

Referencias

- CHARNEY, J.G., R.G. FLEAGLE, V.E. LALLY, H. RIEHL y D.K. WARK, 1966: The feasibility of a global observation and Analysis experiment. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 47, 200-220.
- LORENZ, E.N., 1963: Deterministic non-periodic flow. *J. Atmo. Sc.* 20, 130-141.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1967: Report of the Study Conference on The Global Atmospheric Research Programme held in Stockholm 28 June-11 July, 1967, jointly organized by the ICSU/IUGG-Committee on Atmospheric Sciences and COSPAR, co-sponsored by WMO.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1969(a): The planning of the First GARP Global Experiment. GPS No. 3, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1969(b): An Introduction to GARP. GPS No. 1, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1972: Report of the Planning Conference on the First GARP Global Experiment, Geneva, 1972. GPS No. 8, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1973: The First GARP Global Experiment - Objectives and Plans. GPS No. 11, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1975: Report of the First Session of the WMO Executive Committee Intergovernmental Panel on the First GARP Global Experiment, Geneva, October 1974. GPS No. 14, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1976(a): Report of the Intergovernmental Planning Meeting for the First GARP Global Experiment, Geneva, February 1976. GPS No. 18, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1976(b): Report of the Extraordinary Session of the WMO Executive Committee Intergovernmental Panel on the First GARP Global Experiment, Geneva, February 1976. GPS No. 19, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.
- WMO/ICSU [OMM/CIUC], 1978: Report of the Fifth Session of the WMO Executive Committee Intergovernmental Panel on the First GARP Global Experiment, Geneva, December 1977. GPS No. 26, WMO/ICSU, Geneva, Switzerland.

Predicción numérica del tiempo mundial: un resultado del FGGE y un salto espectacular para la meteorología

221

Por S. UPPALA*, A. J. SIMMONS* y P. KÅLLBERG*

Después del Año Geofísico Internacional (AGI) de 1958, el sistema de observación empezó a evolucionar hacia un sistema mundial integrado, que incluía las zonas polares. En aquel momento, el CMN de Washington realizaba predicciones operativas diarias que abarcaban el hemisferio norte, y en 1973 se ampliaron a todo el globo. Por lo tanto, se necesitaban más observaciones y con mayor frecuencia del dominio del modelo para poner en marcha esas predicciones. Como apoyo a esto, se llevaron a cabo varias campañas de medida y varios experimentos, incluidas observaciones de satélite y convencionales, uno de los cuales fue el GATE (el Experimento Tropical Atlántico del GARP), en 1974. Fue el primer experimento importante del Programa Mundial de Investigación Atmosférica, cuyo objetivo era comprender la predictibilidad de la atmósfera y ampliar el plazo temporal de las predicciones meteorológicas diarias a más de dos semanas. Después de una cuidadosa evaluación de los resultados bajo la di-

rección de la OMM, se especificaron las necesidades del sistema mundial de observación y se puso en marcha el Primer Experimento Mundial del GARP, de diciembre de 1978 a noviembre de 1979, con dos Períodos Especiales de Observación en enero-febrero y mayo-junio.

Los cuatro objetivos principales definidos por el Comité Conjunto de Organización ((CCO), 1973), para justificar más observaciones de la atmósfera mundial fueron:

- Obtener un mejor conocimiento del movimiento atmosférico para el desarrollo de modelos más realistas para predicciones a mayor plazo, estudios de circulación general y clima.
- Evaluar el límite último de la predictibilidad de los sistemas meteorológicos.
- Desarrollar métodos más potentes para asimilar las observaciones meteorológicas y, en particular, para utilizar datos asíncronos como base para predecir el movimiento a gran escala.
- Diseñar un sistema compuesto óptimo de observación meteorológica para la predicción numéri-

* Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo ((CEPMMP), Reading, Reino Unido).

ca del tiempo rutinaria de las características a escalas mayores de la circulación general.

Como problema físico, la predicción numérica del tiempo es un problema de valores iniciales, dado un modelo de predicción. En los primeros sistemas de predicción de la década de 1950, el estado inicial para la integración del modelo, la predicción, era un análisis sinóptico manual digitalizado con poca interacción entre el modelo y el análisis. Anticipando la disponibilidad de futuras observaciones mundiales, en las décadas de 1960 y 1970 se introdujeron varias ideas innovadoras para planes de asimilación de datos en cuatro dimensiones: el plan intermitente, el plan continuo y el plan adelantado y retrasado continuo. Todos estos planes proponían, a través de distintos métodos, el uso de la predicción a corto plazo como un cálculo previo para el análisis.

