

El Sistema de Predicción por Conjuntos para el corto plazo del INM

JOSE A. GARCIA-MOYA(1), A. CALLADO(2), C. SANTOS(1), D. SANTOS-MUÑOZ(1) y J. SIMARRO(3)

(1) Servicio de Predecibilidad y Predicciones extendidas. (2) Centro Meteorológico Territorial en Barcelona.

(3) Centro Meteorológico Territorial en Valencia

La predicción de fenómenos severos despierta un interés creciente en la sociedad. Los modelos numéricos de predicción a mesoescala todavía tienen problemas para tratar adecuadamente estos episodios, porque la "predecibilidad" de los mismos es muy baja incluso en el corto plazo. En este contexto, las predicciones probabilísticas pueden ayudar a atacar el problema desde otro enfoque. Los sistemas de predicción por conjuntos multi-modelo se están mostrando particularmente útiles para añadir un aspecto probabilístico a la predicción de episodios de tiempo severo (precipitaciones convectivas intensas, vientos fuertes, etc.). Se ha desarrollado en el INM un sistema de este tipo para predicciones hasta 72 horas de alcance. Se describe en este artículo el fundamento de este sistema, el estado actual y posibilidades del mismo, así como los resultados de verificación realizados durante el pasado año.

En la predicción del tiempo, las variables meteorológicas más importantes son las de superficie. La sociedad exige a los servicios meteorológicos predicciones cada vez más "precisas". La predicción de fenómenos severos (precipitación convectiva intensa, temporales, olas de frío o calor...) tiene un fuerte impacto social, y las autoridades encargadas de la protección civil quieren predicciones "exactas" de estos fenómenos. Pero, ¿pueden hacerse predicciones cada vez más exactas?

Hace unas décadas el meteorólogo E. Lorenz comenzó a dar una respuesta científica a esta pregunta, conectando la Meteorología y la Física del Caos. La respuesta es "No, en general, no". ¿Por qué?. La atmósfera es un sistema dinámico altamente no lineal. Físicamente, esto significa que el conjunto de ecuaciones con que la describimos e intentamos modelizar es "hipersensible" a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales o en la formulación del modelo. Esta respuesta no cierra la posibilidad de "mejorar las predicciones", sino que conduce a nuevas líneas de investigación en predicción, planteándonos en qué sentido puede ser una predicción mejor, dado que no es más exacta. Teniendo en cuenta la naturaleza de la atmósfera ya citada, debemos admitir que no es predecible con total exactitud, pero sí sabemos que, según la situación, la "inexactitud" o "incertidumbre" puede ser mayor o menor, y así su "predecibilidad" menor o mayor. Las investiga-

ciones actuales apuntan a estimar esa incertidumbre (o lo contrario, la predecibilidad) mediante probabilidades.

En este contexto, las predicciones probabilísticas tienen la oportunidad de mejorar la información que los servicios meteorológicos pueden suministrar al público sobre estos eventos de "tiempo severo". Los Sistemas de Predicción por Conjuntos o "Ensamblados" o "Ensembles" (Ensemble Prediction Systems o EPS) son en la actualidad herramientas para la predicción operativa que incluyen la probabilidad de forma natural. En particular, los Sistemas de Predicción por Conjuntos para el Corto Plazo (Short-Range Ensemble Prediction Systems o SREPS) son los candidatos idóneos para la predicción de estos fenómenos de alto impacto social.

¿Cuál es el fundamento de los EPS? Los EPS intentan hacer un muestreo (en el "espacio de fases") de las fuentes de error más importantes que pueden sufrir los modelos numéricos de predicción deterministas (modelos que se generan en supercomputadores y que ofrecen un escenario único al predictor). Estos errores ("incertidumbres") están asociados a muchos factores: a la formulación física del modelo, simplificaciones en los esquemas de parametrización, condiciones iniciales, condiciones de contorno (específico para modelos de área limitada o LAMs), campos de suelo (e.g. temperatura y contenido de agua), entre otros. Mediante la simulación de estos errores, se "desdibuja" el escenario único de la atmósfera predicha, y se ofrece al predictor un abanico de escenarios atmosféricos posibles, con diferentes probabilidades. De este modo, un EPS ofrece información explícita y detallada de la incertidumbre y la predecibilidad.

El predictor dispone así de dos herramientas de diferente naturaleza para idear una primera aproximación del posible estado de la atmósfera. Por un lado, un modelo numérico determinista, de muy alta resolución, que le ofrece un único escenario futuro, susceptible de una única interpretación, pero que puede resultar finalmente erróneo (por ejemplo, en fenómenos de precipitación intensa, pueden no acertar en intensidad y/o localización). Por otro lado, un EPS, en principio de menor resolución, pero que ofrece un abanico más abierto de escenarios, y por tanto, susceptible de captar evoluciones atmosféricas más o menos probables, pero también posibles a partir de un único estado inicial. Este punto cobra especial importancia en casos que puedan llevar asociada la presencia de tiempo severo.

