), y dos del alta resolución. En otro grupo de experimentos se probaron diversas estrategias para estabilizar el modelo: difusión horizontal, cambio del esquema temporal numérico y la inclusión de las condiciones de contorno en la frontera superior. Para este caso el dominio de integración se amplió a toda Canarias. El análisis de

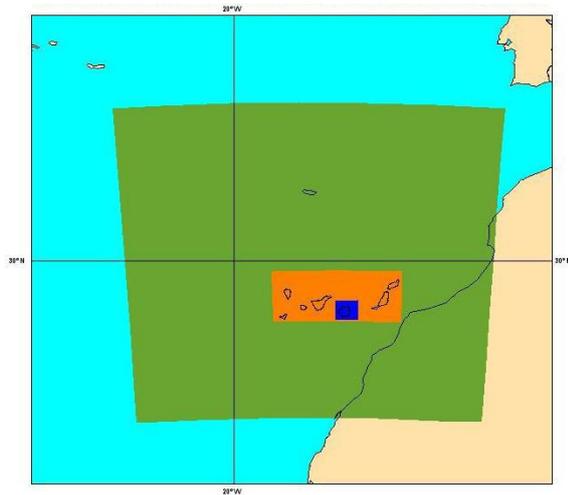


Fig. 1. Dominios de integración de los experimentos. De color verde para los experimentos de 2.5 km de resolución. El dominio naranja sobre Canarias y azul para Gran Canaria, en ambos se han corrido experimentos a 1 y 0.5 km de resolución.

distribución de divergencia también se hizo utilizando este dominio.

3. Orografía en el modelo

La orografía del modelo se calcula a partir de una base de datos topográfica. El modelo realiza un “*upscaling*” de esta base de datos a la malla del modelo, que en principio tiene una resolución más gruesa. Pero la actual base de datos, GTOPO30 (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>), con cobertura

global, tiene un espaciado de malla de 30 segundos de arco (aprox. 1 km), y no es suficiente para modelizar a 1 km o inferior.

3.1. Actualización de datos topográficos

Para actualizar la altura orográfica probamos con dos bases de datos:

- La del Instituto Geográfico Nacional (IGN, <http://www.ign.es>), con una resolución 200 m, en coordenadas UTM. El formato de los archivos es ESRI (en metros), que es un fichero tipo ASCII. La cobertura es sólo sobre España, por lo que tendríamos problemas en correr el modelo en dominios que incluyan partes de otros países.
- La base de datos ASTER, desarrollada por NASA y METI (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>). Tiene una resolución de aproximadamente 30 m, en coordenadas latitud-longitud. El formato de salida, también en metros, es un GeoTIFF, un archivo binario. Siendo su cobertura prácticamente global, excepto unos hueco a muy altas latitudes.

Así que lo que se hizo fue transformar los formatos de las nuevas bases de datos a los de GTOPO30 adecuados para HARMONIE. Para los archivos ESRI, los del IGN, realizamos un programa FORTRAN, y para los GeoTIFF, de ASTER, utilizamos las librerías *gdal* (<http://www.gdal.org>), que tratan datos geoespaciales.