Los sistemas de predicción, los modelos y el análisis de la actualidad han evolucionado a partir de estos planes y, en los últimos sistemas de asimilación de datos variacionales hay una estrecha interacción entre las observaciones y el modelo de predicción. Los operadores de las observaciones que computan equivalentes de observaciones a partir de los antecedentes (predicción a seis horas) han permitido, en particular, el uso de radiancias de satélite para cambiar de análisis de recuperaciones de temperatura y humedad realizados por los suministradores de datos al uso directo de radiancias de los centros de predicción. El análisis se ha convertido en un estado del modelo cuya distancia de las observaciones se minimiza en el espacio de observación, teniendo en cuenta los errores tanto de las observaciones como de los antecedentes. Por ejemplo, los perfiles de temperatura y de humedad del modelo se han ajustado de modo que las radiancias computadas a partir de ellos concuerden con las radiancias medidas por los satélites, dentro de los errores de la medida y del cálculo del modelo, a la vez que se mejoran los ajustes con otras observaciones. La calidad de los análisis se vuelve así fuertemente dependiente de la precisión tanto de las observaciones como de la predicción del modelo a corto plazo.

A la vez, se han mejorado, ciertamente, los modelos de predicción a través de una mejor descripción de los procesos físicos y de una mayor re-

solución. Las mejoras resultantes en el funcionamiento de la asimilación de datos y en la pericia de las predicciones a medio plazo han sido importantes (p. ej. Simmons y Hollingsworth, 2002). Los avances en la computación de alto rendimiento, el desarrollo de mejores técnicas matemáticas y en la capacidad de manejo de grandes conjuntos de datos han sido factores adicionales que han supuesto contribuciones importantes.

Es difícil estimar el efecto del FGGE en la predicción numérica del tiempo directamente a partir del funcionamiento de las predicciones operativas, debido a los cambios en la calidad provocados por las frecuentes mejoras hechas en los sistemas de predicción. En vez de eso, los reanálisis mundiales, el RA-I de los Centros Nacionales de Predicción del Medio Ambiente (NCEP) (Kalnay y otros, 1996) y el ERA-40 del CEPMM (Uppala, 2002; Simmons, 2002) (véase también el *Boletín de la OMM* 53(2), 151-156 (Ed.)), y las predicciones que se hacen con ellos, ofrecen una base mejor para evaluar el efecto del sistema de observación del FGGE, ya que los sistemas de reanálisis se basan en técnicas modernas que permanecen invariables todo lo posible cuando se aplican para analizar las observaciones tomadas a lo largo de décadas antes y después del FGGE.

El sistema de observación compuesto del FGGE

En la planificación del FGGE, se utilizaron experimentos numéricos para ayudar a calcular la resolución espacial y temporal necesaria de las observaciones. La intención era poder juzgar detalladamente lo que haría falta para observar la atmósfera con fines operativos. Estaba claro que ninguna técnica de observación sencilla era capaz de satisfacer los requisitos de observación y, por lo tanto, hacía falta un sistema mundial compuesto de observación que constara de dos elementos principales. Estos fueron expuestos por el CMO (1973):

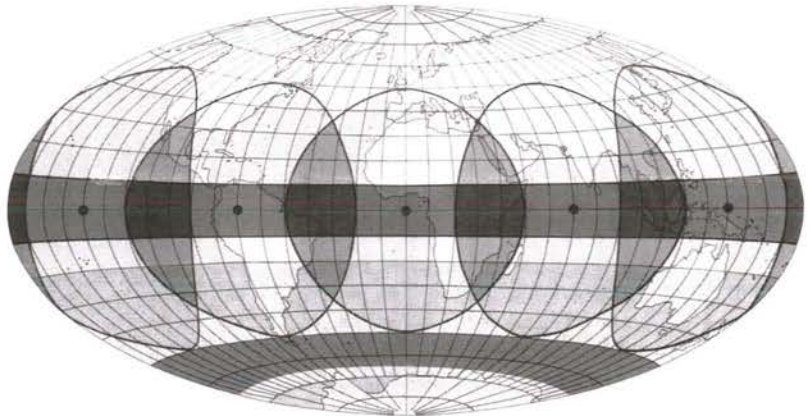


Figura 1 — Ilustración esquemática de la cobertura de los distintos subsistemas de observación del Experimento Mundial: cinco satélites geoestacionarios, dos satélites de órbita polar, una combinación de globos de transporte y de barcos dedicados, globos a nivel constante, boyas y estaciones automáticas

Subsistemas de observación que estarían operativos durante el FGGE

- El subsistema de superficie de la VMM, que incorporaba estaciones de superficie y de aire en altura, barcos comerciales y aeronaves.
- Dos o más satélites de órbita polar con instrumentos de sondeo para observar la temperatura y la humedad.
- Cinco satélites geoestacionarios para la obtención de vientos en dos niveles.