Existen muchas técnicas para el muestreo de incertidumbres atmosféricas. Por ejemplo, los EPS multi-modelo muestrean los errores en la formulación del modelo (Hou and

Kalnay 2001); física estocástica para las parametrizaciones físicas (Buizza et al. 1999); análisis perturbados para errores en las condiciones iniciales ("vectores singulares" ECMWF, Palmer et al. 1997, "vectores criados" NCEP, Toth and Kalnay 1997), etc.

El «ensemble multi-modelo» del INM

Entre todas las técnicas posibles, en el INM se optó por un ensemble "multi-modelo multi-contorno" (así llamado técnicamente) abreviadamente "multi-modelo". Consiste en generar en el supercomputador varios modelos numéricos de área limitada "inicializados" con condiciones iniciales y de contorno de otros varios modelos globales. Se usan cinco modelos de área limitada: High Resolution Limited Area Model (HIRLAM, Scientific Documentation, 2002) del consorcio europeo HIRLAM en el que participa el INM; High resolution Regional Model (HRM, Majesky, 1991; Majewski and Schrodin, 1994) del Deutsche Wetterdienst (DWD); Mesoscale Model version 5 de Penn State University and NCAR (MM5, Dudhia, 1993); Unified Model (UM, Cullen, 1993) del United Kingdom Meteorological Office (UKMO); COSMO Model (LM, Doms and Schättler, 1997) del consorcio europeo COSMO.

Se toman condiciones iniciales y de contorno de cuatro modelos globales: Integrated Forecast System (IFS, Jakob et al., 1999) del ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts, o CEPPM Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio); UM (Cullen, 1993) del UKMO; Global Forecast System (GFS, Sela, 1980, 1982) del National Center for Environmental Predictions (NCEP); Global Model (GME, Majewski et al., 2002) del DWD.

En la actualidad se lanzan predicciones de 72 horas de alcance dos veces al día (00 y 12 UTC), usando los 5 modelos de resolución aproximada 25km. y 40 niveles verticales, con condiciones iniciales y de contorno de los 4 modelos globales. Esta combinación produce un ensemble de 20 miembros. Se proyecta lanzar el mismo ensemble cuatro veces al día (00, 06, 12 y 18 UTC), y en ese caso existe la posibilidad de construir un super-ensemble de 80 miembros combinando los 4 ensambles más recientes (HH, HH-6, HH-12, y HH-18).

Para el post-proceso y generación de productos del sistema, se interpolan el área y grid de integración de cada modelo a un área y grid común de 0.25 grados de latitud y longitud de resolución, mostrados en las Figs. 1, que cubre gran parte del Atlántico Norte, Europa, el Mediterráneo y buena parte de África Septentrional.

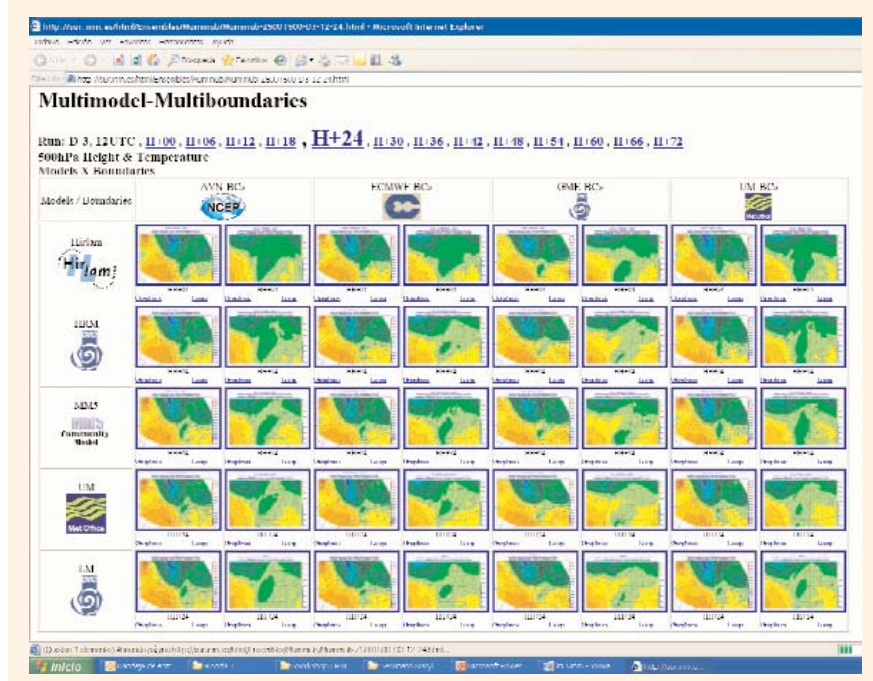
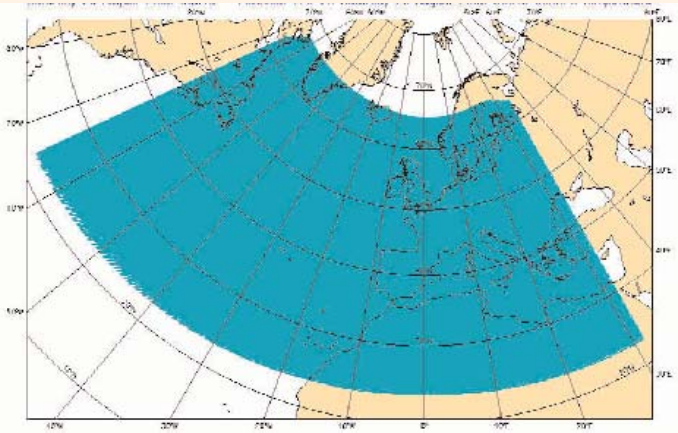
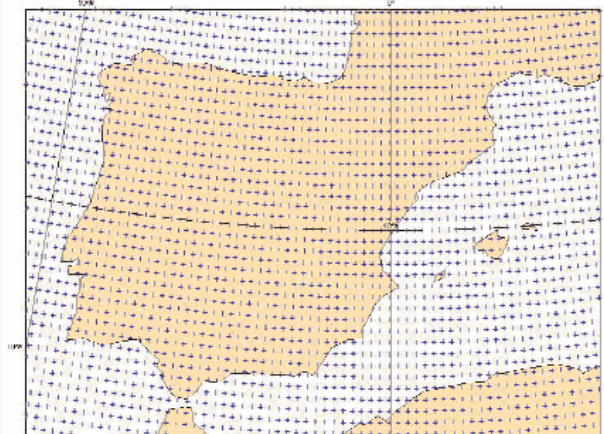
El sistema se monitoriza en tiempo real en un sitio web (visible dentro de la red del INM en <http://sur.inm.es>) con acceso a los productos en tiempo real. En las Figs. 1 pueden verse también como ejemplo unos "sellos" de geopotencial (altitud) y temperatura en 500 hPa.

