

PREDICCIONES PROBABILISTAS DE VELOCIDAD DE VIENTO MEDIANTE UN SISTEMA MULTIFÍSICA Y MULTIANÁLISIS DE PREDICCIÓN POR CONJUNTOS

Alvaro PASCUAL¹, Francisco VALERO¹, Daniel SANTOS-MUÑOZ², Alvaro VICENTE-RETORTILLO¹, Antonio MANZANO¹, María Luisa MARTIN³

¹*Dpto. Astrofísica y CC. de la Atmósfera. Facultad de CC. Físicas. Universidad Complutense de Madrid. Spain*

²*Agencia Estatal de Meteorología. C/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28040 Madrid. Spain*

³*Escuela de Informática de Segovia. Universidad de Valladolid. Pza. Alto de los Leones, 1, 40005 Segovia. Spain*

a.depascual@fis.ucm.es, valero@ucm.es, dsantos@aemet.es, alvarodv@ucm.es,

mlmartin@eii.uva.es

RESUMEN

El desarrollo de la energía eólica y su importancia en la producción eléctrica ha conllevado la mejora de los métodos de predicción de velocidad del viento y los sistemas de predicción por conjunto a corto plazo (SPC) pueden jugar un papel importante en ello. Este estudio presenta resultados de velocidad del viento a 10 m en la Península Ibérica obtenidos de un SPC multifísica. El modelo está basado en el Weather Research and Forecasting (WRF) model version 3.3. El SPC consta de 10 miembros compuestos de dos conjuntos diferentes de condiciones iniciales y de contorno, y 5 conjuntos diferentes de parametrizaciones subrejilla físicas. Se muestran diversos resultados de verificación tanto deterministas como probabilistas que permiten extraer conclusiones del diseño del SPC. En cuanto a los deterministas, resultados de sesgo, correlaciones espaciales y errores cuadráticos medios se exponen espacialmente, evaluando la habilidad del modelo en la predicción de la velocidad del viento a 10m en la Península Ibérica. Los resultados probabilistas se muestran en términos de histogramas de rango del sistema en la predicción de la velocidad del viento en diferentes áreas de la Península Ibérica. Se pone de manifiesto cómo las diferentes condiciones climáticas peninsulares producen gran variabilidad en los estadísticos de validación, lo cual habría de tenerse en cuenta a la hora de validar un modelo sobre un área con gran diversidad climática como es la Península Ibérica.

Palabras clave: predicción probabilista por conjuntos, incertidumbre, modelos numéricos, sistema multifísica y multianálisis

ABSTRACT

The rapid expansion of wind energy and its increasing importance in power production have necessitated improved methods for forecasting wind speeds and the short-range Ensemble

Prediction Systems (EPS) could potentially play a major role. This study presents results of 10m wind speed over the Iberian Peninsula obtained from a multi-physic EPS. The EPS is based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model version 3.3. The EPS have 10 members, which are composed of two different sets of initial and boundary conditions, and 5 different sets of subgrid scale physics parameterizations. Several deterministic and probabilistic verification results are shown. These results allow to establish the EPS design quality. Results of bias, spatial correlations and root mean squared errors are displayed, evaluating the models skillful for predicting 10m wind speed over the Iberian Peninsula. The probabilistic results are shown by means of rank histograms. The results show the model skilful in forecasting wind speed in different areas of Iberia, emphasizing how diverse peninsular climatic conditions promote high variability in validation skill scores. This fact must be considered when a model is validated over areas with high climatic diversity such as the Iberian Peninsula.