Subsistemas especiales para cubrir los huecos críticos en el sistema operativo de observación

- Sistemas de Observación de Vientos Tropicales Especiales.
- Globos a nivel constante para la región comprendida entre 20°S y 90°S.
- Boyas a la deriva en el océano austral entre 50°S y 65°S.
- Medidas automáticas de presión y temperatura en superficie en las regiones polares.
- Para localizar y recoger los datos de las boyas a la deriva y de los globos a nivel constante, se diseñó el sistema Argos y se instaló a bordo de los satélites TIROS-N y NOAA-6.

En la Figura 1 se muestra una ilustración esquemática del sistema compuesto de observación. Como prueba del éxito del FGGE para el diseño del sistema mundial de observación, la estructura del sistema compuesto ha seguido siendo, a pesar de las mejoras, la base del Sistema Mundial de Observación. La excepción es el sistema de globos a nivel constante, que ofrecía observaciones de gran calidad de viento y presión pero que fueron excluidas del último sistema de observación por razones no meteorológicas. El FGGE también ha tenido una importancia tremenda para fijar una calidad alta para la mejora del sistema de obser-

vación con innovadores sistemas satelitales de observación y para fomentar la colaboración internacional en la evaluación del efecto del sistema de observación y el desarrollo de sistemas mundiales de predicción.

Los "reanálisis" del FGGE en el CEPMMP y el GFDL

Los primeros "reanálisis" del año del FGGE se realizaron de manera simultánea en el CEPMMP (Bengtsson y otros, 1982) y en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL) (Ploshay y otros, 1983). En aquel momento, estaba mejorando de manera muy rápida la asimilación mundial de datos (p. ej., Lorenc, 1981) y, con ella, la calidad de la predicción. El objetivo inicial era entonces aprender cómo utilizar los nuevos sistemas mundiales de observación y las observaciones especiales desplegadas. Los experimentos del sistema de observación demostraron de manera clara el valor de cada sistema de observación (p. ej., Uppala y otros, 1984; Källberg y Delsol, 1986). Los vectores de movimiento atmosférico (SATOB) demostraron ser importantes para el análisis sobre las regiones tropicales, mientras que los perfiles de temperatura de satélite recuperados (SATEM) eran de vital importancia para los análisis fuera del trópico sobre zonas oceánicas. Los datos de aeronaves fueron una aportación valiosa. Los datos de boyas a la deriva en el océano austral suministraron observaciones de buena calidad de la presión con una frecuencia alta en zonas con escasez de datos. Los sistemas de observación del viento tropical revelaron con más detalle las estructuras divergentes en zonas con convección activa, ofreciendo nuevos y continuos retos para modelizar funciones de estructura estadística (p. ej., Uden, 1989; Derber y Bouttier, 1999). Cuando, en ciertas situaciones sinópticas, había redundancia entre sistemas, se consideraba un punto fuerte, en vez de un punto débil del sistema compuesto. El primer reanálisis se repitió después con un siste-

Concordancias de los antecedentes cuadráticos medios y de los análisis de la presión SYNOP (hPa)