El INM tiene el compromiso de diseminar en tiempo real los productos resultantes del SREPS a los servicios meteorológicos europeos a partir del primer semestre de este año 2007.

Productos

Como herramienta para la predicción o productos para el usuario, ¿qué aporta el SREPS con respecto a los modelos deterministas?. Lo más característico puede resumirse en:

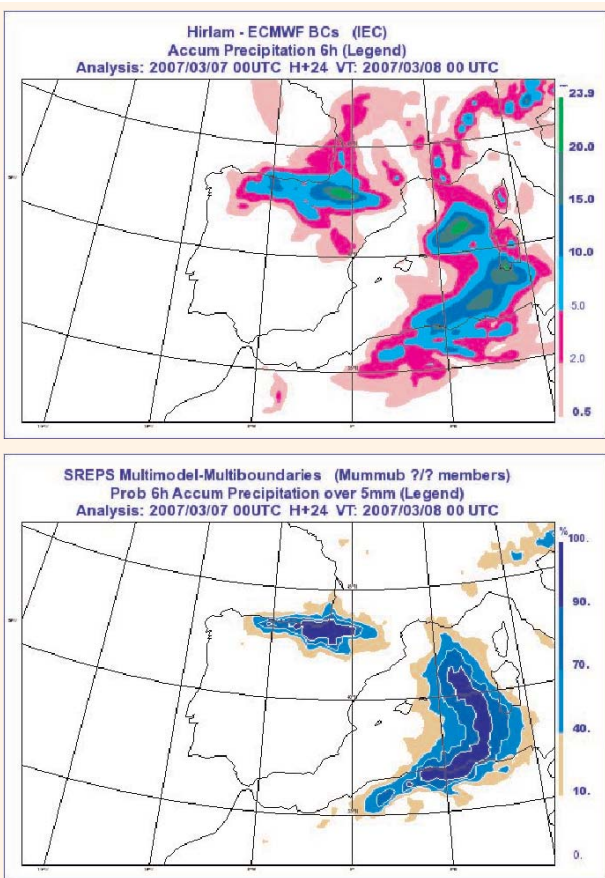
Figs 1 : Grid de salida (arriba), área cubierta (centro) y productos de geopotencial y temperatura (abajo) servidos por el SREPS.



mapas de probabilidad, mapas de dispersión-promedio y EPS-gramas. En desarrollo están mapas de índices relacionados con eventos extremos (e.g. EFI, Extreme Forecast Index, desarrollado por el ECMWF) y un procedimiento de predicción probabilística de trayectorias de ciclones.

Mapas de probabilidad: Los típicos productos meteorológicos de los modelos deterministas muestran en un mapa, con una escala de colores, la gama de valores del parámetro meteorológico de interés. Por ejemplo, la precipitación prevista (entre 0 y 50mm) para mañana entre las 00 y las 06 UTC (Figs 2, arriba) En contraposición, los EPS muestran en un mapa, con una gama de colores, las diferentes probabilidades de que ocurra un evento meteorológico de interés. Por ejemplo, la probabilidad prevista de obtener precipitación superior a 5mm para mañana entre las 00 y las 06 UTC (Figs 2, abajo)

Mapas de dispersión-promedio (spread-ensemble mean): Más específicos para la predicción operativa que para los usuarios, estos mapas muestran por un lado la dispersión que tiene la predicción probabilística de un parámetro, y por



Figs 2 : Mapa previsto de precipitación acumulada en 6 horas (arriba) y mapa previsto de probabilidad de precipitación acumulada mayor que 5mm (abajo).

otro, el valor del promedio del ensemble. Aunque no está demostrada una relación directa entre mayor dispersión y menor predecibilidad, esta relación es válida orientativamente. Así, en aquellas regiones donde la dispersión sea mayor, la incertidumbre será mayor, y el predictor puede poner especial atención en esas zonas (fig. 3).

