

De las observaciones a la prestación de servicios: retos y oportunidades

por Adrian Simmons*



© WWW.SXC.HU/ROB.KIMBALL

El modo en que se procesan las observaciones resulta fundamental para la prestación de servicios de vigilancia y predicción del tiempo, el clima y la calidad del aire. La asimilación de los datos de las observaciones en los modelos exhaustivos de predicción constituye la forma establecida de explotar las observaciones de cara a la predicción meteorológica con un margen de unas cuantas horas de adelanto. Los progresos alcanzados en la observación mundial desde la década de 1970 han venido acompañados de una considerable evolución en la modelización y en la asimilación de datos, dando lugar a importantes mejoras en la precisión de las predicciones.

La aplicación de la asimilación de datos a los registros históricos de observación en el proceso de reanálisis ayuda a contextualizar las mejoras en la predicción, además de complementar el uso directo de observaciones para la vigilancia del clima. La modelización y la asimilación también sirven para apoyar el desarrollo de servicios para la evaluación y la predicción de la calidad del aire, así como para ofrecer información sobre el forzamiento del cambio climático.

Un logro histórico

En 1971, Taroh Matsuno publicó un documento histórico en el que se establecía la dinámica del fenómeno del calentamiento brusco estratosférico.

Este fenómeno, detectado inicialmente por Scherhag (1952) en las observaciones realizadas por radiosondas sobre Berlín, se representó gráficamente para el episodio de 1957 por parte de Teweles (1958), y fue examinado por primera vez en un modelo exhaustivo de circulación general por Miyakoda y otros (1970). En 1979, en el año principal de observaciones del Programa de Investigación de la Atmósfera Global (GARP), ya existía una mejor cobertura de observación, y desde entonces se han experimentado grandes avances tanto en la modelización como en la asimilación de datos provenientes de la observación, lo cual se puso de manifiesto a través de estudios sobre la predictibilidad de los fenómenos de calentamiento sustancial de ese año (Bengtsson y otros, 1982a; Simmons y Strüfing, 1983).

Las mejoras posteriores tanto en los sistemas de observación como en los de predicción (que se comentan con mayor profundidad para el caso de las predicciones troposféricas más adelante en este artículo) hicieron posible que en septiembre de 2005 pudiera predecirse, con un plazo aproximado de una semana de adelanto, el primer fenómeno importante de calentamiento observado en la estratosfera del hemisferio sur (Simmons y otros, 2005). El episodio fue destacable no solo por su rareza sino también por un importante efecto sobre el agujero de ozono antártico que también pudo predecirse de forma acertada (Eskes y otros, 2005). Más débil de lo habitual como consecuencia de la actividad previa, el vórtice dinámico y el agujero de la capa de ozono que le acompaña se

dividieron en dos: una de las partes permaneció durante poco tiempo y la otra se restableció sobre el polo, aunque con bastante menos fuerza que hasta entonces.

Los análisis del registro satelital multisensorial muestran que los niveles de ozono polar meridional eran mayores en octubre de 2002 que en cualquier otro mes de octubre desde principios de los años 80 (van der A y otros, 2010). La variabilidad del vórtice polar también dio lugar a una presencia relativamente superior de ozono sobre la región antártica en septiembre de 2010 y a una concentración menor del citado gas sobre la región ártica en marzo de 2011. La vigilancia y la predicción de ozono estratosférico y de la radiación UV de la superficie asociada se han convertido en una actividad de servicio, por ejemplo, tal y como se ha realizado en el marco del servicio atmosférico piloto de la iniciativa europea de Vigilancia mundial del medio ambiente y de la seguridad (GMES) (Hollingsworth y otros, 2008).

Así pues, el trabajo de Matsuno de hace cuatro décadas puede considerarse como un hito en la evolución en el tiempo desde las primeras observaciones, pasando por la comprensión teórica y la modelización, hasta llegar a una mejora de la capacidad de vigilancia, predicción y prestación de los servicios asociados. Sin embargo, las observaciones desempeñan un papel mucho más inmediato en el apoyo a la prestación de servicios relacionados con el tiempo, el clima y la calidad del aire. Esto puede llevarse a cabo mediante varias vías, tal y como se indica de forma esquemática en la Figura 1.

* Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo, Shinfield Park, Reading RG2 9AX, Reino Unido. adrian.simmons@ecmwf.int

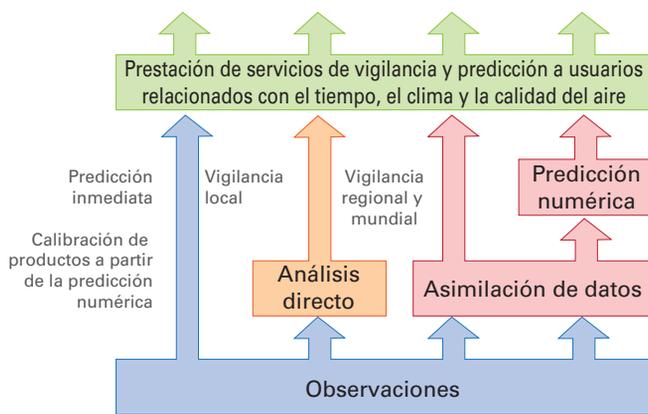


Figura 1 — Vías desde la observación hasta la prestación de servicios

Utilización de las observaciones

Las observaciones se utilizan de forma directa y fundamental en la vigilancia de las condiciones meteorológicas locales, en las predicciones “inmediatas” de las próximas horas, en la creación de registros meteorológicos y climáticos de los datos convencionales para cada estación y, por último, en la presentación de perspectivas sinópticas por lo que respecta a los datos satelitales. También tienen aplicación directa en la validación y calibración de otros tipos de observación y de productos a partir de la predicción numérica. Son necesarias para establecer vínculos con diversos tipos de datos socioeconómicos y del ecosistema con el fin de desarrollar evaluaciones de impactos del tiempo y del clima, así como de la variabilidad y el cambio climático en particular; asimismo, también son imprescindibles para desarrollar respuestas de mitigación y adaptación adecuadas.

