

Mejoras en la técnica de la predicción numérica del tiempo con modelos mundiales

por A. HOLLINGSWORTH¹, A. J. SIMMONS¹, A. GHELLI¹, T. TSUYUKI², T. HART³

Introducción

El invento del telégrafo a mediados del siglo XIX llevó a la fundación de la Organización predecesora de la OMM, la OMI, con el objetivo de facilitar predicciones meteorológicas en tiempo real mediante un rápido intercambio internacional de observaciones en tiempo real. A principios del siglo XX, L. F. Richardson, basándose en las ideas de Vilhelm Bjerknes, propuso la primera formulación matemática de un método de predicción numérica del tiempo (PNT), pero entonces su propuesta no era práctica, por la falta de equipos informáticos lo suficientemente rápidos.

Después de la Segunda Guerra Mundial, John Von Neumann, en Princeton, reunió a un equipo de meteorólogos y de científicos informáticos para desarrollar un método práctico de PNT utilizando la nueva tecnología informática desarrollada durante la Guerra. En 1954, la PNT ya era una realidad práctica en varios centros. El tremendo desarrollo en el alcance y en la precisión de la PNT en los cincuenta últimos años se ha basado en los cambios en la tecnología de la observación, en las técnicas matemáticas para modelizar fluidos turbulentos, en las ciencias de la física y de la química atmosférica, en las técnicas de asimilación de datos, en la ciencia y la tecnología informáticas y en la tecnología de las comunicaciones.

La llegada de los satélites meteorológicos disparó el desarrollo del Programa de la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) de la OMM, en 1963. Los principios sobre los que se basa el Programa de la VMM han jugado un papel vital para permitir y apoyar estos desarrollos en la predicción a lo largo de las últimas décadas.

Los importantes desarrollos de la ciencia meteorológica han acompañado los desarrollos de la tecnología meteorológica y se han visto facilitados por ellos. El punto de vista sinóptico de la meteorología, desarrollado en el siglo XIX, llevó a una gran evolución de

la ciencia meteorológica. La urgencia por comprender la dinámica de las perturbaciones de latitudes medias condujo a los estudios dinámicos pioneros de Rossby, Charney y Eady. Estos estudios y otros afines justificaron la aproximación cuasigeostrofica que sustentaba los primeros modelos cuasigeostrofos, que ofrecieron las primeras predicciones numéricas del tiempo y las primeras integraciones de la circulación general (Lewis, 2000).

En los 40 ó 50 últimos años hemos sido testigos de increíbles desarrollos en la potencia de los ordenadores, y en la capacidad de los satélites operativos y de investigación. Ha habido importantes experimentos de campo, el EMM a escala mundial y el GATE, el TOGA-COARE, el ALPEX y el ATEX (por nombrar solo unos pocos) a escala regional. Todas estas inversiones han mejorado de forma considerable nuestro conocimiento científico de la atmósfera, dando lugar a métodos de asimilación de datos y a modelos de predicción sustancialmente mejores.

La Vigilancia Meteorológica Mundial ha ofrecido una contribución técnica importantísima a los desarrollos operativos de los cuarenta últimos años. Este artículo resume el efecto de los últimos desarrollos en la técnica de la predicción operativa.

Mejoras en las zonas extratropicales del hemisferio norte

Se utilizan muchas medidas para evaluar la calidad de las predicciones meteorológicas (Wilks, 1995). Aquí se usan varias medidas para ilustrar distintos aspectos del rendimiento de la predicción. Una de las medidas más comunes del rendimiento de la predicción a gran escala para un campo escalar es el coeficiente de correlación de la anomalía, que mide la correlación entre la anomalía de la predicción a partir de la climatología y la anomalía observada. Un valor positivo del coeficiente de correlación de la anomalía indica que la técnica es positiva. Sin embargo, se acepta generalmente que, para que una predicción tenga una técnica útil, el coeficiente de correlación de la anomalía para la altura geopotencial debería ser mayor que 0,6 (Hollingsworth y otros, 1980). La Figura 1 muestra el coeficiente de correlación de la anomalía del geopotencial de 500 hPa