Key words: ensemble probabilistic system, uncertainty, numerical models, multi-physics and multianalysis system

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de validación de un modelo es un proceso estadístico que se encuentra asociado intrínsecamente al cálculo de valores promediados extraídos de una muestra representativa de simulaciones. Para ello, la selección de la muestra puede realizarse desde un punto de vista espacial o temporal (Rife and Davis, 2005; Gilleland *et al.*, 2009; Jolliffe and Stephenson, 2012). El promediado espacial conlleva a obtener estadísticos que únicamente dependen de la dimensión temporal y viceversa. Generalmente en los procesos de validación de sistemas de predicción por conjuntos (SPC) suele predominar el promediado espacial de resultados ya que, por lo general, el interés de las conclusiones se concentra en la evaluación del modelo en función del alcance de simulación así como en el estudio del crecimiento de las incertidumbres en función del alcance de la simulación. No obstante, se sabe que los resultados de los modelos meteorológicos tienen una elevada variabilidad espacial que por lo general puede estar asociada a orografía (Lott and Miller, 1997; Miller *et al.*, 1989) y usos de suelo (Avissar and Pielke 1989) donde implícitamente se tienen en cuenta los efectos de la climatología local. Resulta pues de gran interés, el estudio y validación de los resultados tanto desde un punto de vista temporal como espacial. Así mismo, la variabilidad espacial de los sistemas de modelización presenta fluctuaciones considerables que en muchas ocasiones se encuentra asociada a zonas con una escasa representatividad dentro del dominio de estudio (como es el caso de zonas de orografía compleja) de forma que estas áreas de elevada incertidumbre quedan enmascaradas en un proceso de validación que promedia los resultados de forma espacial.

En este trabajo, se presentan los resultados de velocidad del viento a 10 m en la Península Ibérica obtenidos de un SPC multifísica. El modelo, de 10 miembros, está basado en el Weather Research and Forecasting (WRF) model version 3.3 usando la resolución dinámica Advanced Research WRF (ARW) (Skamarock *et al.*, 2008). La aproximación multifísica fue elegida para representar de forma efectiva la incertidumbre del modelo, revelándose como un hecho importante en los sistemas a corto plazo, en particular para variables fuertemente influenciadas por la superficie. Pondremos de manifiesto cómo las diferentes condiciones climáticas

peninsulares producen gran variabilidad en los estadísticos de validación, lo cual habría de tenerse en cuenta a la hora de validar un modelo sobre un área con gran diversidad climática como es la Península Ibérica. El trabajo se desarrollará en los siguientes puntos. En la sección 2 se describirá la configuración del SPC utilizado. La sección 3 estará dedicada a la exposición de resultados y en la sección 4 se expondrán las principales conclusiones del trabajo.

2. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

Esta sección describe la configuración del SPC. El SPC usado está basado en diversas configuraciones del WRF-ARW modelo. A pesar de que el sistema es un SPC multifísica y multianálisis hay algunas características comunes entre los miembros. Los miembros se ejecutan en el modelo en dos dominios anidados que cubren el área noratlántica y la Península Ibérica (Figura 1) con resoluciones de 30 km y 10 km, respectivamente. La resolución vertical presenta 35 niveles en ambos dominios. Todos los miembros usan esquemas comunes para diversas opciones físicas tales como procesos de microfísica, radiación, suelo y cúmulos. WSM3 (Hong et al., 2004) se usó para microfísica, RRTM (Mlawer *et al.*, 1997) y RRTMG (Iacono *et al.*, 2008) para radiación de onda larga y onda corta, los procesos de capa superficial fueron representados por MM5 Similarity Scheme (Paulson, 1970; Dyer and Hicks, 1970; Webb, 1970; Beljaars, 1995; Zhang and Anthes, 1982) y el modelo Betts-Miller-Janjic (Janjić, 1994) se utilizó para la parametrización cumular.

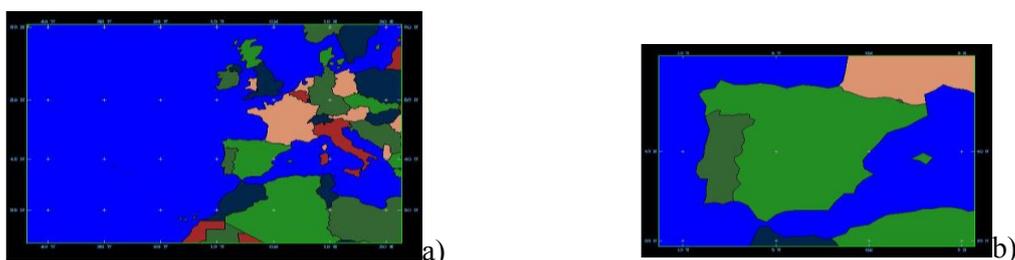


Fig. 1: Áreas de integración seleccionadas: (a) área de baja resolución (30 km) y (b) área de alta resolución (10 km) anidadas bidireccionalmente.