Las observaciones también pueden combinarse de forma más directa a través de cierta forma de estructura reticular o mediante análisis para generar campos regionales o mundiales, a menudo basados en un tipo concreto de observación o en unos cuantos tipos relacionados. El uso del mapa meteorológico de análisis manual puede ser cada vez menos frecuente, pues las observaciones se procesan numéricamente de forma rutinaria y de una manera bastante directa con el fin de representar cartográficamente el clima, sus anomalías a corto plazo y sus tendencias a largo. Podemos encontrar un ejemplo en el conjunto de datos HadCRUT3 (Brohan y otros, 2006), que es uno de los conjuntos de datos principales utilizados en la evaluación de la temperatura global.

Combina análisis de medias mensuales de medidas de la temperatura del aire en la superficie obtenidas a partir de estaciones terrestres, con análisis de las temperaturas de la superficie del mar medidas por barcos y boyas.

La asimilación de datos ofrece una secuencia de análisis de condiciones atmosféricas, oceánicas y de la superficie terrestre. Utiliza información procedente de las últimas observaciones con el objetivo de ajustar una predicción mediante un modelo “de referencia” iniciado a partir del análisis precedente en la secuencia. El modelo transporta información de las observaciones anteriores hacia adelante en el tiempo. La información se dispersa en el espacio y de una variable a otra mediante la predicción del modelo y a través de las estructuras de error de fondo empleadas en el proceso de ajuste.

El conjunto de observaciones puede constar de muchos tipos diferentes de mediciones, cada uno de ellos con su propia precisión y distribución espacial. La utilización de la asimilación de datos para generar condiciones atmosféricas iniciales para la predicción numérica del tiempo lleva establecida desde hace mucho tiempo, y su utilización para el análisis de las observaciones oceánicas sirve en la actualidad para efectuar predicciones mensuales, estacionales y de mayor alcance.

La ampliación para incluir sustancias traza adicionales y especies de aerosoles está añadiendo capacidad a la vigilancia y la predicción de la calidad del aire. Además, los reanálisis de las observaciones efectuadas durante las últimas décadas con sistemas modernos y fijos de asimilación ofrecen un registro meteorológico y climático ampliamente utilizado. Este

artículo se centra en el uso de la asimilación de datos en la progresión que va desde las observaciones hasta la prestación de servicios.

Evolución del sistema de observación y de la predicción meteorológica a medio plazo

Tras los primeros estudios sobre la predicción a medio plazo llevados a cabo por Miyakoda y otros (1972) y después del lanzamiento, en ese mismo año, del satélite NOAA-2 con el primero de una serie operativa de radiómetros infrarrojos de perfilado vertical, el primer sistema de predicción meteorológica a escala mundial empezó a estar operativo en septiembre de 1974 en el Centro meteorológico nacional de los Estados Unidos de América, precursor de lo que hoy conocemos como Centros nacionales de predicción del medio ambiente (Shuman, 1989). El Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo (CEPMMP) fue el siguiente, en agosto de 1979. El sistema de asimilación de datos desarrollado por el CEPMMP no solo se utilizó para el comienzo de su predicción operativa, sino también para llevar a cabo análisis de las observaciones correspondientes al primer Experimento mundial del GARP (FGGE) (Bengtsson y otros, 1982b). Un segundo conjunto de análisis de los datos del FGGE fue generado por K. Miyakoda y colaboradores en el Laboratorio de dinámica de fluidos geofísicos (GFDL), en la Universidad de Princeton (Ploshay y otros, 1992). Estos análisis se utilizaron en numerosas investigaciones durante los años siguientes, aunque las limitaciones de un período de toma de muestras de solo un año y el rápido desarrollo de la modelización a escala mundial desembocaron en un uso más generalizado de los análisis efectuados por los sistemas operativos mundiales.

Esto se prolongó hasta la aparición, a mediados de la década de 1990, de productos de una calidad más uniforme que abarcaban períodos más prolongados, obtenidos a partir del reanálisis, con una mención especial de los reanálisis efectuados por los Centros nacionales de predicción del medio ambiente (NCEP, Kalnay y otros 1996) y el CEPMMP, y más tarde por el Servicio Meteorológico Japonés (Onogi y otros, 2007) y otros. En este caso, los resultados de los dos

reanálisis más recientes del CEPMMMP, el ERA-40 (Uppala y otros, 2005) y el ERA-Interim (Dee y otros, 2011), así como los precedentes de las operaciones del CEPMMMP, se utilizan para ilustrar algunos impactos de los cambios experimentados en los sistemas de observación y predicción sobre la predicción a medio plazo y sobre la vigilancia del clima.

El ERA-40 abarcó el período comprendido entre 1958 y 2001. Utilizó un modelo de asimilación con una rejilla casi uniforme de unos 125 km, resolución vertical de 60 niveles y análisis variacional en tres dimensiones (3D-Var). Además, utilizó una versión del sistema de predicción del CEPMMMP que estaba operativa en 2001. ERA-Interim funciona desde 1979 hasta la actualidad, y utiliza una resolución horizontal de unos 80 km, resolución vertical de 60 niveles y, además, una versión de 2006 del sistema del CEPMMMP, incluido un análisis variacional en cuatro dimensiones (4D-Var). Las predicciones a 10 días se han llevado a cabo dos veces al día entre las 00 y las 12 UTC tanto para el reanálisis ERA-40 como para el ERA-Interim. Los resultados de las predicciones de las 12 UTC pueden compararse con los de las operaciones del CEPMMMP que se

Las observaciones desempeñan un papel fundamental en el apoyo a la prestación de servicios relacionados con el tiempo, el clima y la calidad del aire

han archivado desde el 1 de enero de 1980.