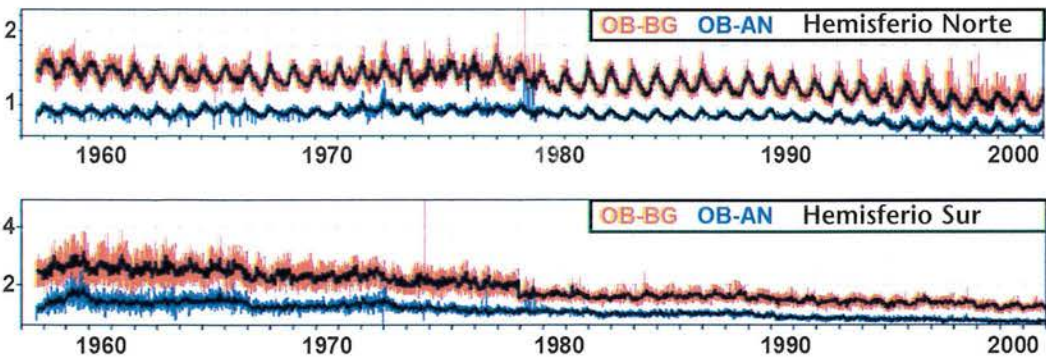


Figura 2— Concordancias de los antecedentes cuadráticos medios de ERA-40 (en rojo: diarios; en negro: media móvil en 15 días) y de los análisis (en azul: diario; en negro: media móvil en 15 días) en las observaciones de la presión superficial SYNOP y SHIP a las 00 UTC sobre las zonas exteriores a los trópicos en los hemisferios septentrional (arriba) y meridional (abajo)

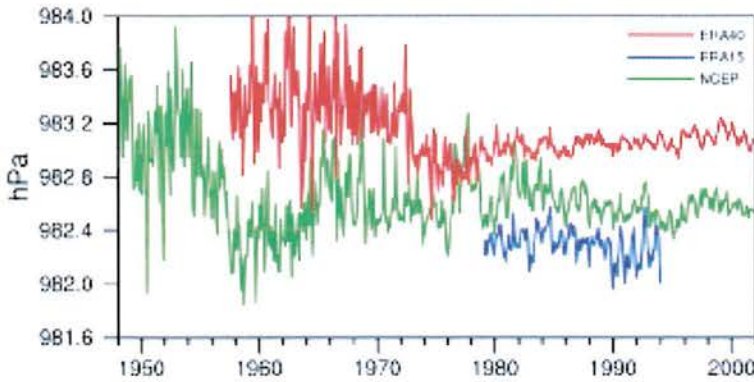


Figura 3 — Series temporales de las presiones superficiales medias mundiales para el aire seco (Pa) para los tres reanálisis distintos de ERA-40 (en rojo), ERA-15 (en azul) y los NCEP del CNIA (en verde) en hPa. (Trenberth y Smith, 2004)

ma de análisis mejorado y con una mejor recogida y calidad de las observaciones en el CEPMMMP (Uppala, 1987) y en el GFDL (Ploshay y otros, 1991).

La señal del FGGE en el reanálisis del período comprendido entre 1957 y 2002, ERA-40

224

El CEPMMMP ha concluido un reanálisis ERA-40 de 45 años, de 1957 a 2002, solapando el anterior reanálisis del CEPMMMP ERA-15, de 1979 a 1983, y complementando el reanálisis de los NCEP para los años anteriores. Se aplicó la técnica variacional de tres dimensiones (Courtier y otros, 1996) utilizando la versión T159L60 del Sistema Integrado de Predicción del CEPMMMP para realizar análisis cada seis horas. Los análisis implicaban un uso integral de los datos de satélites, empezando por los primeros datos del Radiómetro de Medida del Perfil Vertical de la Temperatura (VTPR) desde 1973, incluyendo después los datos del TOVS y de los vientos de nubes que empezaron en el año del FGGE, 1979, el SSM/I a partir de 1987, ERS a partir de 1991 y

la HIRS del Nivel-IC, de la MSU y de la SSU en lugar de las viejas recuperaciones del SATEM.

Se han obtenido estadísticos a largo plazo a partir de la información aportada por el análisis, un producto de ERA-40 que incluye las diferencias entre los valores observados y los análisis correspondientes y entre los valores observados y los valores anteriores. La Figura 2 muestra la serie temporal de los ajustes hexahorarios entre los antecedentes y los análisis para las medidas de presión superficial SYNOP y SHIP para la zona exterior a los trópicos de los hemisferios septentrional y meridional. Se produce una mejora general en la concordancia con las medidas de la presión superficial a lo largo del período de ERA-40. Los cambios en la cobertura de los datos podrían afectar a este resultado, ya que una mayor cobertura en los subtropicos, donde la discrepancia es menor, tendería a valores más bajos en los gráficos, como donde no se aplica promediado de superficie. Sin embargo, la mejora en la concordancia de los antecedentes a principios de 1979 es, casi seguro, consecuencia de la importante mejora en todo el

Concordancias de los antecedentes cuadráticos medios y de los análisis de la temperatura de radiosonda a 500 hPa (en K)