¹ Centro Europeo de Predicción Meteorológica de Medio Plazo (CEPMMP)

² Servicio Meteorológico Japonés (JMA)

³ Oficina de Meteorología de Australia

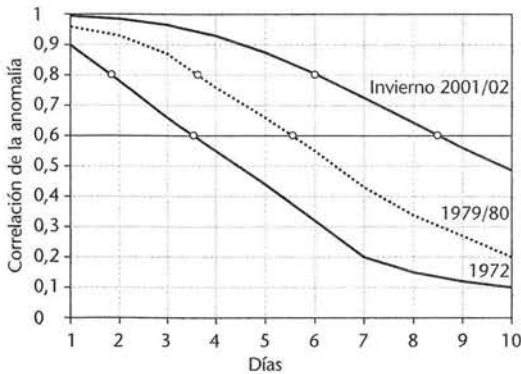


Figura 1 — Valores de la correlación de la anomalía para predicciones del geopotencial de 500 hPa en el hemisferio norte según Miyakoda y otros (1972), etiquetada con 1972, de las predicciones operativas diarias del CEPMMMP para el periodo comprendido entre diciembre de 1979 y febrero de 1980 (etiquetada 1979/1980) y de las predicciones operativas diarias del CEPMMMP para el periodo comprendido entre diciembre de 2001 y febrero de 2002 (etiquetada invierno 2001/2002)

como función del intervalo de predicción para tres conjuntos de predicciones. La curva etiquetada con el 1972 muestra los resultados del innovador trabajo de Miyakoda y otros (1972). Se muestran los resultados para doce casos de invierno, y representan la vanguardia de principios de la década de los setenta. Las curvas etiquetadas con 1979/1980 e invierno de 2001/2002 muestran el rendimiento del modelo del CEPMMMP en el trimestre diciembre-febrero de los años correspondientes.

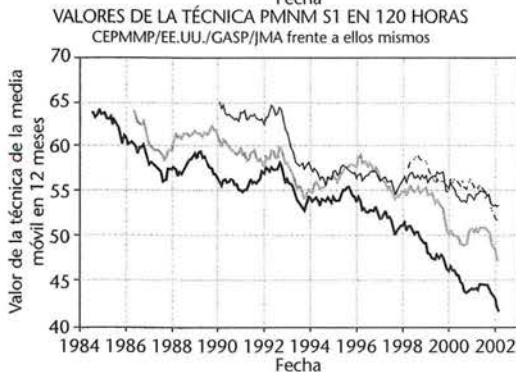
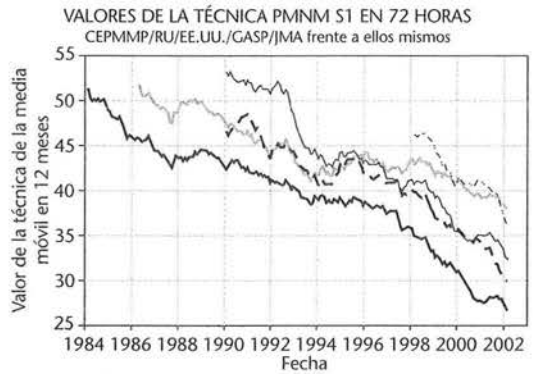
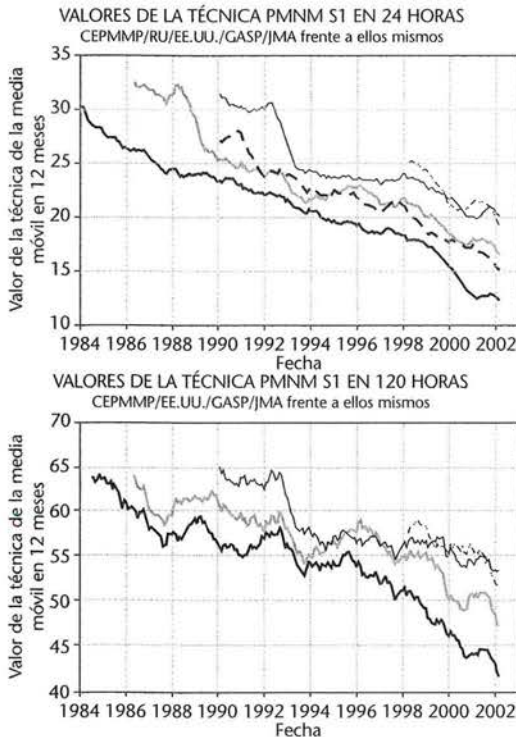
La Figura 1 muestra que el intervalo de técnica útil de predicción (es decir, el intervalo en el que el coeficiente de correlación de la anomalía permanece por encima de 0,6) en el invierno del hemisferio norte ha aumentado de 3,5 días en 1972 a 5,5 días en 1979/1980 y a 8,5 días en 2001/2002. Dicho de otra forma, la capacidad de predicción para el flujo sinóptico a gran escala del invierno del hemisferio norte ha mejorado en cinco días en los 30 últimos años, y en tres días en los 20 últimos años.