Durante este período, la resolución horizontal del sistema operativo ha variado aproximadamente entre los 210 kilómetros y los actuales 16 km, la resolución vertical ha aumentado de 15 a 91 niveles y ha habido numerosos cambios en el modelo de predicción y en la forma en la que se asimilan los datos procedentes de las observaciones.

Miyakoda y otros (1972) introdujeron la correlación de anomalías del campo de alturas a 500 hPa, o sea la correlación entre la predicción y las anomalías del campo analizadas, como medida de la pericia de sus predicciones en el hemisferio norte. Esta medida ha demostrado ser útil con el paso de los años en lo que se refiere al suministro de una medida destacada acerca de cómo ha evolucionado el rendimiento de las predicciones, una medida que

guarda una amplia coherencia con la evaluación subjetiva de la predicción sinóptica. La Figura 2 muestra las series temporales de esta medida que se han obtenido a partir de los ERA-40 y ERA-Interim para plazos de predicción de tres, cinco y siete días, calculadas para regiones que engloban Europa y Australia/Nueva Zelanda. La cobertura de observación de estas regiones es lo suficientemente buena como para tener una confianza razonable en la calidad del análisis de verificación tanto de la era presatelital como de la era satelital.

Al analizar en primera instancia los resultados del ERA-40 que se muestran en los paneles superiores, la pericia de la predicción aumenta de forma bastante uniforme durante el transcurso del período en el caso de Europa, que se beneficia de estar localizada a continuación de la relativamente buena cobertura de observación que existe sobre América del Norte y de los buques

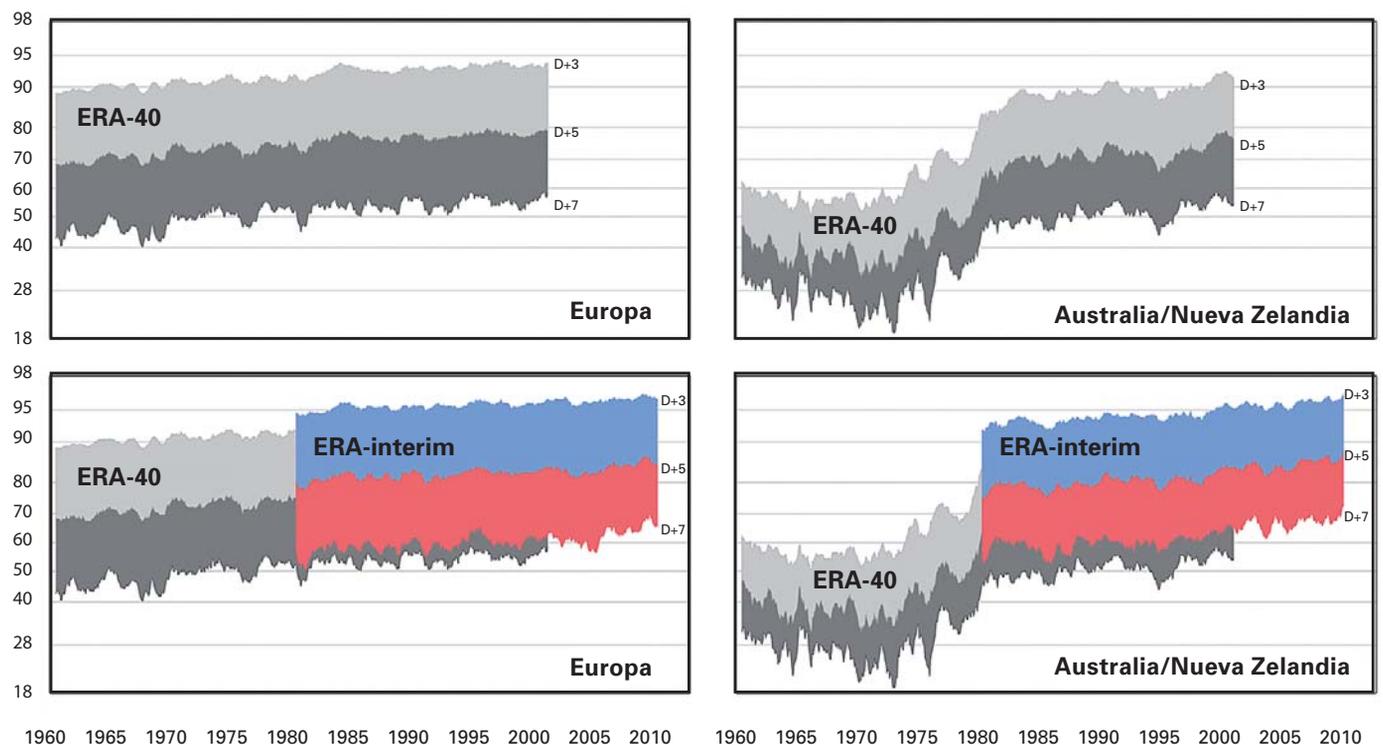


Figura 2 — Correlación de las anomalías de alturas a 500 hPa (%) para plazos de predicción de 3, 5 y 7 días, calculada sobre Europa (35-75°N, 12,5°W-42,5°E; izquierda) y Australia/Nueva Zelanda (45-12,5°S, 120-175°E; superior) de los reanálisis ERA-40 (1958-2001; superior e inferior) y ERA-Interim (1979-2011; inferior). Se muestran las medias móviles de doce meses correspondientes a las medias mensuales de los valores de las predicciones llevadas a cabo diariamente desde las 12 UTC.

meteorológicos del Atlántico antes de la aparición de los sondeos por satélite. Uppala y otros (2005) pusieron de relieve que la mejora con el paso del tiempo era mayor en América del Norte pues al estar situada a continuación de la gran extensión del océano Pacífico se benefició más que Eurasia de la introducción de la cobertura de los datos satelitales.