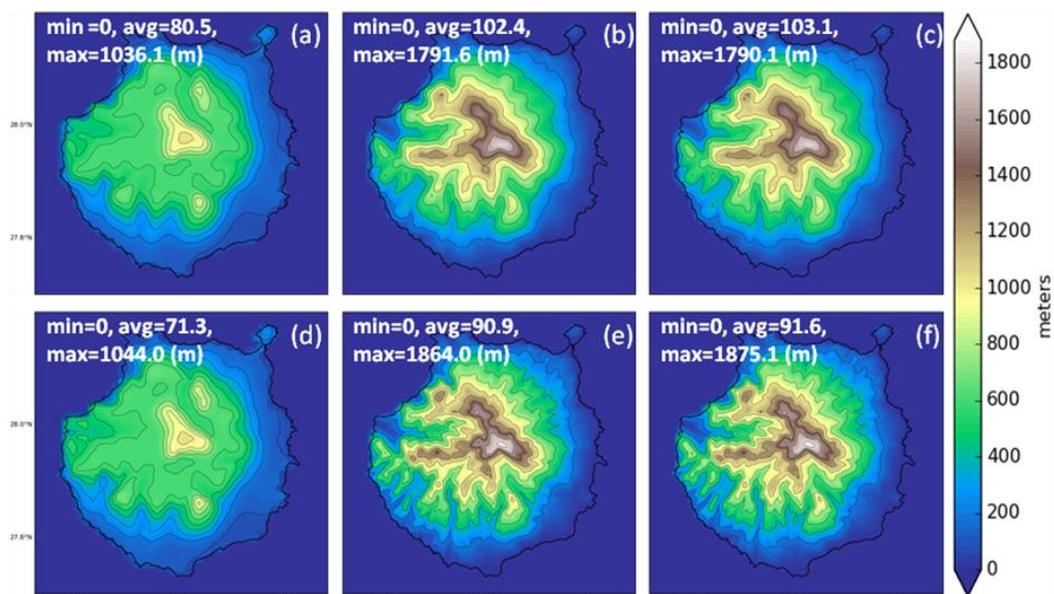


Fig. 2. Orografía utilizada por HARMONIE para la resolución de 1 km con las bases de datos topográficas GTOPO30 (a), IGN (b) y ASTER (c); y para la resolución de 0.5 km con GTOPO30 (d), IGN (e) y ASTER (f). Para cada caso se muestra el valor mínimo, medio y máximo.

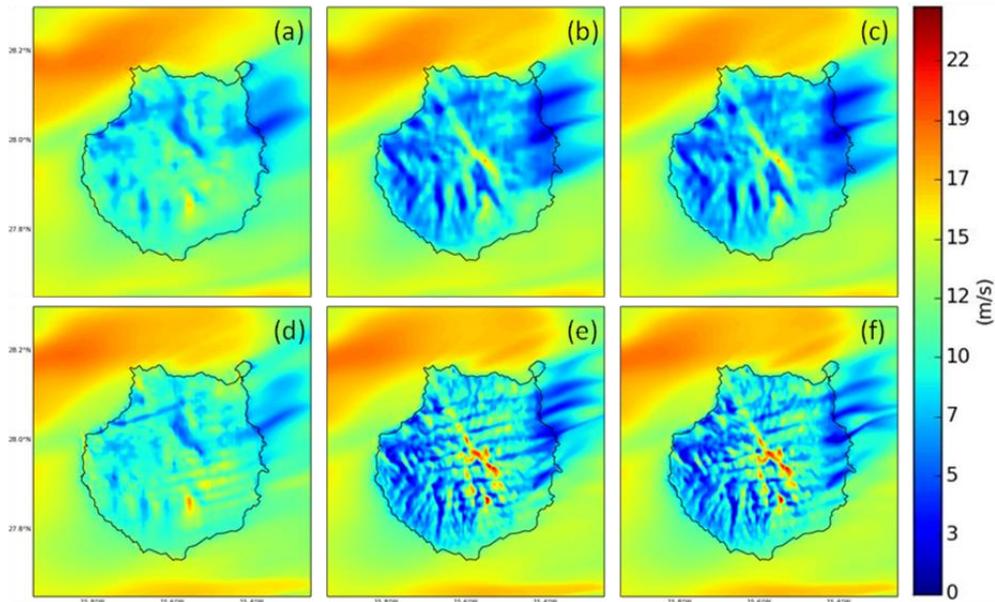


Fig. 3. Campo de vientos superficial para el alcance de +23h producida por HARMONIE para la resolución de 1 km con las bases de datos topográficas GTOPO30 (a), IGN (b) y ASTER (c); y para la resolución de 0.5 km con GTOPO30 (d), IGN (e) y ASTER (f).

3.2. Resultados con las diferentes bases de datos

Ahora mostramos los resultados de la orografía y el campo de viento a 10 m para las resoluciones de 1 y 0.5 km, producidas con las diferentes bases de datos orográficas utilizadas.