La experiencia sinóptica sugiere que las predicciones muy buenas tienen un coeficiente de correlación de la anomalía superior a 0,8. La Figura 1 muestra que el intervalo de las predicciones muy buenas del campo de altura de 500 hPa ha aumentado de algo más de dos días en 1979/1980 a unos 3,5 días en 1979/1980 y a seis días en 2001/2002.

Mejoras en la región de Australia y Nueva Zelanda

Las importantes y continuadas mejoras en la capacidad de predicción en el hemisferio norte se emulan, e incluso se superan en el hemisferio sur. El valor de la técnica S1 es una medida del error cuadrático medio de los gradientes de geopotencial entre un conjunto de puntos fijos de observación (generalmente estaciones de radiosonda o puntos de rejilla). El valor es aproximadamente una medida del error cuadrático medio del viento geostrofico, y se mide de forma que el 0 re-

36



— CEPMMMP
 — RU
 - - - EE.UU.
 — GASP
 - - - JMA

Figura 2 — Valores de S1 para predicciones de la presión media a nivel del mar (PMNM) en la zona de Australia y Nueva Zelanda en intervalos de predicción de 24, 72 y 120 horas verificados por la Oficina Meteorológica de Australia. Para más detalles, véase http://www.bom.gov.au/nmcc/quarterly_summary/October_01/1c/1c.shtml

presenta una predicción perfecta. Cuando uno de los autores era un estudiante de postgrado en los EE.UU., a finales de la década de los sesenta, se consideraba normal un valor S1 de alrededor de 20 para la diferencia entre dos análisis manuales independientes, y por lo tanto indicativo de una predicción excelente.

La región de Australia y Nueva Zelanda es una de las mejores observadas del hemisferio sur, donde el análisis de verificación es más fiable. La Figura 2 muestra la evolución del valor de la técnica S1 desde 1984, calculado en puntos de rejilla que abarcan la región de Australia y Nueva Zelanda para predicciones D+1, D+3 y D+5 de numerosos centros de predicción. Estos resultados y otros afines se han descrito en informes trimestrales regulares del *Australian Meteorological Magazine*, que comienzan con Skinner (1995). Se puede encontrar información más detallada en http://www.bom.gov.au/nmoc/quarterly_summary/October_01/1c/1c.shtml.

Todos los centros mundiales de predicción cuyas predicciones se verifican en la Figura 2, es decir, el CEPMMMP, el *Met Office* del Reino Unido, los Centros Nacionales de Predicción del Medio Ambiente de los EE.UU. (CNPMA), la Oficina Australiana de Meteorología (etiquetada como GASP) y el Servicio Meteorológico Japonés muestran mejoras continuadas en el valor de la técnica S1 para D+1, D+3, D+5 en la región de Australia y Nueva Zelanda, con mejoras especialmente llamativas a partir de mediados de la década de los noventa. Las razones de estas mejoras espectaculares se discuten más adelante.