Mejora en la cobertura de datos y en los sistemas de predicción

La consecuencia de la mejora en la cobertura de datos sobre el océano se ha visto de forma más notable en los resultados del ERA-40 que se muestran para la región de Australasia en la Figura 2. Aquí, la precisión de las predicciones es mucho peor que en cualquier otro lugar antes del establecimiento del sistema de observación correspondiente al FGGE en 1979. De hecho, los resultados de la predicción disminuyen al principio del período, lo que puede ser consecuencia de una degradación en la cobertura de observación una vez transcurrido el Año Geofísico Internacional (1958). Los resultados solo empiezan a repuntar en los años setenta, muy probablemente como consecuencia de la asimilación de los datos de radiancia procedentes de radiómetros de medida del perfil vertical de la temperatura (VTPR), y posteriormente experimentan un incremento notable hacia finales de 1978; la mejora se traduce en una ganancia aproximada de dos días en la capacidad predictiva a medio plazo.

Los paneles inferiores de la Figura 2 muestran los resultados del

ERA-Interim (hasta julio de 2011), poniendo de manifiesto una mejora sobre el ERA-40, aunque en mayor proporción en Australasia que en Europa, una consecuencia esperada debido al paso del análisis 3D-Var al 4D-Var. La mejora continúa en el tiempo más allá de la secuencia temporal del ERA-40 y, nuevamente, es bastante mayor en Australasia. Los niveles de pericia para las dos regiones son similares en los últimos años.

La Figura 3 muestra los resultados correspondientes a las zonas extratropicales completas por lo que se refiere a las operaciones del CEPMMMP y al ERA-Interim. El sombreado indica la diferencia en resultados entre los hemisferios norte y sur. El panel izquierdo de operaciones se ha adaptado y ampliado a partir de un diagrama publicado por primera vez por Simmons y Hollingsworth (2002). Se refleja una mejora sustancial y continua en la pericia de la predicción con el paso del tiempo.

En el caso del hemisferio norte, el nivel de pericia logrado en el plazo de tres días en 1980 se obtiene en la actualidad en el plazo de seis días, y esta mejora aproximada de un día por década también es palpable en otros plazos de predicción. La mejora sigue siendo mayor en el caso del hemisferio sur, donde la ganancia más significativa tuvo lugar entre mediados de los años noventa y principios de la década de 2000, tras lo cual la diferencia en el rendimiento medio entre los dos hemisferios, por regla general, ha sido pequeña. Las mejoras del sistema de predicción durante este período, en concreto la introducción y la mejora posterior de la asimilación variacional de datos de

radiancia, han sido explicadas por Simmons y Hollingsworth (2002).

El diagrama correspondiente al ERA-Interim que aparece en el panel derecho muestra una tendencia mucho menor que la registrada para las operaciones del CEPMMMP, poniendo de relieve que la mejora operativa neta desde 1980 se ha debido principalmente a un perfeccionamiento en el sistema de predicción más que a una mejora en el sistema de observación. Sin embargo, las diferencias entre hemisferios en el caso del ERA-Interim se reducen durante las primeras dos décadas, y ambos hemisferios muestran una mejora durante más o menos la última década que no es muy inferior a la mitad de la observada en el caso de las predicciones operativas.

En este sentido, debería hacerse hincapié en el hecho de que la utilización por parte del ERA-Interim de una versión fija del año 2006 del sistema de predicción del CEPMMMP se traduce en que no pueden asimilarse datos del sondeador de alta resolución en el infrarrojo (IASI) ni del difusímetro (ASCAT) del satélite europeo Metop, lanzado en octubre de ese año. Así pues, los resultados del ERA-Interim no miden el impacto total de los cambios en el sistema de observación. Del mismo modo, al igual que sucede con el caso de las operaciones, estos resultados están sujetos a variaciones en la predictibilidad de los regímenes del flujo atmosférico. Esta es la explicación probable de la gran diferencia en los resultados entre hemisferios que se ha visto tanto en el caso de las operaciones como en el del ERA-Interim durante los dos últimos años.

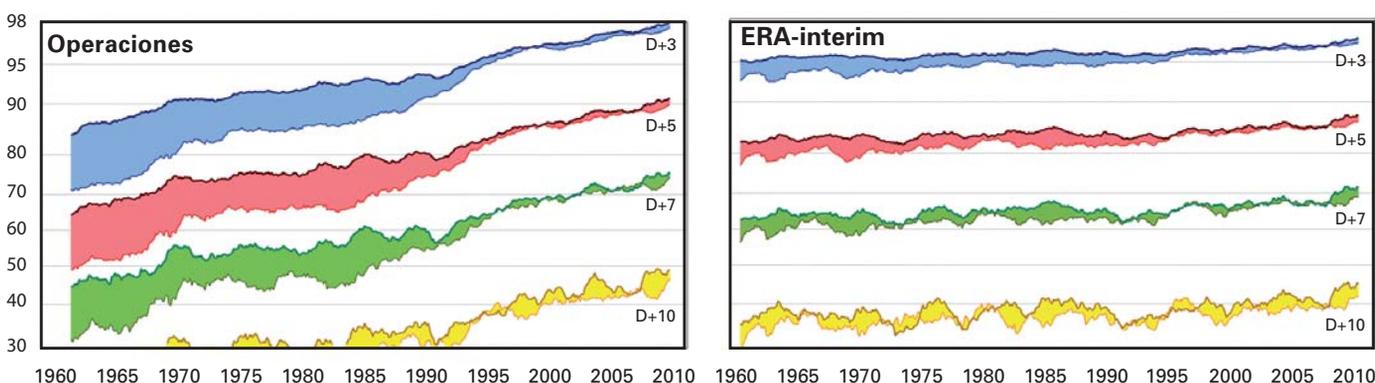


Figura 3 — Correlación de las anomalías de alturas a 500 hPa (%) para plazos de predicción de 3, 5, 7 y 10 días, calculada en los hemisferios norte y sur extratropicales a partir de las operaciones del CEPMMMP (1980-2011; izquierda) y el reanálisis ERA-Interim (1979-2011; derecha). Se muestran las medias móviles de doce meses correspondientes a las medias mensuales de los valores de las predicciones llevadas a cabo diariamente desde las 12 UTC. La parte sombreada muestra la magnitud de las diferencias entre los dos hemisferios.