En la Fig. 2 vemos que la orografía resultante de GTOPO30 muestra una forma más suave y menores alturas, sobre todo la máxima, que con las bases de datos del IGN y ASTER. Los experimentos con estas bases de datos de más resolución recogen mejor el relieve escarpado de valles y sierras. También se observa que estas bases de datos del IGN y ASTER producen prácticamente la misma orografía.

En el campo de vientos a 10 m (Fig. 3) se observa que los experimentos con más detalle orográfico *sienten* más la influencia que los de GTOPO30. Como ocurriera con la orografía, los experimentos que utilizan las bases de datos de mayor resolución muestran resultados muy similares.

3.3. Verificación

La verificación se ha realizado sobre Gran Canaria con 15 observatorios para un alcance de la predicción de +36h.

Como muestra la Tabla 1, los experimentos que utilizan GTOPO30 obtienen peores resultados al ir hacia mayores resoluciones, y también un aumento del sesgo conforme se aumenta la resolución, el modelo tiende a sobrestimar más. Mientras que los experimentos que usan las bases de datos orográficas

de alta resolución sí se observan mejores resultados con el aumento de la resolución, incluso mejoran los resultados del experimento con la configuración operativa de 2.5 km de resolución.

Como ya nos indicaba el campo de vientos, los experimentos que usan los datos de ASTER y del IGN dan resultados prácticamente igual, tanto en RMSE como en sesgo, con la ventaja de que ASTER tiene cobertura global.

| | GTOPO30 | | ASTER | | IGN |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Res(km) | 2.5 | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| SESGO(m/s) | 1.008 | 1.746 | 0.036 | 0.021 | 0.026 |
| RMSE(m/s) | 3.627 | 3.895 | 3.093 | 3.048 | 3.060 |

Tabla 1.- RMSE y sesgo del viento a 10 m para una predicción a 36 horas utilizando distintas resoluciones y bases de datos.

4. Análisis espectral

Para el análisis de los resultados es muy útil hacer un análisis espectral de la distribución de la energía. El espectro de energía cinética se puede obtener como la suma de la energía de divergencia y vorticidad a través de los coeficientes espectrales (fig. 4). Como HARMONIE es un modelo espectral se obtienen estos coeficientes de forma natural. Una explicación del método puede verse en Blažica et al. (2013).

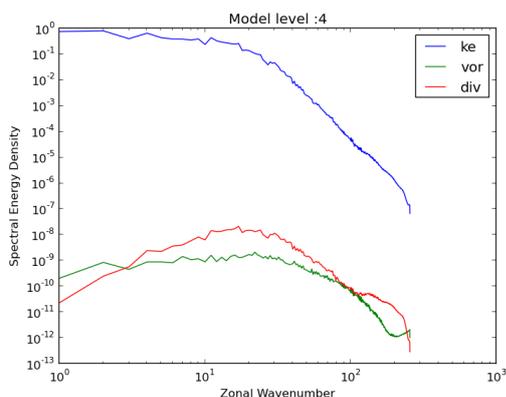


Fig. 4. Espectro numérico de energía del nivel 4 de HARMONIE. Línea azul para la energía cinética, verde para la vorticidad y rojo para la divergencia.

Conforme vamos hacia resoluciones más finas podremos predecir fenómenos de escalas más pequeñas. Veremos el papel que juega la divergencia y la vorticidad según la escala. En una primera aproximación podemos identificar a la vorticidad con un flujo cuasigeostrófico y la divergencia con un flujo no balanceado o producido por ondas de gravedad. Estudios de la energía espectral, como el de Skamarock (2004), indican que a gran escala domina la vorticidad y a pequeña escala la divergencia.