Rendimiento comparativo de predicciones en las zonas extratropicales del hemisferio norte y del hemisferio sur

Utilizamos la correlación de la anomalía para el geopotencial de 500hPa para comparar el rendimiento de las predicciones en el hemisferio norte y en el hemisferio sur. La Figura 3, que es una versión actualizada de una figura de Simmons y Hollingsworth (2002), utiliza los coeficientes de correlación de la anomalía para comparar los niveles de la capacidad de las predicciones de la altura de 500 hPa en el hemisferio norte y en el hemisferio sur, basándose en las predicciones operativas a tres, cinco y siete días del CEPMMMP desde enero de 1980 hasta septiembre de 2002. Se representan las medias anuales continuas de los valores medios mensuales de la técnica en los dos hemisferios. Los resultados medios anuales del hemisferio norte mostrados en la Figura 3 difieren de los resultados medios trimestrales mostrados en la Figura 1 porque el rendimiento de la predicción varía con la estación y es más alto en invierno. La Figura 3 muestra mejoras continuadas en la capacidad de la predicción media anual

en los dos hemisferios a lo largo de los 20 últimos años. En el hemisferio norte, la mejora ha sido de 1,5 a 2 días en 20 años (por debajo de la mejora en la capacidad de invierno mostrada a lo largo de 23 años en la Figura 1; la mayor parte de la diferencia es atribuible a la rápida mejora del rendimiento del CEPMMMP en el primer año completo de funcionamiento (1980), cuando se eliminaron del nuevo sistema diversos defectos.

El índice total de mejora de la predicción es más alto en el hemisferio sur que en el norte. A principios de la década de los ochenta, los niveles de las técnicas de predicción a tres y cinco días para este hemisferio eran solo un poco mejores que los de las predicciones a cinco y siete días del hemisferio norte. A principios de la década de los ochenta esto no era sorprendente, en vista de la escasez de observaciones convencionales desde tierra y de aeronaves en el hemisferio sur. Sin embargo, actualmente la técnica para 3 y 5 días en el hemisferio sur solo es un poco más baja que la técnica para el mismo intervalo en el hemisferio norte, y hace poco los niveles de la técnica para 7 días se han vuelto muy parecidos. Esto se corresponde con una mejora de unos tres días en la técnica para el hemisferio sur a lo largo de las dos últimas décadas. El índice de mejora desde mediados de la década de los noventa vuelve a ser especialmente notable. Es probable que hayan contribuido a este progreso tres factores:

- Las capacidades de las nuevas unidades avanzadas de sondeo por microondas y los medidores de dispersión ERS y QuickSCAT.
- Las mejoras en la física y en la resolución de los modelos.
- Los desarrollos en la asimilación de datos.

Simmons y Hollingsworth (2002) analizaron las razones de la última mejora en la PNT tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur. Su análisis

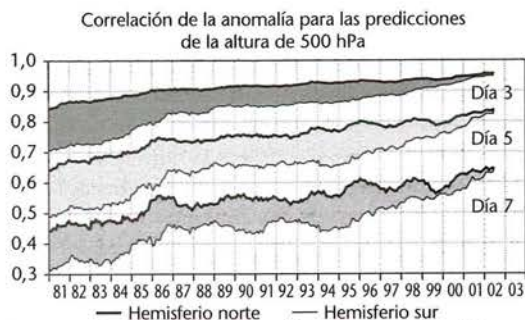


Figura 3 — Coeficientes de la correlación de la anomalía para las predicciones a 3, 5 y 7 días del CEPMMMP de la altura de 500 hPa en las zonas extratropicales del hemisferio norte y del hemisferio sur, representadas en forma de medias anuales continuas de los valores medios mensuales archivados para el período comprendido entre enero de 1980 y septiembre de 2002. Los valores representados de un mes particular son promedios a lo largo de ese mes y de los once meses precedentes. La sombra muestra las diferencias de los valores entre los dos hemisferios en los intervalos de predicción indicados.

muestra que “las mejoras identificables en la asimilación de datos, el modelo y los sistemas de observación (in situ y desde satélite) han aumentado de forma significativa la precisión de las predicciones tanto de corto como de medio plazo”. Además, muestran que “el error cuadrático medio implícito en los análisis de 500 hPa está ahora muy por debajo del nivel de 10 m típico del error de medida de las radiosondas”. Más aún, “el número de errores del hemisferio sur, que era del doble, ha disminuido, en general, y ahora es parecido al del hemisferio norte. Los errores de la predicción a un día en el hemisferio sur se han reducido tanto que las predicciones de medio plazo de la región son casi tan precisas como las del hemisferio norte”.