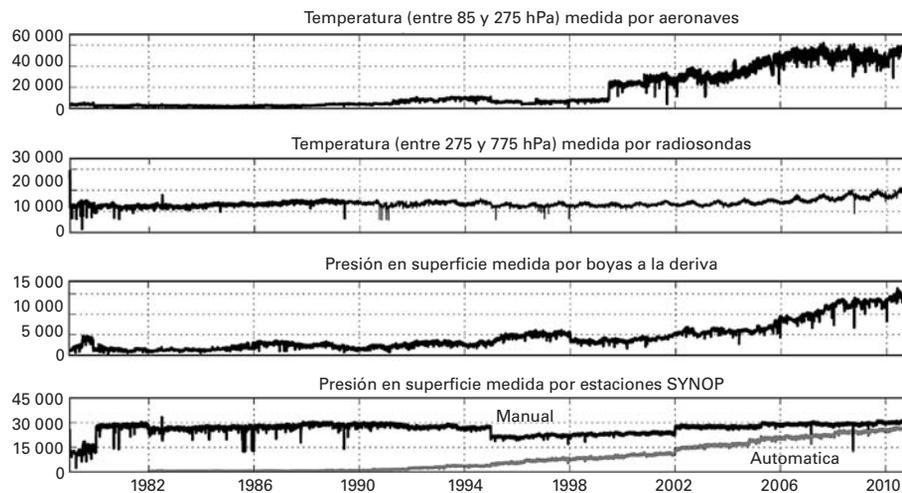


Figura 4 — Número de observaciones disponibles cada día para el reanálisis ERA-Interim desde 1979 en adelante, para cuatro tipos de datos in situ.

Los cambios en el sistema de observación desde finales de los años noventa que han contribuido a la mejora observada en las predicciones del ERA-Interim incluyen lanzamientos de varios instrumentos satelitales nuevos. Entre ellos se encuentra el desarrollo, iniciado en 1998, de cinco instrumentos AMSU-A operativos en diversos satélites, la primera de las sondas avanzadas en el infrarrojo (AIRS), instrumentos MODIS que permiten obtener vientos en latitudes altas mediante el registro de características en imágenes polares sucesivas, y varios receptores orbitales que ofrecen información térmica midiendo la ocultación de las señales GPS.

El período también fue testigo de varios incrementos sustanciosos en algunos tipos de observaciones in situ. La Figura 4, por ejemplo, muestra aumentos bruscos en los números correspondientes a los datos térmicos cerca de la tropopausa procedentes de aeronaves y en los datos relativos a la presión en superficie obtenidos a partir de boyas a la deriva y de estaciones SYNOP terrestres, además de un incremento más gradual en las mediciones de temperatura con radiosondas en la troposfera libre. Los ascensos de radiosondas disminuyeron desde una media de 1 626 por día en 1979 (prácticamente las mismas cifras que en 1958) hasta los 1 189 por día en 2001, aunque los números han aumentado desde entonces y, en la actualidad, suelen superar los 1 300 diarios. Además, ha aumentado la cantidad de datos de nivel importante que son transmitidos, y se han producido mejoras en la calidad de dichos datos.

Otros aspectos de la predicción

Una buena predicción de la situación sinóptica en evolución, como la medida a través de la correlación de las anomalías de alturas en la predicción extratropical, es un requisito previo —aunque no una garantía— para llevar a cabo una

predicción precisa de las condiciones meteorológicas asociadas. Estas últimas pueden estar relacionadas con sistemas dinámicos de escala subsinóptica, con la topografía local, con características de la capa límite, etc., lo que conlleva requisitos adicionales para las observaciones a la hora de apoyar la prestación de servicios de predicción.

Esto no solo incluye las observaciones atmosféricas que se necesitan de manera adicional para pronosticar las escalas menores del movimiento en el corto plazo, sino también las observaciones de las condiciones en la superficie terrestre, como la cubierta de nieve o la humedad del suelo, que pueden influir en los elementos meteorológicos locales cercanos a la superficie en las predicciones a medio y largo plazo. Las observaciones de las condiciones del terreno y del hielo, así como las del océano abierto, se necesitan sobre todo para las escalas a largo plazo sobre las que se asientan los principios subyacentes de la predictibilidad atmosférica.