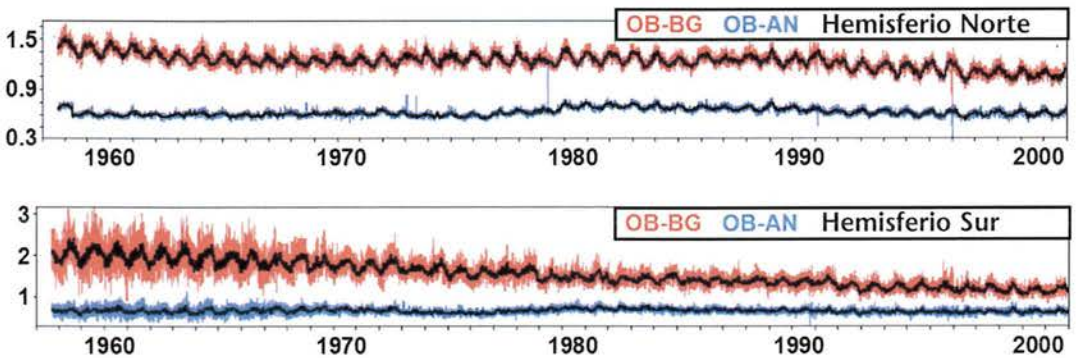


Figura 4 — Concordancias de los antecedentes cuadráticos medios de ERA-40 (en rojo: diarios; en negro: media móvil en 15 días) y de los análisis (en azul: diario; en negro: media móvil en 15 días) en las observaciones de la temperatura de radiosonda a 500 hPa a las 00 UTC sobre las zonas exteriores a los trópicos en los hemisferios septentrional (arriba) y meridional (abajo)

los datos ATOVS de 1998 en adelante. El TOVS consta de tres instrumentos, la Sonda de Infrarrojos de Alta Resolución (HIRS), El Equipo de Sondeo de Microondas (MSU) y el Equipo de Sondeo Estratosférico (SSU). Las observaciones IIB del Nivel Final del FGGE se utilizaron durante el año del FGGE, con la excepción de los datos del TOVS, que se han utilizado en forma de radiancias de

sistema de observación introducida por el sistema compuesto de observación del FGGE.

La Figura 3 muestra la serie temporal de la presión superficial media analizada del aire seco (Pd), una cantidad que debería conservarse (casi exactamente), para los reanálisis de los NCEP, de ERA-15 y de ERA-40. Se ve claro que las dos discontinuidades mayores se produjeron en 1973 y en 1979, cuando hubo cambios importantes en el sistema de observación. A juzgar por la constancia de la Pd, los reanálisis de los NCEP se vuelven cada vez más negros yendo hacia atrás en el tiempo antes de mediados de la década de 1990, mucho más antes de 1979, y las fluctuaciones son bastante grandes antes de mediados de la década de 1960. Claramente, el uso de las radiancias de baja resolución del VTPR (complementadas por las observaciones sintéticas australianas de presión superficial basadas en imágenes de satélite) ha mantenido los reanálisis de ERA-40 más estables a partir de 1972. Antes, para ERA-40, se producen grandes fluctuaciones falsas de mes a mes y de año a año. Se originan, sobre todo, por la falta de datos en el hemisferio austral, como se mide por la incertidumbre del análisis en la presión superficial, la curva azul de la Figura 2.

La Figura 4 muestra las concordancias con las temperaturas de radiosondas a 500 hPa. De nuevo, se

produce una mejora general a lo largo del período de ERA-40. Más que para la presión superficial, puede incluir una componente debida directamente al error decreciente en las medidas que se ajustan. Las concordancias de los antecedentes cuadráticos medios caen de unos 1,4 K a 1 K a lo largo del período para el hemisferio norte, y de unos 2 K a 1 K para el hemisferio sur. El ajuste del análisis a los datos de radiosonda es peor en la década de 1980 que antes, ya que el análisis tiene que coincidir con los datos de radiancia del TOVS, y también con los datos de radiosonda de estos años. Sin embargo, el ajuste del campo anterior no cambia en el hemisferio norte y mejora en el hemisferio sur, un signo de que el análisis ha mejorado globalmente por la disponibilidad de nuevos datos.

Calidad de las predicciones de plazo medio

Una medida de la precisión de los análisis viene dada por la pericia de las predicciones de plazo medio ejecutadas a partir de los mismos. Por lo tanto, se han ejecutado predicciones hasta 10 días diariamente a partir de los análisis de ERA-40.