Mejoras en las predicciones de la trayectoria de los ciclones tropicales en el noroeste del Pacífico

Tsuyuki y otros (2002) resumen la comparación del GTEN (Grupo de Trabajo de Experimentación Numérica) de las verificaciones de la predicción de la trayectoria en el oeste del Pacífico Norte para el período 1991-2000. La Figura 4 representa una muestra de sus resultados, y en ella pueden verse las verificaciones entre 1991 y 2000 de las predicciones D+3 de la trayectoria de cinco centros mundiales de predicción, y de la persistencia. Para la mayor parte de los centros hay una tendencia clara a mejorar la capacidad de predicción a lo largo de la década y, a finales de la década, el error de la trayectoria en predicciones D+3 es inferior a la mitad del error de una predicción de persistencia. Un estudio anterior de Guard y otros (1992) muestra un amplio examen de la técnica de predicciones de trayectorias de tifones en el Centro Mixto de Avisos de Tifones en el período 1970-1990 en la misma zona general del Océano Pacífico Septentrional Occidental. Es interesante comparar los dos conjuntos de resultados, aunque deben hacerse advertencias a la hora de interpretar la comparación sobre las diferencias en las metodologías, el período de estudio, etc.

La Tabla 1 compara los errores de la trayectoria para predicciones D+1, D+2 y D+3 del CEPMMMP a partir de Guard y otros (1992) para el período 1986-1990 y a partir de Tsuyuki y otros (2002) para el período 1996-2002. La comparación tabulada de los dos estudios muestra una importante mejora (~40%) en la técnica de predicción de D+2 y D+3 para las tra-

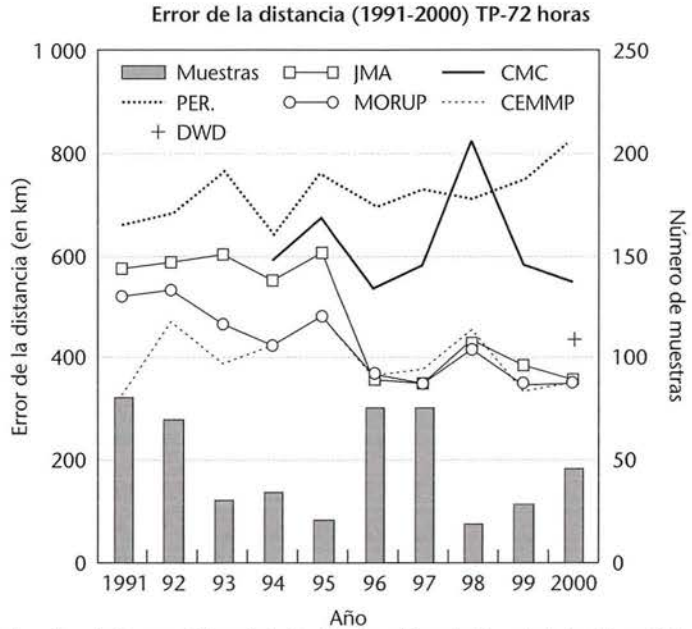


Figura 4 — Serie temporal del error de la distancia en las posiciones de ciclones tropicales de las predicciones a 72 horas de los modelos del Centro Meteorológico Canadiense (CMC), el Deutscher Wetterdienst (DWD), el CEPMMMP, la JMA y Met Office del Reino Unido para el período 1991-2000 en el oeste del Pacífico Norte. La línea de puntos indica el error de la distancia de la predicción de persistencia y las barras indican el número de muestras utilizadas en la verificación (la escala está a la derecha). Los modelos del CMC y del DWD se verificaron solo para 1994-2000 y 2000, respectivamente. En esta verificación se eligieron muestras homogéneas. Tomado de Tsuyuki y otros (2002).

yectorias de ciclones tropicales en el transcurso de las décadas.