A pesar del importante progreso alcanzado a la hora de estimar las

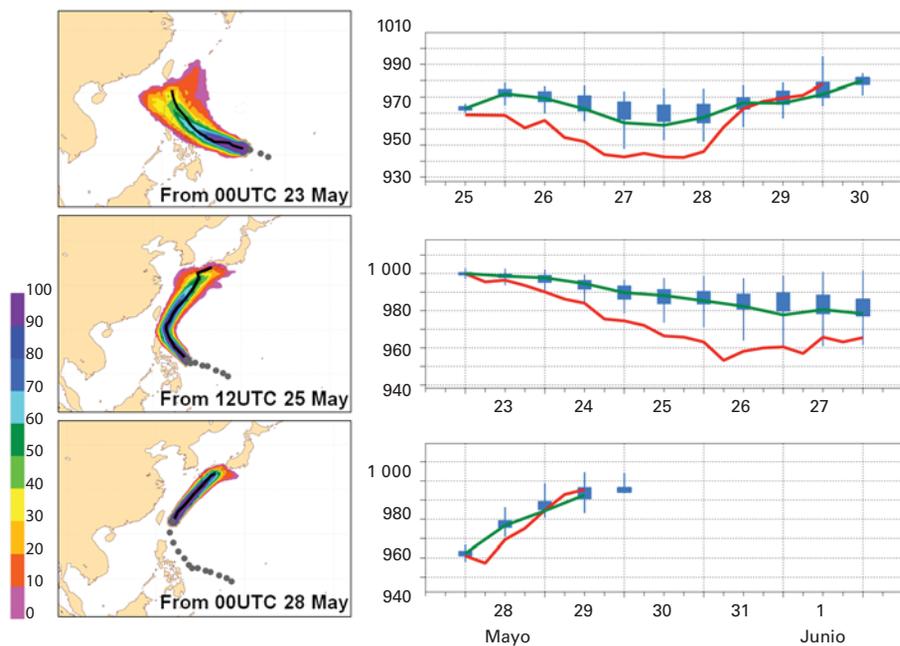


Figura 5 — Predicciones del CEPMP del ciclón tropical Songda efectuadas a partir de las horas de inicio de 00 UTC del 23 de mayo (arriba), 12 UTC del 25 de mayo (centro) y 00 UTC del 28 de mayo de 2011 (abajo). Los diagramas de la parte izquierda muestran las predicciones de la trayectoria, con colores que señalan la probabilidad (%) basada en predicciones por conjuntos de que Songda pasará a menos de 120 km del punto en cuestión, mientras que las líneas negras reflejan predicciones deterministas de alta resolución. Los paneles de la derecha muestran las presiones centrales obtenidas a partir de la predicción de alta resolución (roja), de la predicción de control por conjuntos (verde) y del conjunto en sí (azul), para el cual el cuadro define el rango comprendido entre los percentiles 25 y 75, mientras que la línea vertical delimita el rango completo de valores.

condiciones atmosféricas de cara a la predicción numérica, no puede evitarse que exista un determinado grado de incertidumbre en las condiciones iniciales. La mejora en la predicción numérica determinista durante los últimos 20 años ha venido acompañada del desarrollo de sistemas de predicción probabilística, basados en el uso de conjuntos de predicciones de menor resolución que muestrean la incertidumbre en las condiciones iniciales y en la modelización (Molteni y otros, 1996; Toth y Kalnay, 1997). Aquí se presenta un conjunto reciente de predicciones de ciclones tropicales para ilustrar algunos puntos. El ciclón en cuestión, de nombre *Songda*, azotó la región occidental del Pacífico en mayo de 2011.

La Figura 5 muestra predicciones correspondientes a las 00 UTC del 23 de mayo, a las 12 UTC del 25 de mayo y a las 00 UTC del 28 de mayo. Los paneles de la izquierda muestran predicciones de trayectorias; los círculos señalan las posiciones registradas en intervalos de 12 horas hasta el momento del inicio de cada predicción. El ciclón se encontraba en una fase bastante primigenia el 23 de mayo, y el conjunto indica una expansión en las posibles trayectorias previstas. La predicción determinista de esta fecha corresponde a una trayectoria situada un poco a la izquierda con respecto a la observada el 27 de mayo, como sucede en el caso de la ruta más probable deducida a partir del conjunto.

Sin embargo, un grupo de varios miembros del conjunto indica la posibilidad de una curvatura de la trayectoria más cercana a la observada. En las predicciones posteriores se observa una expansión mucho menor, y todas estas predicciones

recogen un movimiento rápido tras la curvatura, con un desplazamiento y una transición hacia un sistema extratropical situado sobre el sur de Japón.

Los paneles de la derecha de la Figura 5 muestran las predicciones correspondientes de las presiones centrales en superficie. Aquí se constata un efecto evidente de la diferencia en la resolución horizontal, que es de unos 32 km para los miembros del conjunto frente a los 16 km en el caso de la predicción determinista. Esta predicción determinista genera presiones centrales menores que las de cualquier miembro del conjunto cuando el ciclón se encuentra en el momento de máxima virulencia, aunque la presión mínima registrada seguía situándose aproximadamente en 20 hPa adicionales por debajo.

Durante los últimos años hemos sido testigos de una importante mejora en la capacidad de predicción de los ciclones tropicales mediante el uso de sistemas a escala mundial. El error de posición media anual de las predicciones deterministas operativas de tres días del CEPMMIP se ha reducido desde unos 350 km hasta alrededor de 200 km desde 2005, y el error medio absoluto de la presión central ha pasado de unos 25 hPa a situarse por debajo de los 15 hPa durante el mismo período. Aunque estas últimas mejoras se han atribuido principalmente a la disponibilidad de una resolución horizontal más fina y de una mejor parametrización de la convección (Fiorino, 2009), la predicción también se ha beneficiado del uso del sistema 4D-Var y de observaciones adicionales, como las obtenidas con difusímetros (Isaksen y Janssen, 2004). El rendimiento de los modelos globales también se beneficia de las mejoras logradas en su predicción a

gran escala del entorno en el que se enmarca el ciclón tropical.

No obstante, siguen planteándose desafíos en lo que respecta al uso de las observaciones en el entorno de sistemas intensos a pequeña escala. Los errores en la posición, la intensidad y la escala horizontal en las predicciones de referencia pueden provocar el rechazo de datos buenos por parte de los procesos de control de calidad, que comprueban diferencias excepcionalmente grandes entre predicciones de referencia y observaciones. Por otro lado, un control de calidad poco estricto de una sola boya que suministre datos inexactos puede dar lugar a una importante degradación del análisis de un ciclón tropical.