Aunque existen características comunes entre los miembros del SPC, a continuación se detallan las particularidades de cada uno de los miembros del sistema. El principal objetivo del SPC ha sido proporcionar una buena representación del campo de viento. Para ello, se han incluido diversos esquemas de suelo y capa límite planetaria. Además la inclusión de perturbaciones multifísica asegura la dispersión (*spread*) del modelo. Dos inicializaciones se han incluido. Cada miembro del SPC está definido por tres características: el uso de esquemas específicos de suelo y capa límite planetaria y los datos utilizados para la inicialización del modelo. La combinación de esto produce 10 miembros diferentes (Tabla 1) donde las combinaciones diferentes de suelo y capa límite planetaria están fuertemente condicionadas por la compatibilidad computacional de diversos esquemas en la versión del WRF usada. El suelo ha sido caracterizado por 5-niveles de difusión térmica (5LTDS) (Dudhia, 1996) y los esquemas Unified Noah Land Surface Model (UNLSM) (Tewari *et al.*, 2004). Se han tenido en cuenta cinco parametrizaciones: Esquema Yonsei University (YSU) (Hong and Lim, 2006), Esquema Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) (Janjić, 1994), Mellor-Yamada Nakanishi Niino (MYNN) level 2.5 (Nakanishi and Niino, 2006),

Bougeault-Lacarrere (BouLac) (Bougeault and Lacarrere, 1989) y el Esquema de la capa límite de la University of Washington (UWBLS) (Bretherton and Park, 2009). Cada combinación de suelo y capa límite fue inicializada con el análisis (para obtener la condición inicial) y la predicción proporcionada por los modelos Global Forecast System (GFS) y el Integrated Forecast system (IFS). Ambas condiciones se asimilaron en el modelo cada 6h con un espaciado horizontal de 0.5°.

El modelo SPC así definido ha sido ejecutado y validado para la Península Ibérica de la siguiente manera. Las simulaciones del modelo han sido realizadas para el periodo comprendido entre 1 de marzo y el 31 de mayo de 2010 con dos inicializaciones diarias a las 00:00 y a las 12:00 h. El horizonte de predicción corresponde a 72 h. Los resultados del modelo son comparados con el análisis IFS proporcionado por el Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF).

ID	CCI - CCC	Surface	PBL
1I	IFS	5-layer Thermal Diffusion	Yonsey University
2I			Mellor-Yamada-Janjic
3I			Mellor-Yamada Nakanishi Niino
4I			Bougeault Lacarrere
5I		Unified Noah Land Surface Model	University of Washington Boundary Layer Scheme
1G	GFS	5-layer Thermal Diffusion	Yonsey University
2G			Mellor-Yamada-Janjic
3G			Mellor-Yamada Nakanishi Niino
4G			Bougeault Lacarrere
5G		Unified Noah Land Surface Model	University of Washington Boundary Layer Scheme

Tabla 1: ESQUEMAS Y PARAMETRIZACIONES UTILIZADAS EN EL SPC

3. RESULTADOS

Esta sección muestra los resultados obtenidos de predicción de viento a 10m en la Península Ibérica a partir del SPC desarrollado y descrito en la sección anterior. Los resultados han sido comparados con el análisis IFS del ECMWF.

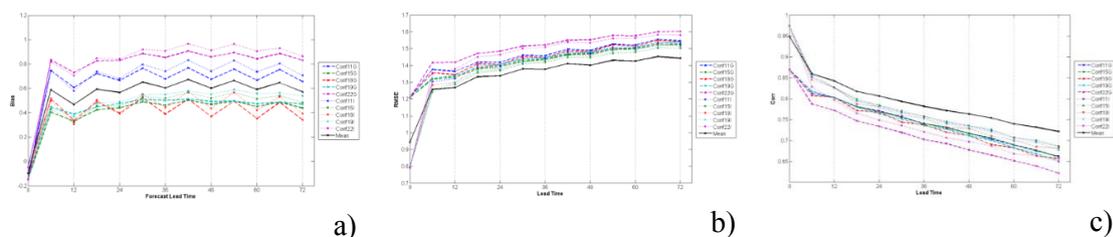


Fig. 2: (a) Sesgo, (b) rmse y (c) correlación aplicando promedios espaciales. Las líneas coloreadas representan los resultados de los miembros del EPS; la línea negra muestra los resultados de la media del SPC