Los resultados del CEPMMMP para 1996-2000 son representativos tanto para Met Office del Reino Unido como para el JMA. Estas dos instituciones utilizan un falso tifón, cosa que no hace el CEPMMMP. Se evidencia claramente que un tifón falso mejora las predicciones a corto plazo (de 0 a 24 horas), pero no es tan evidente que el tifón falso mejore sistemáticamente las predicciones de trayectoria en períodos de 72 horas y mayores.

El logro de los sistemas mundiales de PNT al ofrecer esta espectacular mejora en la precisión de las predicciones de trayectorias de tifones es un importante avance para la PNT y para la ciencia de la meteorología. Como en las regiones extratropicales, las mejoras en la técnica de predicción provienen de mejores observaciones (en especial observaciones por satélite), mejores modelos y mejores sistemas de asimilación y dependen fundamentalmente de los avances de la ciencia subyacente y de los avances en las tecnologías subyacentes de observación y de informática.

Los nuevos desarrollos en el uso de un sistema de predicción por conjuntos para estimar las probabilidades de toma de tierra de un ciclón tropical son prometedores, y seguirán aumentando la utilidad de los sistemas mundiales de predicción.

Tabla I

Errores medios (en km) en cinco años de la trayectoria de ciclones tropicales para el JTWC (1986-1990) y el CEPMMMP (1996-2000) estimados, respectivamente, por Guard y otros (1992) y por Tsuyuki y otros (2002). Los resultados del CEPMMMP para 1996-2000 son representativos para Met Office del Reino Unido y para el JMA

	1986-1990	1996-2000	Reducción del error (en porcentaje)
24 horas	200	170	15
48 horas	410	230	44
72 horas	620	380	39

Mejoras en las predicciones determinísticas de precipitación

Al presentar los resultados de la verificación del geopotencial como los mostrados anteriormente, se hace a veces un comentario del tipo "las mejoras en las predicciones del campo de presión se agradecen, pero no hay evidencia de ninguna mejora en las cantidades que realmente le importan al meteorólogo sinóptico, tales como la precipitación" (comunicaciones personales anónimas 1975-2002). Puede demostrarse que el comentario es falso.

Un reciente artículo de McBride y Ebert (2000) presenta los resultados de una comparación del GTEN de predicciones de precipitación a corto plazo de modelos mundiales verificados en la región australiana. Cherubini y otros (2001) tratan los problemas implicados en la verificación de tales predicciones de precipitación. Lalaurette y Ferranti (2001) presentan una variedad de resultados de verificación para el sistema del CEPMMMP, para el que se dispone de una gran serie de verificaciones. La serie temporal de 1993-2002 de los valores equitativos de amenaza para el modelo del CEPMMMP verificado sobre Europa se muestran en la

Figura 5, para el caso de que la precipitación sobrepase los 5 mm en 24 horas. Se muestran las verificaciones para tres intervalos de predicción (predicción acumulada en 18-42 horas, 42-66 horas y 66-90 horas). Todas las predicciones comienzan a las 12:00 UTC y las medidas de precipitación de verificación son acumulaciones de 24 horas que terminan a las 06:00 UTC. La Figura 5 muestra una tendencia creciente consistente de la técnica de predicción en todos estos intervalos de predicción, correspondiente aproximadamente a una mejora de la técnica de un día por década.

Mejoras en las predicciones por conjuntos de la precipitación

La predicción por conjuntos operativa comenzó en el CEPMMMP y en los CNPMA en 1992 y, más recientemente, en otros centros meteorológicos. Los sistemas de predicción por conjuntos se han desarrollado rápidamente, en términos de resolución de los modelos de predicción, tamaño del conjunto y metodologías para perturbar los datos iniciales y los modelos. También se han desarrollado rápidamente los métodos para verificar y explotar los resultados de la predicción por conjuntos (Mullen y Buizza, 2001). La Figura 6 muestra la serie temporal de medias móviles de 12 meses para el período 1995-2002 de los valores de la técnica de Brier para las predicciones probabilísticas por conjuntos de las acumulaciones diarias de precipitación (entre D+3 y D+4) en estaciones sinópticas de Europa para cuatro episodios: precipitación > 1 mm, > 5 mm, > 10 mm y > 20 mm. Los resultados muestran una clara tendencia de mejora en los últimos años, que puede deberse, principalmente, a la mejora de la resolución del modelo de predicción por conjuntos en noviembre de 2000, que pasó de la resolución espectral T_L 159 (~ 120 km) a la resolución T_L 255 (~ 80 km).