La Figura 5 muestra dos ejemplos de resultados, que indican el plazo de la predicción (en días) en el que la correlación de la anomalía de la altura de 500 hPa

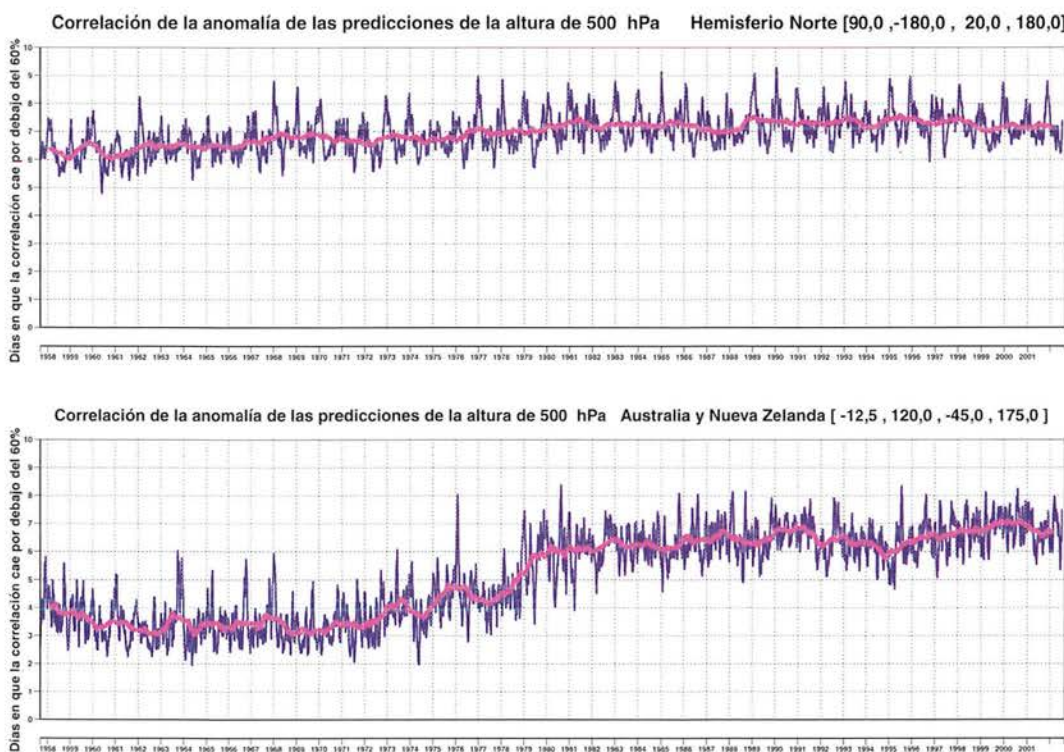


Figura 5 — El plazo de la predicción en días en el que la correlación de la anomalía cae de media por debajo del 60 por ciento para el hemisferio norte (arriba) y para Australia y Nueva Zelanda (abajo). Las curvas azul y rosa representan las medias mensual y anual, respectivamente

cae de media por debajo del 60 por ciento en cada año desde 1958 hasta 2001. Se han elegido las regiones exteriores al trópico en el hemisferio norte y Australia y Nueva Zelanda ya que están relativamente bien observadas a lo largo de ERA-40, lo que ofrece una confianza razonable en la precisión de los análisis de verificación.

Para ambas regiones, las predicciones de ERA-40 mejoran con el tiempo, indicando una mejora con el tiempo del sistema de observación (asumiendo que no hay tendencias en la predictibilidad de la atmósfera). Sin embargo, para el hemisferio norte en conjunto, el plazo medio de las predicciones (curva rosa) es mayor de seis días a lo largo de 1979 y mayor de siete días a partir de ese año, indicando una buena precisión sinóptica de los análisis para todo el período. En contraste, las predicciones de ERA-40 para Australia y Nueva Zelanda son mucho peores hasta 1973, cuando se asimilan por primera vez datos del VTPR. Los análisis de ERA-40 para el hemisferio sur anteriores a 1979 deben utilizarse con mucho más cuidado que sus homólogos para el hemisferio norte y que los análisis posteriores para el hemisferio sur.

Puede verse que las mejoras del sistema de observación más allá de 1979 han tenido un efecto mayor sobre la precisión de la predicción meridional, más que el de la predicción del hemisferio norte, acercando los niveles de pericia de las predicciones.