Las buenas observaciones efectuadas justo en el exterior de un vórtice potente pueden tener la consecuencia no deseada de debilitar un vórtice que obedezca a un modelo de referencia que sea demasiado grande en términos de escala y, además, demasiado débil como consecuencia de una resolución limitada. Aquí, el progreso está llevándose a cabo gracias al uso de métodos de asimilación de datos procedentes de conjuntos, que ofrecen una estimación dinámica de los errores de fondo para su utilización tanto en el propio sistema de asimilación como en el establecimiento de mejores condiciones iniciales perturbadas para la predicción por conjuntos.

Vigilancia de la variabilidad del clima y del cambio climático

La utilización eficaz de múltiples fuentes de datos para inicializar la predicción numérica requiere que se

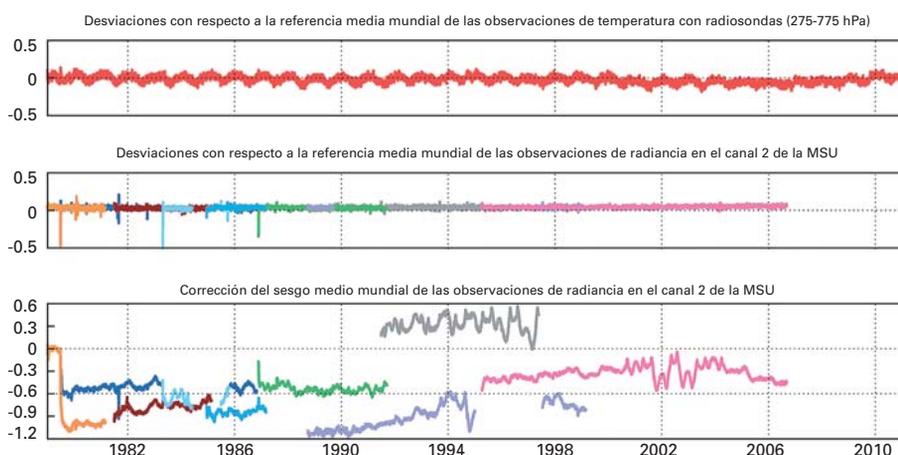


Figura 6 — Desviaciones con respecto a la referencia media mundial entre ERA-Interim y las temperaturas de radiosondas (K; panel superior) para presiones comprendidas entre los 275 y los 775 hPa, y entre ERA-Interim y las temperaturas de brillo del canal 2 de la MSU (K; panel medio). En el panel inferior se muestran las correcciones de los sesgos medios mundiales (K) de los datos de la MSU. El color se utiliza en los paneles medio e inferior para destacar resultados de cada uno de los satélites que han trasladado el instrumental de la MSU, desde el TIROS-N al NOAA-14.

corrijan algunos sesgos en las observaciones antes de la asimilación de datos o durante la misma. Estos sesgos pueden ser mucho mayores que las desviaciones típicas de las diferencias entre los valores observados y los valores de referencia, y pueden variar entre instrumentos del mismo tipo, como por ejemplo de un satélite a otro. El esfuerzo dedicado a la corrección de los sesgos en las observaciones en los sistemas de predicción meteorológica también ha redundado en beneficio de la coherencia, con el paso del tiempo, de los campos de reanálisis, puesto que ha incrementado su valor de cara al estudio de la variabilidad del clima y del cambio climático a escala decenal.

La Figura 6 pone de manifiesto la estabilidad y la coherencia temporal del reanálisis ERA-Interim en el caso de la temperatura media global de la troposfera media. Las temperaturas de referencia de la asimilación de datos guardan una gran coherencia tanto con las observaciones de radiosondas (panel superior) como con las medidas de radiancia corregidas de sesgo procedentes de los instrumentos de la sonda de microondas (MSU) a bordo de los sucesivos satélites de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA; panel central).

La corrección de sesgo de las radiosondas incluye los ajustes de la homogeneidad a largo plazo determinados por Haimberger y otros (2008) y ajustes independientes de las variaciones anuales en el sesgo como consecuencia del calentamiento solar. Estos ajustes son más importantes en los niveles correspondientes a la troposfera superior y a la estratosfera.

Las correcciones del sesgo asociado a los datos de la MSU (panel inferior) se han generado con el análisis variacional del ERA-Interim (Dee y Uppala, 2009), y dan cuenta de diferencias en la calibración, desfases orbitales y algunos otros errores instrumentales, así como de los errores sistemáticos en el modelo de transferencia radiativa empleado por el sistema de asimilación. Las correcciones son mucho mayores que las discrepancias medias entre las predicciones de referencia y las observaciones.

La coherencia con los datos ajustados de radiosonda y de la MSU aporta

cierta confianza en la variabilidad de baja frecuencia y en las tendencias en la temperatura de las capas superiores de la atmósfera obtenidas a partir del ERA-Interim. Sin embargo, es importante comparar las correcciones de la MSU con estimaciones independientes de los sesgos de estos datos, así como evaluar el ajuste del reanálisis para otros tipos de datos. En la Figura 6, Dee y Uppala (2009) recogen pruebas independientes acerca de la rápida variación en el sesgo del NOAA-14 observada alrededor de 2002.

También muestran evidencias de un efecto adverso sobre las estimaciones de tendencias a largo plazo de la temperatura de la troposfera superior debido a la asimilación de cantidades cada vez mayores de datos procedentes de aeronaves sobre las que no se ha aplicado ninguna corrección del sesgo. La asimilación de los datos de ocultación de radio GPS, disponibles desde hace pocas fechas, mejora el ajuste del reanálisis con respecto a las temperaturas registradas por radiosonda en la tropopausa y en la estratosfera inferior (Poli y otros, 2010), aunque de ese modo se introduce una pequeña tendencia artificial en el reanálisis.