EPS-gramas: Quizá más específicos para los usuarios que para la predicción operativa, los EPS-gramas son una extensión "probabilística" de los meteogramas. Representan gráfi-

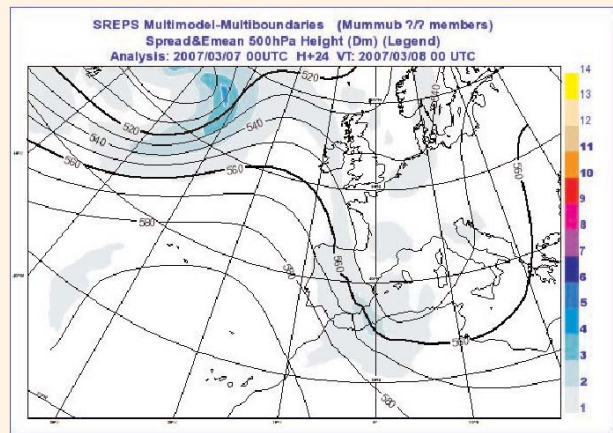


Fig 3 : Mapa dispersión-promedio de geopotencial en 500 hPa.

camente la evolución prevista en el tiempo de variables meteorológicas de interés en un punto geográfico particular, dando un abanico de probabilidades para cada instante en el tiempo (mediante el llamado "box-plot"), lo cual ofrece una idea de la dispersión, valores máximos y mínimos esperables, etc. Los EPS-gramas del ECMWF son enormemente populares en el INM, y representan probabilidades de nubosidad, precipitación, viento y temperatura esperados en una localidad o punto geográfico de interés (fig 4).

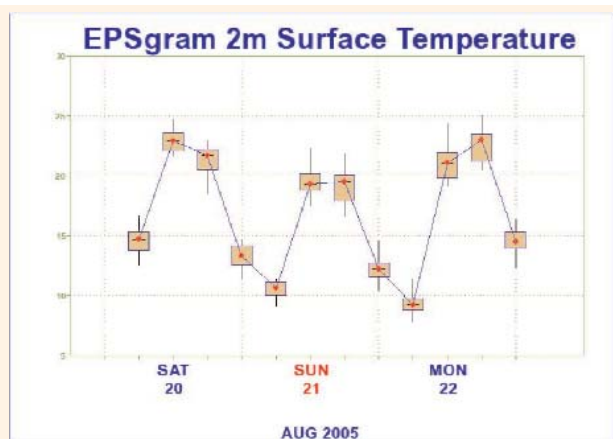


Fig 4 : EPSgrama de temperatura en superficie.

Verificación

La verificación de un ensemble trata de evaluar en qué grado la predicción probabilística es "buena" dado que "exacta" no es por naturaleza. Técnicamente, mediante diferentes medidas se evalúan diversas de propiedades que presenta el ensemble al compararlo con las observaciones: la "calidad"

mediante medidas como la "fiabilidad" o la "resolución", y el "valor", con medidas como el valor económico relativo de la predicción, es decir, el beneficio relativo que aportaría a un usuario la utilización de la predicción probabilística.

Presentamos aquí resultados de verificación del SREPS correspondientes al período abril-junio del año 2006, contra observaciones y contra análisis del ECMWF, resultados bastante prometedores. Se trata de comprobar por un lado la llamada "calibración o fiabilidad sinóptica" (calidad) con las variables Z500, T500, Pmsl (presión al nivel del mar), y por otro lado la respuesta del ensemble frente a eventos binarios: fiabilidad y resolución (calidad) y valor económico relativo (valor) de las variables de superficie viento a 10m, precipitación acumulada en 6 horas y en 24 horas.

Fiabilidad sinóptica (Verificación contra análisis y contra observaciones):

Usando como referencia el análisis del ECMWF, se han obtenido medidas ("scores") deterministas (bias y RMSE) de cada miembro del ensemble por separado (que no mostramos) así como scores probabilísticos del ensemble, con resultados excepcionales. Por otro lado, usando como referencia observaciones sinópticas de superficie y sondeos, se han calculado los mismos scores, con resultados francamente buenos teniendo en cuenta que es más difícil verificar bien contra observaciones. Como muestra de scores probabilísticos contra

observaciones, en la fig. 5 podemos ver el diagrama dispersión-error (spread-skill) para la predicción de alcance 00 hasta 72 horas de la temperatura en 500 hPa, que indica que la relación dispersión-error es francamente buena, aunque el ensemble es sub-dispersivo. La fig. 6 muestra el histograma de rango (Talagrand) para la predicción HH+24 horas de la presión reducida al nivel del mar, el ensemble es ligeramente sub-dispersivo pero muy fiable. Hay que tener en cuenta como referencia para lectores no familiarizados con estas medidas que una predicción perfecta en el caso de la figura 5, sería la que estuviera exactamente sobre la diagonal del diagrama, mientras que en el caso de la figura 6, una predicción perfecta sería la que tuviera las barras exactamente iguales (histograma plano).