Lo mismo es cierto para las mejoras del sistema de predicción operativa, que han tenido, generalmente, un efecto mayor en la pericia de la predicción que las mejoras del sistema de observación a partir de 1979. Esto se ve comparando el punto hasta el que mejoran las predicciones operativas a medio plazo y de ERA-40 entre 1980 y 2001 (Figura 6). El rendimiento de ERA-40 no concuerda completamente con el del CEPMMMP en 2001 debido a su uso de una resolución horizontal más baja y a 3D-Var en lugar de 4D-Var. Para el hemisferio norte, los niveles de pericia para los primeros años de ERA-40 son comparables a los del CEPMMMP a mediados de la década de 1980.

Conclusiones

La experiencia tanto de los sistemas de predicción operativa como de los reanálisis ha demostrado la enorme importancia del sistema de observación del FGGE. Durante los 25 años transcurridos desde el FGGE los sistemas de predicción han podido explotar de manera gradual una información cada vez mayor a partir de los mismos sistemas de observación, especialmente del TOVS. En ERA-40, la SSU y la mayor parte de las radiancias de la HIRS se asimilaron directamente durante la primera época. A partir de 1979, se ha analizado la estratosfera con una buena calidad mun-

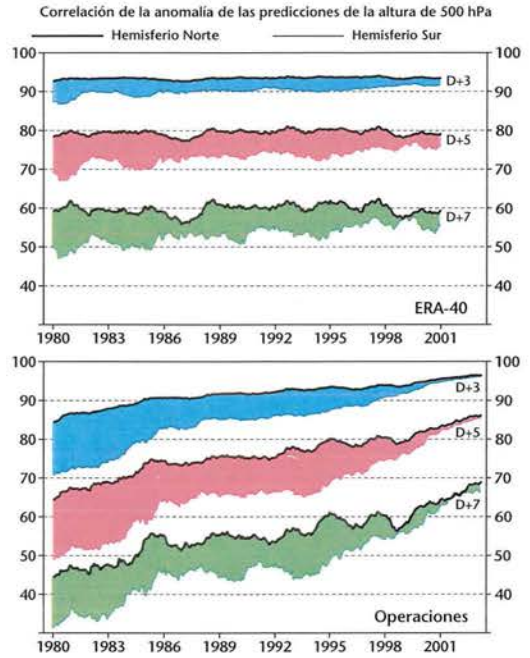


Figura 6 — Las evoluciones temporales, entre 1980 y 2001, de las correlaciones de la anomalía en las predicciones de la altura de 500 hPa en los días D+3, D+5 y D+7 para las operaciones del CEPMMMP (cuadro de abajo) y para ERA-40 (cuadro de arriba) en los dos hemisferios. El área entre las correlaciones de la anomalía hemisférica está sombreada

dial hasta 10 hPa, mientras que en los análisis originales del FGGE el nivel superior analizado estaba a 50 hPa. Se ha desarrollado un método mejor de uso de las radiancias de la HIRS en los análisis de humedad, basado en parte en la experiencia de ERA-40.

Los estudios en progreso sobre las tendencias del clima que utilizan productos de reanálisis, productos a partir de la asimilación de datos de un sistema de predicción, indican que tienen buena calidad después de 1979, comparable con la de las tendencias calculadas de manera independiente. Veinticinco años de observaciones con una cobertura homogénea de satélites, y las técnicas para manejar los sesgos de los sistemas modernos de asimilación de datos, dan a los análisis la estabilidad y la continuidad temporal necesarias.

Todo esto demuestra el logro excepcional de la planificación y la puesta en marcha internacionales conjuntas del experimento meteorológico mundial. En ningún otro momento de la historia del sistema mundial de observación se ha introducido un cambio más profundo con un efecto tan duradero. La calidad de las predicciones numéricas y de los reanálisis lo ha demostrado. El año de 1979 sigue siendo un hito en el desarrollo del Sistema Mundial de Observación y se le considera como la línea divisoria en la calidad del reanálisis moderno que se remonta en el tiempo a las décadas de 1940 y de 1950.