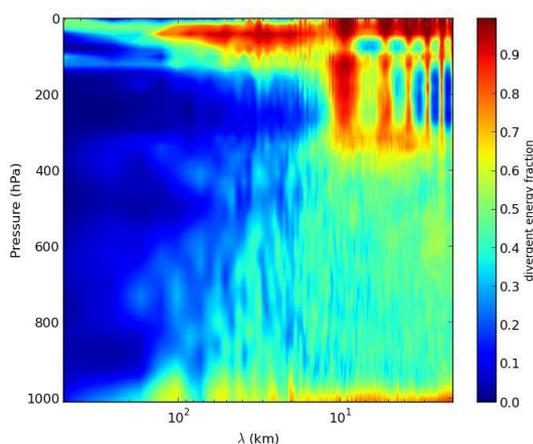


Fig. 5. Relación entre la divergencia y la vorticidad en función de la altura para distintas escalas horizontales obtenidas a partir de un experimento de 1 km de resolución. Los colores rojos indican predominio de la divergencia.

La contribución de energía de espectral de divergencia y vorticidad por escala se muestra en la Fig. 5. Vemos que las grandes escalas están dominadas por la vorticidad hasta alrededor de 100 km. Hacia escalas más pequeñas en la troposfera libre la contribución entre divergencia y vorticidad se equilibra. Por otra parte, en la capa límite planetaria y en la estratosfera media domina la divergencia. Estos resultados con 1 km de resolución son similares a los obtenidos por Blažica et al. (2013) para ALADIN a 4.4 km de resolución.

5. Estabilidad del modelo a muy alta resolución

A resoluciones de 1 km o por debajo HARMONIE puede llegar a ser inestable. En la Fig. 4 se aprecia una acumulación de energía en pequeñas escalas (número de ondas más grandes) para la vorticidad (línea verde). Hemos encontrado que el modelo se hace inestable en los niveles altos, llegando a “explotar” por viento muy fuerte, provocando que se detenga la ejecución del modelo antes de que finalice la previsión. Estos problemas de estabilidad también aparece en el modelo global ECMWF cuando lo ejecutan en alta resolución (~5 km).

El problema se hace más evidente cuando el dominio de integración es más grande, por el menor control por parte de las condiciones de contorno. Experimentos a resoluciones que sí eran estables en el dominio de Gran Canaria al pasar al dominio de Canarias ya no lo era.

Para controlar la estabilidad del modelo se han probado tres estrategias distintas: utilizar varias difusiones horizontales, activar otro esquema número temporal diferente al operativo y la inclusión de la condiciones de contorno en la frontera superior.

4.1. Difusión horizontal para estabilizar el modelo

La difusión horizontal en los modelos de predicción numérica del tiempo se utiliza para disipar un exceso energía acumulado en pequeña escala. Los efectos no lineales de ondas de pequeña escala no son bien resueltos por el método numérico y pueden llegar a producir *ruido*. Las características generales de estas difusiones se pueden encontrar en Lauritzen et al. (2011), aunque los detalles específicos para el modelo HARMONIE están disponible en <http://www.cnrm.meteo.fr/gmapdoc>.

4.1.1. Aumento del orden de la difusión horizontal

Primero probamos con la difusión espectral horizontal, que es la principal difusión que utiliza el modelo, y tiene una formadel tipo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -K_x \nabla^r X \quad (1)$$

donde X son las variables de pronóstico, r es el orden de la difusión, y K el coeficiente de difusión, que en general es complejo y tiene varias opciones de configuración. Para estabilizar el modelo pasamos de un orden de difusión de cuarto orden, que es la que tiene por defecto, a sexto orden (más selectiva). Esto requiere aumentar el coeficiente de difusión que lo multiplicamos por 100 (O’Brien, 2012). Tampoco queremos aplicar demasiada

difusión, dado que el coeficiente de difusión está pensado para actuar en números de ondas grandes (pequeñas escalas) y un exceso de difusión podría degradar la resolución efectiva del modelo.

4.1.2. Fricción de Rayleigh

Esta difusión está pensada para producir fricción en los niveles altos del modelo y así atenuar las ondas de gravedad en altura. En principio es aplicada en la componente zonal del viento en el espacio de malla, tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -K_{fric} U \quad (2)$$

donde U es la componente zonal del viento, K_{fric} es el coeficiente de fricción que sólo es distinto de cero a partir de una cierta altura. Como K_{fric} tiene forma de tangente hiperbólica, provoca un efecto de difusión tipo esponja, intensificándose más cuanto más alto sea el nivel (menores presiones). Nosotros también la aplicamos a la componente meridional del viento.