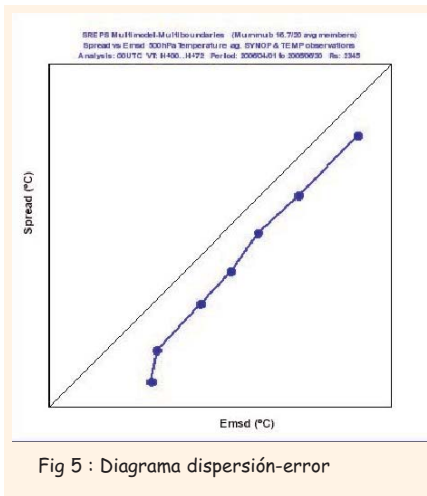


Fig 5 : Diagrama dispersión-error

observaciones, en la fig. 5 podemos ver el diagrama dispersión-error (spread-skill) para la predicción de alcance 00 hasta 72 horas de la temperatura en 500 hPa, que indica que la relación dispersión-error es francamente buena, aunque el ensemble es sub-dispersivo. La fig. 6 muestra el histograma de rango (Talagrand) para la predicción HH+24 horas de la presión reducida al nivel del mar, el ensemble es ligeramente sub-dispersivo pero muy fiable. Hay que tener en cuenta como referencia para lectores no familiarizados con estas medidas que una predicción perfecta en el caso de la figura 5, sería la que estuviera exactamente sobre la diagonal del diagrama, mientras que en el caso de la figura 6, una predicción perfecta sería la que tuviera las barras exactamente iguales (histograma plano).

Respuesta frente a eventos binarios (Verificación contra observaciones):

La respuesta de un ensemble prediciendo eventos binarios se evalúa eligiendo umbrales meteorológicos característicos y comprobando la calidad y valor del ensemble a la hora de predecir uno de estos eventos. Por ejemplo, "la precipitación acumulada en 6 horas es mayor que 5 mm" es un evento binario, puede darse o no darse. La calidad se plasma en dos propiedades: "fiabilidad" (correspondencia entre probabilidad del evento y frecuencia condicional

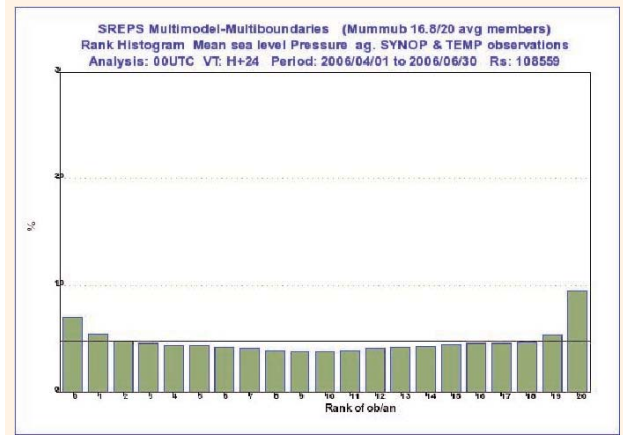


Fig 6 : Histograma de rango o de Talagrand

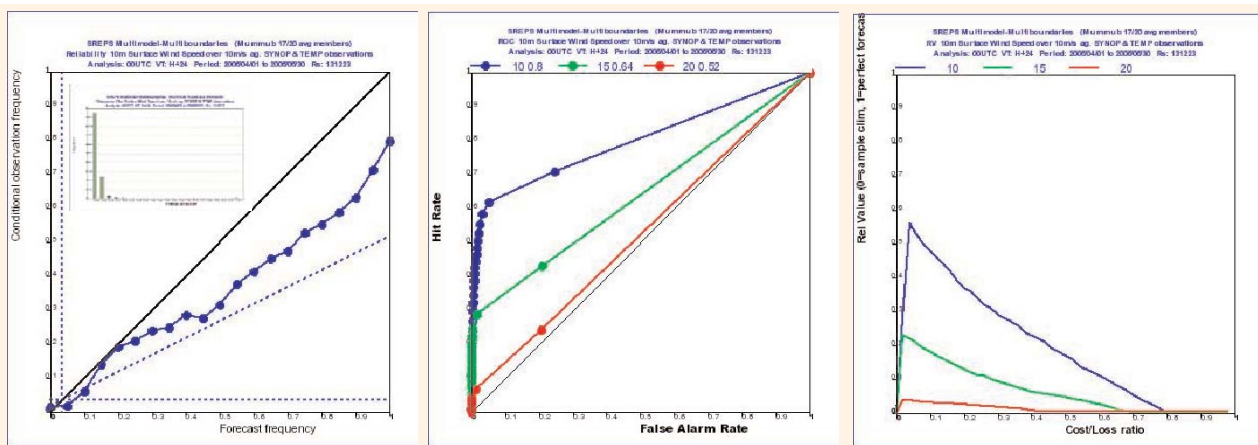
de observación del mismo, representada en diagramas de fiabilidad, tanto mejores cuanto más cercanos a la diagonal) y "resolución" (capacidad del sistema para discernir entre la ocurrencia y no ocurrencia del evento, representada en curvas ROC (Relative Operating Characteristics), tanto mejores cuanto más área presenten por encima de la diagonal. El valor suele representarse en curvas de valor económico relativo, tanto mejores cuanto más área y cuanto más centrado esté el máximo.