Las predicciones por conjuntos ofrecen estimaciones cuantitativas de la función de distribución de probabilidad de la incertidumbre de la predicción de control. La función de distribución de probabilidad es, por naturaleza, de variable múltiple, y puede utilizarse para estimar la probabilidad de que varias variables

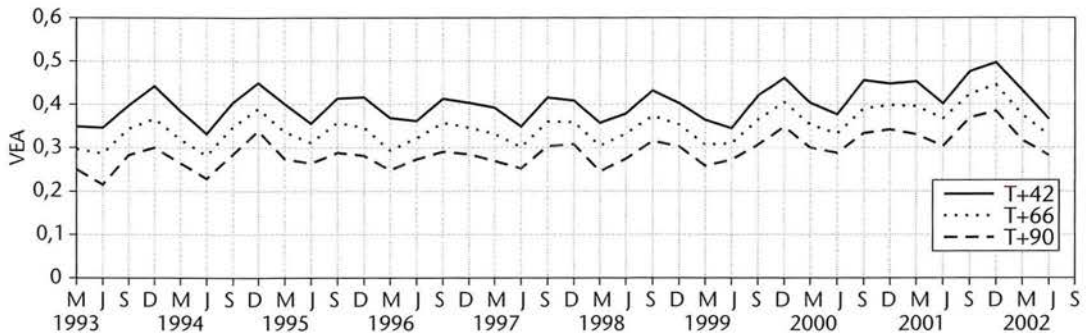


Figura 5 — Serie temporal trimestral del período 1993-2002 del Valor Equitativo de Amenaza (VEA) para las acumulaciones diarias de predicción de precipitación > 5 mm sobre Europa para intervalos de predicción de 18-42 horas (línea continua), 42-66 horas (puntos) y 66-90 horas (rayas)

(p. ej., el viento, la temperatura, la precipitación y las olas oceánicas) sobrepasen umbrales especificados de forma simultánea. La necesidad de predicciones de este tipo surge, a menudo, en la práctica operativa, así que las predicciones por conjuntos se explotan cada vez más en dichas aplicaciones.

Las predicciones por conjuntos pueden usarse para ejecutar variados modelos de aplicaciones (modelos de área limitada, de incendios forestales, hidrológicos, de transporte químico, de precios de la electricidad,...) para estimar la incertidumbre en las predicciones de control derivadas de tales sistemas. La actividad en este campo está creciendo de forma rápida. Las verificaciones de tales predicciones por conjuntos "corriente abajo" tendrán un importante interés práctico y diagnóstico.

Conclusiones

Los resultados discutidos aquí en las referencias muestran que el colectivo meteorológico ha aportado importantes mejoras a la técnica de la predicción en las últimas décadas. Hay muchas razones para esperar una mejora continuada en la capacidad de predicción, dados los desarrollos previstos en la tecnología de observación (tanto in situ como desde el espacio), en la tecnología informática y el progreso esperado en la modelización y en la asimilación de datos, que dependerá, por supuesto, del colectivo de investigación mundial, y del colectivo técnico mundial que gestiona y desarrolla la Vigilancia Meteorológica Mundial.

Agradecimiento

Damos las gracias a F. Lalaurette por sus útiles discusiones y su ayuda con la Figura 6 y a R. Hine e Y. Miao por su ayuda con las figuras.

Referencias

CHERUBINI, T., A. GHELLI y F. LALAURETTE (2001): Verification of precipitation forecasts over the Alpine region using a high density observing network. *ECMWF Technical Memorandum 340*, disponible en el ECMWF [CEPMMP] y descargable en <http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/techmemos/tm00.html>.