Referencias

- BENGTSSON, L., M. KANAMITSU, P. KÄLLBERG y S. UPPALA, 1982: FGGE 4-dimensional data assimilation at ECMWF. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 29-43.
- COURTIER, P., E. ANDERSSON, W. HECKLEY, J. PAILLEUX, D. VASILJEVIC, M. HAMRUD, A. HOLLINGSWORTH, F. RABIER y M. FISHE, 1998: The ECMWF implementation of three dimensional variational assimilation 3D-Var. Part I: Formulation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 124, 1783-1808.
- DERBER, J. y F. BOUTTIER, 1999: A reformulation of the background error covariance in the ECMWF global data assimilation system. *Tellus*, 51A, 195-222 pp.
- KALNAY, E., M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, A. LEETMAA, R. REYNOLDS y R. JENNE, 1996: The NCEP/NCAR Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- KÄLLBERG, P. y F. DELSOL, 1986: Systematic Biases in Cloud-Track-Wind data from Jet-Stream Regions. Recopilación de artículos presentados en el Simposio de PNT de la OMM y la IUGG, Tokio, 4-8 de agosto de 1986, p. 91.
- LORENC, A.C., 1981: A global three-dimensional multivariate statistical interpretation scheme. *Mon. Weather Rev.*, 109, 701-721.
- PLOSHAY, J.J., R. WHITE y K. MIYAKODA, 1983: FGGE Level III-b daily global analyses. Part I, II, III, IV. Informe ERL GFDL-1 de Datos de la NOAA, 278 pp., 285 pp., 285 pp., 282 pp.
- PLOSHAY, J.J., W.F. STERN y K. MIYAKODA, 1991: FGGE reanalysis at GFDL, *Monthly Weather Review*. Vol. 120, N.º 9, pp. 2083-2108.
- 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.
- SIMMONS, A.J., 2002: Development of the ERA-40 Data Assimilation System. Seminario sobre Reanálisis, 5-9 de noviembre de 2001. Serie de Informes del Proyecto ERA-40 del CEPMM, 3, pp. 11-30.
- TRENBERTH, K.E. y L. SMITH, 2004: The mass of the atmosphere: a constraint on global analyses. Presentado a *J. Climate*.
- UNDEN, P., 1989: Tropical data assimilation and analysis of divergence. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 2495-2517.
- UPPALA, S., P. KÄLLBERG, A. HOLLINGSWORTH y S. TIBALDI, 1985: Results from two recent observing system experiments. Actas del Seminario Nacional sobre El Experimento Meteorológico Mundial, Consejo Nacional de Investigación.
- UPPALA, S., 1987: ECMWF Final Level IIIb Analyses: Analysis System Performance and Impact on Forecast. Seminarios del FGGE, 27-30 de abril de 1987, Airlie House, Virginia.
- UPPALA, S., 2002: ECMWF Reanalysis 1957-2001, ERA-40. Seminario sobre Reanálisis, 5-9 de noviembre de 2001. Serie de Informes del Proyecto ERA-40 del ECMWF, 3, pp. 1-10.
- OMM, Comité Mixto de Organización, 1973: El Primer Experimento Mundial del GARP, Objetivos y Planes. Series de Publicaciones del GARP N.º 11.

Contribuciones de las observaciones de aeronaves al FGGE

Por Joel TENENBAUM¹

Las observaciones de aeronaves jugaron un importante papel durante el Primer Experimento Mundial del Programa de Investigación de la Atmósfera Global (GARP) (FGGE) y, en parte como resultado de la experiencia que se obtuvo ahí, han aumentado en importancia en los años posteriores. Las observaciones de aeronaves registradas manualmente, a veces en peligrosos vuelos especiales, datan de la década de 1930 (Hughes, 1970). Lo que cambió durante la década de 1970 fue la introducción de aeronaves de fuselaje ancho con precisos sistemas de navegación inercial que producían observaciones meteorológicas como un resultado rutinario. Se emplearon dos enfoques: la reco-

gida sistemática de AIREPS en tiempo real transmitidos manualmente y la captura posterior al aterrizaje de observaciones automáticas de los registradores de datos en vuelo (Krishnamurti, 1971). Poco después del Experimento Tropical del GARP en el Atlántico (GATE), Robert Steinberg (Steinberg, 1973), de la NASA, ofreció un análisis detallado de las implicaciones de la adquisición de datos automáticos de aeronaves. Su argumento era, en parte, la química atmosférica. El enfoque de la captura de datos automáticos se usó después con éxito durante el GATE (Julian y Steinberg, 1975). El cambio a la transmisión en tiempo real de observaciones automáticas vía satélite fue el siguiente paso lógico y condujo al programa ASDAR² (Fleming *et al.*, 1979

¹ Profesor de Meteorología e Informática Científica en la Universidad del Estado de Nueva York, Purchase, NY 10577.

² Sistema de retransmisión por satélite de datos de aeronaves.