La verificación de probabilidades tiene una base estadística, y el ejercicio de verificación de un "ensemble" es más significativo cuanto mayor es la muestra de datos; el período abril-mayo-junio de 2006 mostrado aquí tiene significación suficiente, salvo para umbrales altos, en los que el evento binario tiene lugar en pocas ocasiones (dada la época del año) se presenta ruido en las curvas. Tanto el viento a 10m (en umbrales 10, 15 y 20 m/s) como la precipitación acumulada en 6 horas (en umbrales 1, 5 10 y 20 mm) se han verificado contra la red de estaciones sinópticas, mientras que la precipitación acumulada en 24 horas se ha verificado contra la red de estaciones climatológicas del INM por un lado, y por otro contra la combinación de las redes climatológicas del INM, Météo-France (Servicio Meteorológico Francés) y DWD (Servicio Meteorológico Alemán).

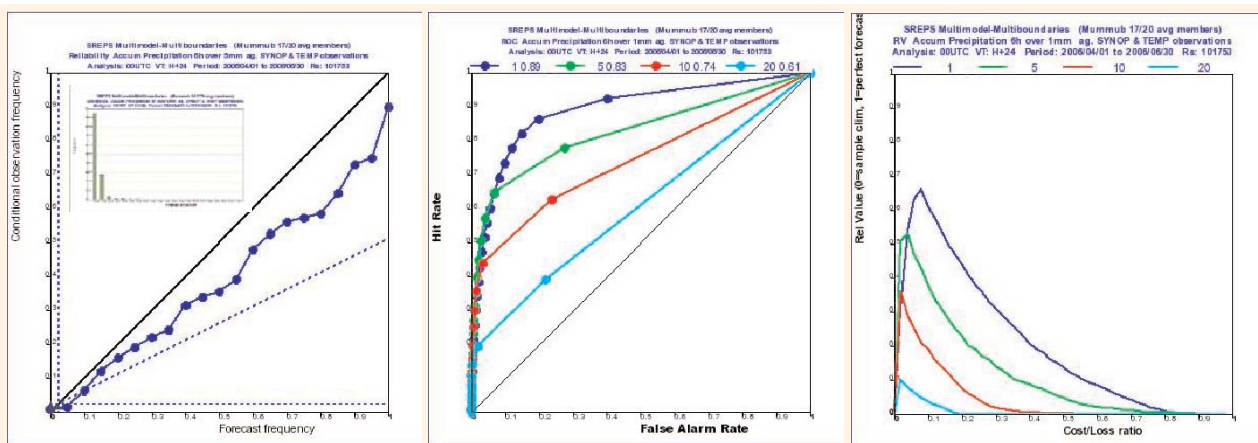
Las figs. 7 muestran el viento a 10 m contra estaciones sinópticas y las figs. 8 la precipitación acumulada en 6 horas también contra estaciones sinópticas, para el alcance HH+24. En ambas figuras, podemos ver, a la izquierda, la fiabilidad para un umbral (10 m/s en el caso del viento y 5 mm en la precipitación), en el centro, las curvas y áreas ROC para todos los umbrales y en la parte de la derecha, el valor económico relativo para todos los umbrales.

Las figs. 9 muestran, con la misma disposición que las anteriores, la precipitación acumulada en 24 horas contra la red climatológica del INM y las figs. 10 contra la combinación de redes INM – Météo-France - DWD, para el alcance HH+30 (En este caso las figuras de la izquierda se refieren a la fiabilidad para el umbral de 5 mm.)