La verificación determinista de cada miembro facilita la comparación de los resultados con todos los miembros manteniendo un nivel de calidad similar durante el periodo verificado y una contribución significativa del sistema. Se observa que la media del SPC (*ensemble mean, EM*) produce mejores resultados que cada uno de los miembros por sí solos (Fig. 2). El sesgo (Fig. 2a) es relativamente estable para todos los alcances de predicción y tiende a producir cierta sobreestimación del viento. Los resultados de las verificaciones deterministas indican que tanto los rmse como los sesgos no permiten desestimar ninguno de los miembros del SPC por tener un comportamiento altamente diferente al resto.

Si no tenemos en cuenta el cálculo realizado por promedios espaciales, se puede observar, en general, la gran variabilidad de todos los estadísticos utilizados para el análisis del SPC (Fig. 3). Es especialmente destacable la correlación de zonas peninsulares con orografía más compleja (Pirineos, Sierra Nevada) en las que la correlación es prácticamente nula para la totalidad de la simulación. Este efecto también se observa pero con menor intensidad en los sistemas Central y Cantábrico. Por otra parte, se aprecia el buen funcionamiento del modelo en las zonas marítimas atlánticas. Estos dos entornos pueden relacionarse directamente con los gráficos de la Figura 2 ya que si se realiza un promedio espacial de resultados, la elevada representatividad (en número de puntos de malla) de las zonas marítimas del dominio produce la obtención de buenos estadísticos de validación enmascarando zonas donde los resultados no son tan buenos pero cuya representatividad espacial es muy reducida. Además, se aprecia un descenso más acusado de correlación y rmse en el área mediterránea para alcances largos de simulación (especialmente 48 y 72 horas). Esto puede deberse a la baja predictabilidad en el Mediterráneo asociada a una dinámica dominante más asociada al desarrollo de procesos locales. El periodo temporal elegido, la primavera, conlleva radiación más alta en esta zona, lo cual produce la aparición de brisas. El viento medio de todo el dominio presenta en el periodo temporal seleccionado mucha frecuencia de aparición de la tramontana (no mostrado) lo cual produce elevada variabilidad en la zona que se traduce en una disminución de la predictabilidad.