4.1.3 Difusión Semi-Lagrangiana (SLHD)

Las características difusivas de los interpoladores utilizados en la dinámica hacen que estos interpoladores puedan utilizarse para añadir difusión en ciertas variables del modelo (en el espacio espectral). Una información más detallada podemos encontrarla en Vaña et al. (2008). Esta difusión es la única que no es uniforme y la que mayor impacto tiene en el campo de vientos superficial.

4.1.4 Difusión tipo esponja

Por último, se implementó una difusión tipo esponja a partir de la de difusión espectral. Variando linealmente el coeficiente de difusión en los diez niveles más altos del modelo.

Todas estas difusiones consiguen que el modelo retrase la aparición de la inestabilidad unos cuantos pasos de tiempo pero no evitan que el modelo finalmente *explote*. Puede producirse un efecto “tapadera” en los niveles altos que provoca una reflexión de las ondas atmosféricas (ondas de sonido), y algunos de estas difusiones lo único que consigue es trasladar la inestabilidad a niveles más bajos.

4.2. Cambio del esquema temporal de la dinámica

El esquema temporal operativo SETTLS (Stable Extrapolation Two-Time-Level Scheme) (Hortal, 2002) es muy estable y se comporta de una manera suave a las resoluciones operativas de 2.5 km, y es también el utilizado en el modelo global del ECMWF. Este esquema puede tener problemas de

estabilidad a resoluciones por debajo de 1 km. En su lugar hemos activado el esquema temporal *Predictor-Corrector* (PC). Con este esquema el modelo es estable para resoluciones de 1 y 0.5 km. PC tiene un coste computacional de un 40% mayor que SETTLS, pero es compensado porque permite pasos de tiempo mayores (45 y 20 s para las resoluciones de 1 y 0.5 km, respectivamente).

4.3. Aplicación de condiciones de contorno en la frontera superior

La implementación de las condiciones de contorno en la frontera superior (CCS) puede conseguir controlar los problemas de ruido con SETTLS a muy alta resolución. Se usa la relajación de Davies análoga a la aplicada para las condiciones de contorno laterales. En Coiffier (2011) podemos encontrar una breve descripción del método. Lo que se hace es incluir una zona de relajación en los ocho niveles más altos del modelo hacia el modelo que proporciona las condiciones de contorno.

4.4. Sensibilidad al esquema temporal numérico y a las CCS

En este apartado vamos a ver el impacto del esquema numérico temporal utilizado y la influencia de la CCS en las variables meteorológicas. La Fig. 6 muestra el diagnóstico del empuje no hidrostático, que es un indicador del *ruido* del modelo. Vemos que el experimento con SETTLS (línea verde) se comporta de manera suave hasta aproximadamente las 17.5 horas de predicción, en la que en pocos pasos de tiempo se hace inestable y llega a *explotar*. El experimento con PC es estable durante toda la predicción y no llega a *explotar*, pero se aprecia bastante *spinup* e incluso *ruido* (aunque no hace *explotar* al modelo). Los experimentos con

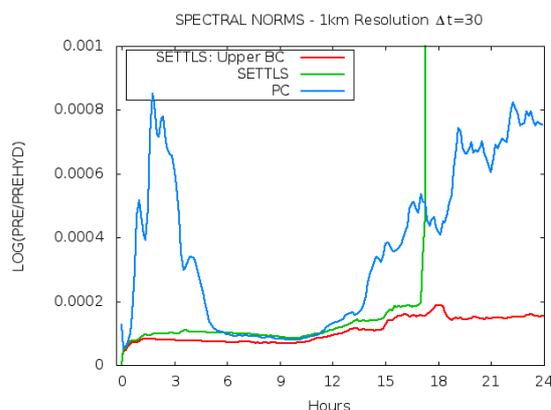


Fig. 6. Promedio en todo el dominio de integración del logaritmo de la presión dividida por la presión hidrostática (variable espectral) a lo largo del periodo de predicción. Línea azul para el experimento con PC, verde para SETTLS y rojo para SETTLS con CCS.