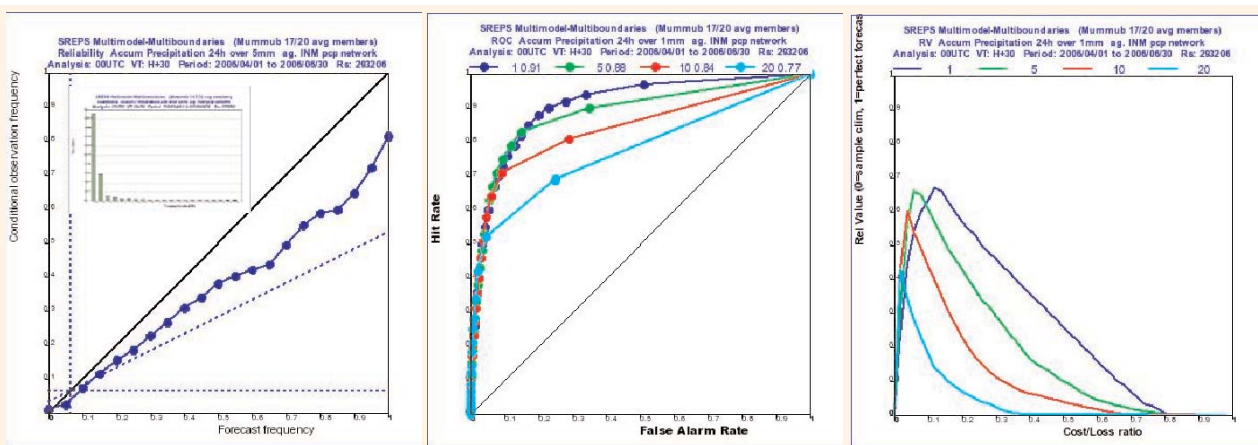
De estos resultados se deduce que el SREPS es un ensemble calibrado (fiable) sinópticamente aunque ligeramente sub-dispersivo, y cuya respuesta prediciendo eventos binarios estándar es fiable, con buena resolución y con valor económico significativo. La calidad y el valor del SREPS como sistema predictivo son francamente buenos, aunque aún son mejora-



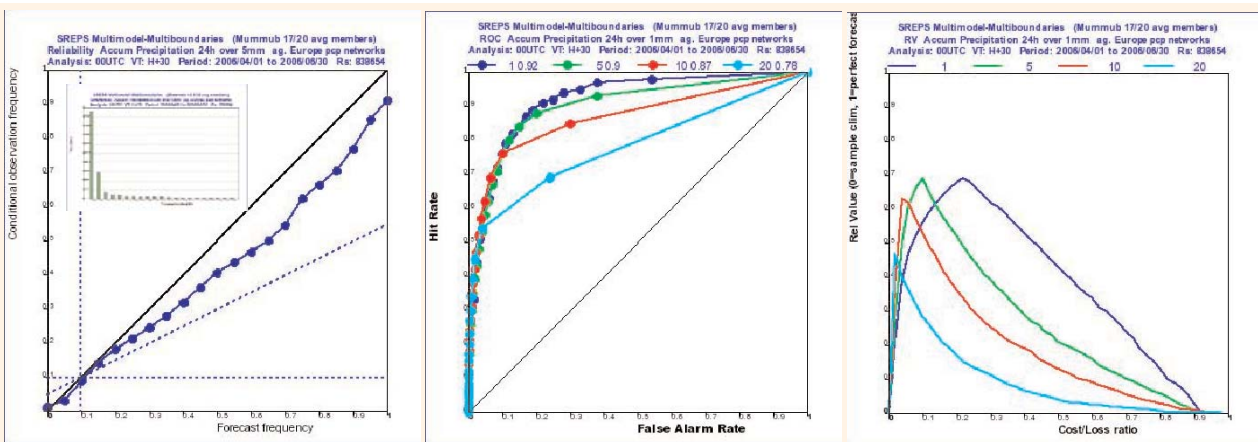
Figs 7 : Verificación del viento a 10 metros contra estaciones sinópticas para un alcance de HH+24



Figs 8 : Verificación de la precipitación acumulada en 6 horas contra estaciones sinópticas para un alcance de HH+24



Figs 9 : Verificación de la precipitación acumulada en 24 horas contra estaciones climatológicas del INM para un alcance de HH+24



Figs 10 : Verificación de la precip. acumulada en 24 horas contra estaciones climatológicas INM-MF-DWD para un alcance de HH+30

bles. Hay varias líneas de investigación y desarrollo interesantes, tanto para mejorar este ensemble como para compararlo con otras alternativas de predicción probabilística. La aplicación de física estocástica en el ensemble (utilizada en el ECMWF) puede aportar mejoras en la calibración del mismo. Las técnicas estadísticas avanzadas en el post-proceso (en particular el llamado "Bayesian Model Averaging" o BMA), muestran resultados excepcionales en las primeras pruebas, corrigiendo la dispersión del ensemble y por ello dejándolo perfectamente calibrado. La técnica "time-lagging" para construir un super-ensemble agrupando varias pasadas también está dando buenos resultados. Se ha probado también un ensemble híbrido, que rescata la parte de la información de la "incertidumbre" de un ensemble, para agregarla a un modelo determinista de más alta resolución, y por tanto, 'a priori' más "exacto" y sobre todo "detallado", obteniendo así un ensemble de más "resolución", es decir, con más "detalle". Las técnicas de generación de ensambles difusivos, también en pruebas, pueden mejorar la predicción probabilística de la precipitación (una de las más importantes).

Conclusiones

El sistema de predicción por conjuntos para el corto plazo (SREPS) desarrollado en el INM puede ser una herramienta idónea de apoyo en la predicción operativa de fenómenos severos. En <http://sur.inm.es> (accesible solamente desde la intranet del INM) pueden consultarse mapas de probabilidad, dispersión-promedio, EPSgramas, en tiempo real y se planea desarrollar mapas de índices como el EFI, así como penachos de trayectorias de ciclones.