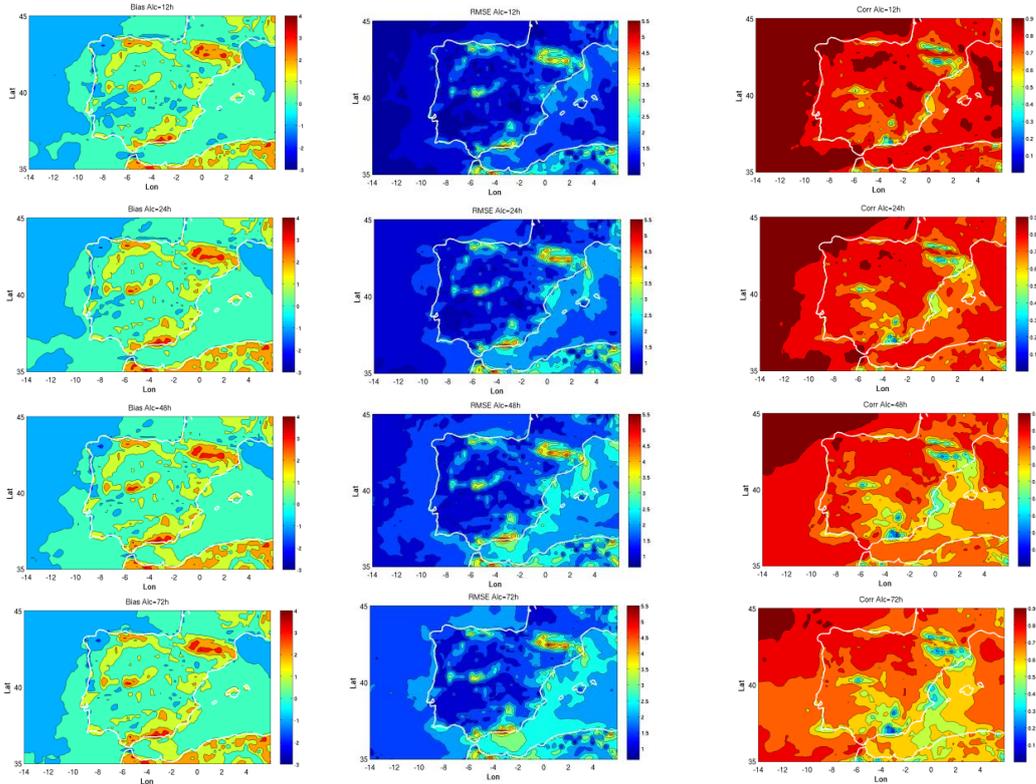
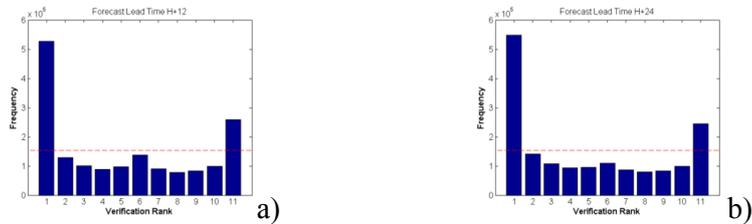


Fig. 3: Sesgo (columna izquierda), rmse (columna central) y correlación (columna derecha) aplicando promedios temporales a la media del SPC para alcances de simulación de 12h (fila superior), 24h (fila central) y 72h (fila inferior).

Otro modo de caracterizar el comportamiento de un SPC es mediante la generación de histogramas de rango o Talagrand. Con éstos, tratamos de establecer si cada miembro del sistema es equiprobable y estadísticamente indistinguible del resto. Desde el punto de vista estadístico esta propiedad se resume en que los miembros del SPC y las observaciones verificantes han de ser realizaciones independientes de la misma distribución de probabilidad (Toth *et al.*, 2003). Esto permite determinar si el sistema está calibrado, es consistente o fiable. La Figura 4 muestra los histogramas de rango desde el punto de vista de los promedios espaciales. El sistema presenta clara infradispersión. Asimismo, se observa como el partir únicamente de dos condiciones iniciales produce una separación de los miembros en dos grupos claramente diferenciados generándose de esta forma un Talagrand con forma de W.



PREDICIONES PROBABILISTAS DE VELOCIDAD DE VIENTO MEDIANTE UN SISTEMA MULTIFÍSICA Y
MULTIANÁLISIS DE PREDICCIÓN POR CONJUNTOS

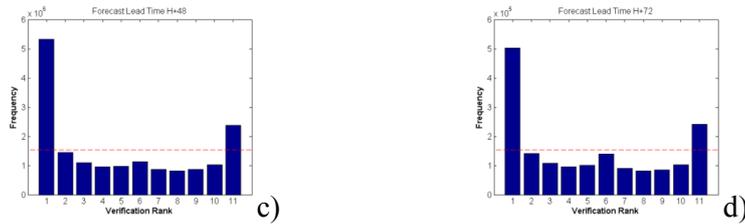


Fig. 4: Histogramas de rango para diferentes alcances de simulación: (a) 12; (b) 24; (c) 48 y (d) 72h