GUARD C.P., L.E. CARR, F.H. WELLS, R.A. JEFFRIES, N.D. GURAL, D.K. EDSON (1992): Joint Typhoon Warning Cen-

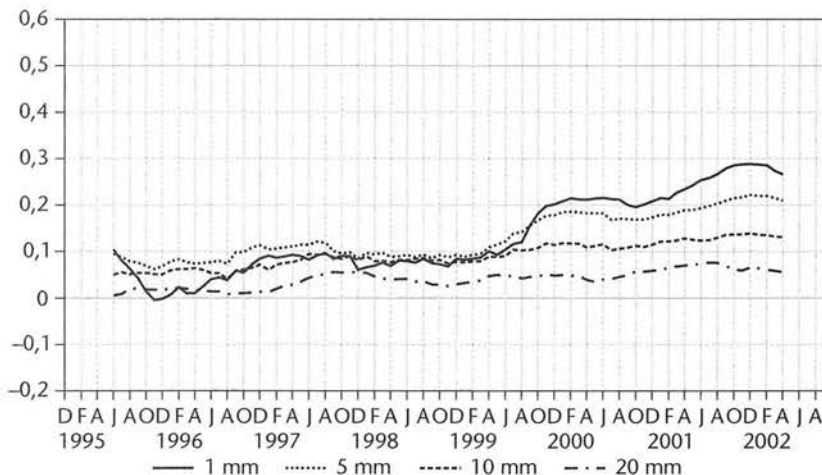


Figura 6 — Serie temporal de medias móviles de 12 meses para el período 1995-2002 de los valores de la técnica de Brier para las predicciones probabilísticas por conjuntos de las acumulaciones diarias de precipitación (entre D+3 y D+4) en estaciones sinópticas de Europa para cuatro episodios: precipitación > 1 mm (línea continua), > 5 mm (puntos), > 10 mm (rayas) y > 20 mm (puntos y rayas).

ter and the Challenges of Multi-basin Tropical Cyclone Forecasting. *Weather and Forecasting*, 7, 328-352.

HOLLINGSWORTH, A., K. ARPE, M. TIEDTKE, M. CAPALDO, H. SAVIJARVI, 1980: The performance of a medium range forecast model in winter-impact of physical parameterisations. *Mon. Weath. Rev.*, 108, 1736-1773.

LALAURETTE, F. y L. FERRANTI (2001): Verification statistics and evaluations of ECMWF forecasts in 2000-2001. *ECMWF Technical Memorandum 346*, disponible en el ECMWF [CEPMMP] y descargable en <http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/techmemos/tm00.html>.

LEWIS, J.M. (2000): Clarifying the Dynamics of the General Circulation: Phillips's 1956 Experiment. Capítulo 3, pp. 91-125, de *General Circulation Model Development: Past, Present and Future*, editado por David A. Randall, International Geophysics Series, Vol. 70, Academic Press, xxv + 807 pp.

MCBRIDE, John L., Elizabeth E. EBERT (2000). Verification of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over Australia. *Weather and Forecasting*, 15, 103-121.

MIYAKODA, K., G.D. HEMBREE, R.F. STRICKLER, I. SHULMAN (1972): Cumulative results of Extended Forecast Experiments I. Model performance for winter cases. *Mon. Weath. Rev.*, 100, 835-855.

MULLEN, S.L., R. BUIZZA (2001): Quantitative Precipitation Forecasts over the United States by the ECMWF Ensemble Prediction System. *Mon. Weath. Rev.*, 129, N.º 4, 638-663.

SIMMONS, A. J. y A. HOLLINGSWORTH (2002): Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 128, 647-677.

SKINNER, W., 1995: Numerical prediction model performance summary April to June 1995. *Aust. Met. Mag.* 44, 309-312.

TSUYUKI, T., R. SAKAI, H. MINO (2002): La intercomparación del GTEN de predicciones de la trayectoria de tifones a partir de modelos globales operativos para 1991-2000. *Boletín de la OMM* 51, 274-278.

WILKS, D.S. (1995): *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An introduction*. International Geophysics Series. Vol. 59. Academic Press, xi, 464 pp., ISBN 0-12-751965-3.