Como todos los sistemas de predicciones por conjuntos el SREPS proporciona predicciones probabilísticas de parámetros meteorológicos, o sea, la probabilidad de que un determinado parámetro exceda un umbral predefinido (por ejemplo que la precipitación en 6 horas sea mayor de 20 mm en un lugar) y como está diseñado pensando en el corto plazo su principal aplicación son los parámetros de superficie, o sea, precipitación, viento a 10 metros y temperatura a 2 metros.

Los resultados de verificación del pasado año 2006 son francamente buenos. El SREPS es sinópticamente fiable, y presenta una buena respuesta (es fiable, tiene resolución y valor) prediciendo eventos binarios relacionados con el viento a 10 m y la precipitación acumulada en 6 y en 24 horas, es decir tiene calidad y valor.

El SREPS puede mejorarse como sistema predictivo mediante física estocástica, técnicas de post-proceso como BMA o "time-lagging", ensembles híbridos o ensambles difusivos.

Agradecimientos:

Este proyecto surgió en el INM en el año 2002 como una idea del Jefe del Área de Modelización Bartolomé Orfila. El desarrollo y puesta en operación de un sistema tan complejo como el que se detalla en este artículo incluye el trabajo de mucha más gente de la que aparece como autores del mismo, tanto de dentro como de fuera del INM. Es un proyecto que ha contado con el apoyo decidido de todo el INM, en especial del Área de Telemática. Por eso los autores quieren agradecer la

dedicación y el apoyo de todas las personas que, de una manera o de otra, han colaborado con ellos en el desarrollo e implantación del sistema. En particular nos gustaría citar a Eduardo Monreal, Raúl Corredor y Oscar García Colombo del Área de Telemática, José A. López del Servicio de Desarrollos Climatológicos y a Francisco Martín León del STAP. Asimismo deseamos citar a Jorge Bornemann del UKMO, Detlev Majewski del DWD y a Martin Leutbecher, Manuel Fuentes y a todo el equipo de desarrollo de la aplicación metview, del ECMWF. Agradecemos especialmente a Ana Genovés Terol, del Centro Meteorológico Territorial en Islas Baleares, la revisión y los comentarios hechos para este artículo. Finalmente y de manera especial queremos agradecer el apoyo que el proyecto tuvo desde el principio de la Dra. Eugenia Kalnay de la Universidad de Maryland.

Referencias

- Arribas A.**, Robertson K.B., and Mylne, K.R., 2005: Test of Poor Man's Ensemble Prediction System. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 1825-1839.
- Buizza R.**, Miller, M., and Palmer, T.N., 1999: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 2887-2908.
- Cullen, M. J. P.**, 1993: The unified forecast/climate model. *Meteorol. Mag.*, 122, 81-94.
- Doms, G.** and Schättler, U., 1997: The Nonhydrostatic Area Model LM (Lokal-Modell) of DWD. Part I: Scientific Documentation. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach. March 1997.
- Dudhia J.**, 1993: A nonhydrostatic Penn State-NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493-1523.
- HIRLAM** Scientific Documentation, 2002: <http://hirlam.knmi.nl>
- Hou D.**, Kalnay E., and Droegemeier, K.K., 2001: Objective Verification of the SAMEX'98 Ensemble Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 73-91.
- Jakob, C.**, E. Andersson, A. Beljaars, R. Buizza, M. Fisher, E. Gérard, A. Ghelli, P. Janssen, G. Kelly, A. P. McNally, M. Miller, A. Simmons, J. Teixeira, and P. Viterbo: The IFS cycle CY21r4 made operational in October 1999. {ECMWF Newsletter}, {#f 87}, 2-9.
- Majewski, D.** Liermann, D., Prohl, P., Ritter, B., Buchhold, M., Hanisich, T., Paul, G., Werger, W. and Baumgardner, J.: The operational Global Icosahedral-Hexagonal gridpoint model GME: Description and High-resolution tests. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 319-338.
- Majewski, D.**, 1991: The Europa-Model of DW, ECMWF Seminar on numerical methods in Atmospheric Science, 2, 147-191.
- Majewski, D.** and Schrodin, R., 1994: Short description of the Europa-Modell (EM) and Deutschland Modell (DM) of the DVD. *Q. Bull.*
- Palmer T.N.**, Barkmeier J., Buizza R., and Petroliaigis T., 1997: The ECMWF Ensemble Prediction System. *Meteorol. Appl.*, 4, 301-304.
- Palmer, T.N.**, Alessandri, A., Andersen, U., Cantelaube, P. Davey, M, et al., 2004: Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *B.A.M.S.*, 85, 853-872.
- Sela, J.**, 1980: Spectral modeling at the National Meteorological Center, *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1279-1292.
- Sela, J.G.**, 1982: The NMC Spectral Model, NOAA Technical Report NWS-30, 36 pp.
- Toth Z.**, and Kalnay E., 1997: Ensemble Forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 3297-3319.