La estructura de barras de los histogramas de rango es ampliamente aplicada en la evaluación de modelos EPS, si bien, dado que se trata de histogramas, este tipo de gráficos no pueden ser directamente representados desde un punto de vista espacial. Es por ello que en el presente trabajo se propone la representación alternativa de dos índices que resumen la información contenida en los histogramas. Desde un punto de vista matemático, el histograma resultante de un Talagrand puede ser entendido como una función. La primera derivada de la función, que puede obtenerse mediante diferencias finitas, resulta una nueva función que aporta información sobre la pendiente de la función. Este concepto, aplicado a un histograma de rango aporta información sobre la pendiente (S) del histograma. Esta pendiente puede ser a su vez promediada para todo el histograma obteniendo de esta forma una idea del sesgo asociado al modelo. La interpretación de este índice presenta clara similitudes con el sesgo, ya que, al igual que en él, los valores de diferente signo positivos o negativos se encuentran asociados a infraestimación o sobreestimación de las predicciones. Conceptualmente la interpretación matemática de la segunda derivada de una función puede ser entendida como un valor de la concavidad/convexidad (C) de la misma. De esta forma, puede aplicarse este concepto para obtener un índice promediado que estime en qué medida el Talagrand muestre infradispersión (valor de concavidad mayor que cero) o sobredispersión (valor menor que cero) del SPC. Debe tenerse en consideración que tanto el índice S como el C son promedios obtenidos para la totalidad del histograma, de modo que se obtiene un comportamiento generalizado de todo el *ensemble* enmascarando posibles comportamientos inhomogéneos. Así pues, un valor de C muy próximo a cero no solo está asociado a *ensembles* con una estimación óptima del *spread*, sino que además se puede asociar con histogramas con una forma “ondulante” en los que una parte de los miembros generan un comportamiento cóncavo y en otra parte del histograma se muestre un comportamiento convexo. Sin embargo, este segundo comportamiento ondulante es algo que raramente aparece en histogramas de rango y el comportamiento del histograma (especialmente en el caso de la primera y última barra) tiende a ser homogéneo.



Fig. 5: (a) Pendiente media y (b) concavidad de los histogramas de rango frente al alcance de simulación

Dado que los mencionados índices tienen la capacidad de resumir parte de la información de cada histograma de rango con dos únicos valores, es entonces posible expresar esta información en dos gráficos en función del alcance de predicción (Fig. 5). Como se ha comentado, la pendiente del histograma de rango puede ser interpretada de la misma forma que es interpretado el sesgo del modelo. Se puede apreciar como el gráfico de este índice en función del alcance de predicción (Fig. 5a) presenta una elevada similitud con el sesgo (Fig. 2a), presentando como única diferencia el signo ya que matemáticamente la pendiente decreciente se considera negativa. Por otra parte, el índice de concavidad muestra valores positivos para todos los alcances de predicción, lo cual debe ser interpretado como una tendencia a la infradispersión del modelo. Este resultado, coherente con los resultados observados en la Fig. 4, muestra además la disminución de los valores de C para alcances de predicción largos, lo cual indica que la dispersión del modelo tiende a ajustarse a la observada según avanza el tiempo de simulación.

Alternativamente al planteamiento aplicado hasta el momento, los Talagrand pueden ser calculados para cada punto de maya del dominio de estudio. Obviamente es imposible visualizar los resultados de este cálculo ya que el dominio del modelo cuenta con un número elevadísimo de nodos, lo cual generaría una cantidad ingente de histogramas de rango. Sin embargo, es posible condensar la información resultante desde un punto de vista geográfico utilizando los índices S y C anteriormente descritos. Por motivos de brevedad, no se muestran en el presente trabajo los resultados del índice S desde un punto de vista geográfico debido a su gran similitud con el sesgo del SPC. En la Figura 6 se observan los resultados espaciales del índice C del modelo. Análogamente a la Figura 4, se observa una tendencia generalizada a la infradispersión del SPC, estando dicha infradispersión centrada principalmente en áreas de montaña y mediterráneas observándose niveles de concavidad moderados en el área atlántica, mesetas peninsulares y Valle del Guadalquivir. Es posible además observar en cierta medida la reducción de infradispersión mostrada por la Figura 4, la cual afecta principalmente a la zona mediterránea, Valle del Ebro y zonas de orografía compleja en donde se aprecia una reducción de los valores del índice C para los alcances de simulación más largos.