SETTLS+CCS se mantienen estables y *suaves* durante toda la predicción.

Los campos meteorológico de la física (calculados en el espacio de puntos de malla) presenta gran sensibilidad al esquema temporal utilizado. En la Fig. 7 vemos que con la utilización de PC se obtiene mayor cantidad de agua sólida que con los experimentos con SETTLS. Otros campos meteorológico como la precipitación (en la que se produce menor cantidad con PC), nieve, granizo o fracción de cobertura nubosa también presentan sensibilidad al esquema temporal.

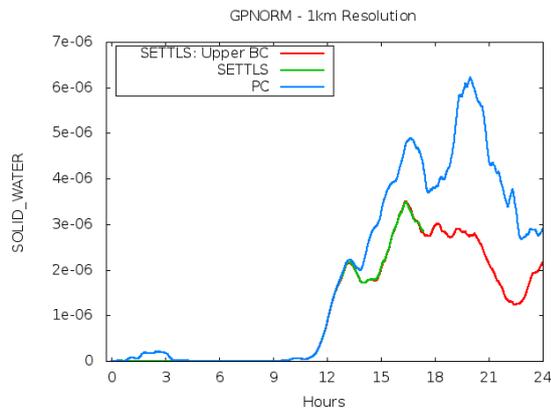


Fig. 7. Como la Fig. 6 pero para la variable cantidad de agua sólida, y en este caso es una variable de punto de malla.

6. Resumen y conclusiones

Se ha actualizado la base de datos topográfico para adecuarla a las necesidades de la modelización a muy alta resolución. Se han utilizado dos: la del IGN (200 m) con cobertura nacional, y ASTER (~30 m) con cobertura global, produciendo resultados prácticamente idénticos. Los experimentos con estas bases de datos de alta resolución dejan sentir más la influencia del terreno, y mejora la predicción de viento al aumentar la resolución.

Hemos encontrado problemas de estabilidad a resoluciones de 1km o inferiores. Para solventar el problema hemos utilizado diversas difusiones horizontales, pero esto no ha sido suficiente para estabilizar el modelo, sólo logra retrasar su aparición. Reemplazar el esquema temporal operativo SETTLS por PC estabiliza el modelo, pero PC presenta mayor *spinup* y *ruido*. Además, Predictor-Corrector puede modificar sustancialmente los campos meteorológicos. La incorporación de las Condiciones de Contorno Superiores estabiliza el modelo incluso con el esquema temporal de referencia SETTLS y tiene poco impacto en los campos meteorológicos.

Referencias

- Blažica, V., Žagar, N., Strajnar, B. and Cedilnik, J. 2013. Rotational and divergent kinetic energy in the mesoscale model ALADIN. *Tellus A* 2013, **65**, 18918.
- Coiffier, J. 2011. Fundamentals of numerical weather prediction. *Cambridge university press*, new york, NY. *Hardback*, 340 PP. ISBN 978-1-107-00103-9.
- Hortal, M. 2002. The development and testing of a new two-time-level semi-Lagrangian scheme (SETTLS) in the ECMWF forecast model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 1671-87.
- Lauritzen, P. H., C. Jablonowski, M. A. Taylor and R. D. Nair (Eds.). 2011. Numerical techniques for global atmospheric models. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Springer, Vol. 80, 556 pp.
- Morales, G. Martin, D. y Calvo, J. 2014. HARMONIE/AROME: Predicción operativa a escalas convectivas. *En este volumen*.
- O'Brien, E. 2012. Numerical Stability and Kinetic Energy Spectra in High-Resolution HARMONIE. HIRLAM Newsletter no. 59.
- Skamarock, W. C. 2004. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. *Mon. Wea. Rev.* **132**, 3019–3032.
- Vaña, F., Bènard, P., Geleyn, J-F., Simon, A. and Seity, Y. 2008. Semi-lagrangian advection scheme with controlled damping: an alternative to nonlinear horizontal diffusion in a numerical weather prediction model. *Q. J. R. Meteor. Soc.* **134**, 523–537.