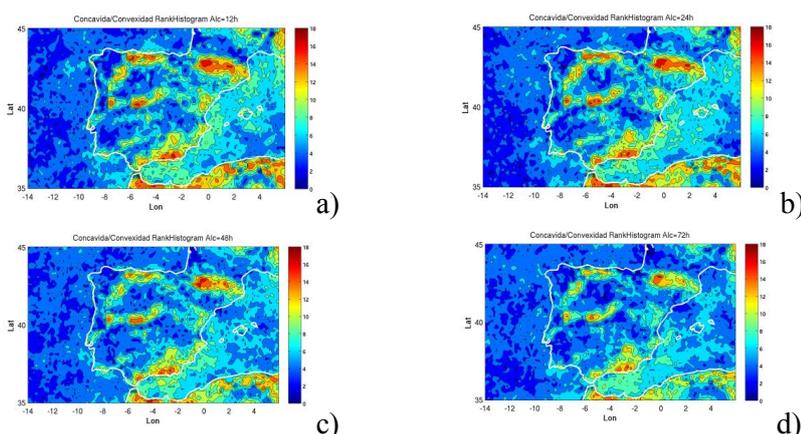


Fig. 6: Representación espacial del índice C para alcances de simulación: (a) 12 h; (b) 24h; (c) 48h y (d) 72h

4. CONCLUSIONES

El uso de los SPC a corto plazo para la generación de predicciones probabilistas es una herramienta ideal para la toma de decisiones en todos aquellos campos que tengan una influencia meteorológica. El desarrollo de un SPC de alta resolución y corto plazo de predicción focalizado en una variable altamente dependiente de la orografía y usos de suelo, como es el viento a 10 m, requiere de una verificación exhaustiva del mismo tanto desde el punto de vista determinista de cada uno de sus miembros, como de todo el sistema desde el punto de vista probabilista. En este trabajo ha sido verificado el diseño de un SPC de área limitada generado mediante el uso de dos conjuntos de condiciones iniciales y de contorno y cinco combinaciones de parametrizaciones físicas del modelo WRF. El sistema está formado por 10 miembros que son integrados a una resolución máxima de 10 km.

La verificación determinista de la predicción de la velocidad del viento a 10 m en la Península Ibérica para cada uno de los miembros se ha realizado mediante el cálculo de sesgos, correlaciones espaciales y errores cuadráticos medios. Este tipo de verificación acumulada en todo el área de estudio de cada miembro facilita la comparación de los resultados con todos los miembros. Los resultados muestran un nivel de calidad similar de todos los miembros durante el periodo verificado y una contribución significativa del sistema. La representación espacial de los sesgos, correlaciones espaciales y errores cuadráticos medios, ha permitido establecer la alta variabilidad de los mismos. Los resultados muestran áreas de alta correlación espacial en zonas marítimas atlánticas y de correlación casi nula en áreas de alta montaña. También se aprecia un descenso más acusado de correlación y rmse en el área mediterránea para alcances largos de simulación. Esto puede deberse a la baja predictabilidad en el Mediterráneo asociada a procesos locales y a la inestabilidad propia de la primavera. Los resultados probabilistas se muestran en términos de histogramas de rango estableciendo si cada miembro del sistema es equiprobable y estadísticamente indistinguible del resto. El sistema presenta clara infradispersión. Asimismo, se observa como el partir únicamente de dos condiciones iniciales produce una separación de los miembros en dos grupos claramente diferenciados generándose de esta forma un Talagrand con forma de W.

En el presente trabajo se propone la representación alternativa de dos índices que resumen la información contenida en los histogramas de rango mediante el cálculo de su pendiente (\mathcal{S}) y un valor de la concavidad/convexidad (\mathcal{C}). Los resultados de la representación espacial del índice \mathcal{C} muestran una tendencia generalizada a la infradispersión del SPC, estando dicha infradispersión centrada principalmente en áreas de montaña y mediterráneas observándose niveles de concavidad moderados en el área atlántica, mesetas peninsulares y Valle del Guadalquivir. Es posible además observar en cierta medida la reducción de infradispersión mostrada por la Figura 4, la cual afecta principalmente a la zona mediterránea, Valle del Ebro y zonas de orografía compleja en donde se aprecia una reducción de los valores del índice \mathcal{C} para los alcances de simulación más largos.

9. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación con referencias AYA2011-29967-C05-02, CGL2011-25327 y VA025A10-2. Los autores agradecen a European Centre for Weather Medium Forecast (ECWMF) por suministrar los análisis IFS-ECMWF y los datos de predicción y a la NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA, <http://www.cdc.noaa.gov>, por proporcionar los datos NCEP Reanalysis. Los autores agradecen además la información relacionada con el modelo WRF que UCAR proporciona.

10. REFERENCIAS

- Avisar, R., and Pielke, R. A. (1989). A Parameterization of Heterogeneous Land Surfaces for Atmospheric Numerical Models and Its Impact on Regional Meteorology. *Mon. Weather Rev.*, 117, 2113–2136, doi:10.1175/1520-0493(1989).
- Beljaars, A. C. M. (1995). The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 121, 255–270, doi:10.1002/qj.49712152203.
- Bougeault, P., and Lacarrere, P. (1989). Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta--Scale Model. *Mon. Weather Rev.*, 117, 1872–1890, doi:10.1175/1520-0493(1989)117.
- Bretherton, C. S., and Park, S. (2009). A New Moist Turbulence Parameterization in the Community Atmosphere Model. *J. Clim.*, 22, 3422–3448, doi:10.1175/2008JCLI2556.1.
- Dudhia, J. (1996). A multi-layer soil temperature model for MM5. The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop. Boulder, Colorado, 49–50.
- Dyer, A. J., and Hicks, B. B. (1970). Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 96, 715–721, doi:10.1002/qj.49709641012.
- Gilleland, E., Ahijevych, D. Brown, B. G. Casati, B. and Ebert, E. E. (2009). Intercomparison of Spatial Forecast Verification Methods. *Weather Forecast.*, 24, 1416–1430, doi:10.1175/2009WAF2222269.1.
- Hong, S. Y., and Lim, J. O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 129–151.
- Hong, S.-Y., Dudhia, J. and Chen, S.-H. (2004). A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Mon. Weather Rev.*, 132, 103–120, doi:10.1175/1520-0493(2004)132.

- Iacono, M. J., Delamere, J. S. Mlawer, E. J. Shephard, M. W. Clough, S. A. and Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- Janjić, Z. I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Weather Rev.*, 122, 927–945, doi:10.1175/1520-0493(1994)122.
- Jolliffe, I. T., and Stephenson, D. B. (2012). *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*. John Wiley & Sons.
- Lott, F., and Miller M.J. (1997). A new subgrid-scale orographic drag parametrization: Its formulation and testing. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 123, 101–127.
- Miller, M. J., Palmer, T. N. and Swinbank, R. (1989). Parametrization and influence of subgridscale orography in general circulation and numerical weather prediction models. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 40, 84–109, doi:10.1007/BF01027469.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., and Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.
- Nakanishi, M., and Niino, H. (2006). An Improved Mellor–Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary-Layer Meteorol.*, 119, 397–407, doi:10.1007/s10546-005-9030-8.
- Paulson, C. A., (1970). The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric Surface Layer. *J. Appl. Meteorol.*, 9, 857–861, doi:10.1175/1520-0450(1970)009.
- Rife, D. L., and Davis, C. A. (2005). Verification of Temporal Variations in Mesoscale Numerical Wind Forecasts. *Mon. Weather Rev.*, 133, 3368–3381, doi:10.1175/MWR3052.1.
- Skamarock, W. C., and Coauthors (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech Note TN-475+STR*.
- Tewari, M., and Coauthors (2004). 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction. *Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model*, 11–15.
- Toth, Z., Talagrand, O. Candille, G. and Zhu, Y. (2003). Probabiliy and ensemble forecast. *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, I.T. Jolliffe and D.B. Stephenson, Eds., Wiley, 137–163.
- Webb, E. K. (1970). Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 96, 67–90, doi:10.1002/qj.49709640708.

Zhang, D., and Anthes, R. A. (1982). A High-Resolution Model of the Planetary Boundary Layer—Sensitivity Tests and Comparisons with SESAME-79 Data. *J. Appl. Meteorol.*, 21, 1594–1609, doi:10.1175/1520-0450(1982)021.