También hay preocupaciones con respecto a la temperatura de la estratosfera superior, donde se carece de datos rutinarios para fijar las correcciones de sesgo de los principales canales de sondeo satelital.

Se han logrado grandes avances a este respecto, pero sigue habiendo retos pendientes.

Anomalías de la temperatura y de la precipitación

Gran parte de la demanda práctica de información y servicios climáticos, como es natural, está relacionada con las condiciones en la superficie terrestre o cerca de ella. La Figura 7 muestra mapas de anomalías en la temperatura y en la precipitación en 2010, obtenidos a partir del ERA-Interim y de análisis directos del registro de observaciones basado en datos mensuales de estaciones (CRUTEM3, Brohan y otros, 2006; 2.5° Centro mundial de climatología de las precipitaciones —GPCC— versión 5 y producto de control, <http://gpcc.dwd.de>).

El campo de temperatura del ERA-Interim se basa en un análisis independiente del registro sinóptico que utiliza campos de referencia obtenidos a partir del análisis 4D-Var de las capas superiores de la atmósfera (Simmons y otros, 2004, 2010). Por el contrario, los datos de precipitación no se asimilan sobre el terreno; los valores que aquí se muestran se han obtenido a partir de predicciones a entre 12 y 24 horas vista, llevadas a cabo cada 12 horas.

Los valores del CRUTEM3 y del GPCC solo se muestran en cuadrículas para las que existen datos de la estación que contribuyen al análisis, y solo se permite un número limitado de meses en blanco de cara a la definición de la referencia 1979-2010 para el cálculo de anomalías.

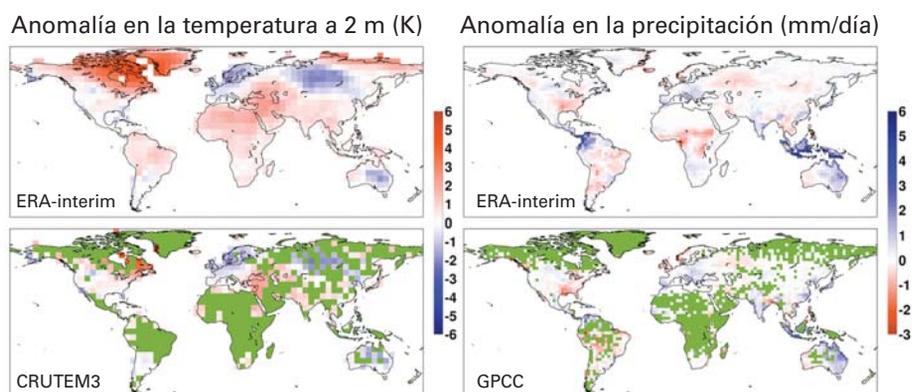


Figura 7 — Anomalías de 2010 en el período 1979-2010 para la temperatura del aire en la superficie (K; izquierda) a partir del ERA-Interim (arriba) y del CRUTEM3 (abajo), y para la precipitación (mm/día; derecha) a partir del ERA-Interim (arriba) y del GPCC (abajo). Los valores se disponen sobre el terreno en cuadrículas, con un registro completo de datos mensuales de 2010 y no más de 12 meses en blanco entre 1979 y 2009. En el caso del GPCC, también es necesario que haya, al menos, una estación por cuadrícula.

De la Figura 7 se deduce que el ERA-Interim capta los patrones de anomalía en la temperatura y en la precipitación puestos de relieve por los análisis CRUTEM3 y GPCC, tal y como han sido recogidos directamente de los registros de estaciones de observación independientes y resumidos en la Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2010.

En las medias anuales resultan especialmente evidentes las condiciones cálidas sobre gran parte de Canadá, el norte de África y determinadas zonas de Asia, así como las temperaturas por debajo de la media en la región noroccidental de Europa, en el norte de Asia central y en el este de Australia. La precipitación se sitúa notablemente por encima de la media en esta región de Australia, en Indonesia y en el noroeste de América del Sur, mientras que la sequía sobre Brasil viene indicada por temperaturas superiores a la media y precipitaciones por debajo de la misma.

Los extremos, como la ola de calor y la sequía en el oeste de Rusia y las devastadoras lluvias estivales en Pakistán, aparecen con menor claridad en estas medias anuales. El reanálisis ofrece un registro exhaustivo de los campos atmosféricos y en superficie de cara al estudio de los procesos implicados en estos episodios.

La Figura 7 muestra que el ERA-Interim proporciona patrones coherentes desde el punto de vista espacial en los casos en los que los datos de la estación no están disponibles o no pueden utilizarse en los análisis CRUTEM3 o GPCC. Debería hacerse hincapié en el hecho de que el ERA-Interim asimila datos de observación correspondientes a estas regiones. Utiliza muchas observaciones sinópticas de la temperatura del aire en superficie, procedentes de estaciones para las que no existe disponibilidad de largas series temporales de datos climáticos mensuales que puedan utilizarse en el análisis CRUTEM3, y son muchos los tipos diferentes de observaciones en superficie y en las capas superiores de la atmósfera que influyen sobre sus estimaciones de precipitación. Sin embargo, estas regiones tienden a ser zonas donde la cobertura de datos es más escasa que en ningún otro sitio, y en las que la modelización de los procesos atmosféricos es más exigente.

Hay que tener especial cuidado al utilizar los resultados del reanálisis correspondientes a estas regiones y, aparte de cualquier iniciativa emprendida para mejorar la cobertura de observación, es importante disponer de todos los datos posibles que se hayan tomado con respecto a estas regiones, en los formatos necesarios de acuerdo con los diferentes tipos de análisis. Esto incluye tanto la recuperación de datos históricos como la transmisión más rápida y generalizada de los datos recientes, especialmente a través de la actualización puntual de los Registros meteorológicos mundiales en el caso de la aportación de datos a análisis como el CRUTEM3 y de la oportuna transmisión de los datos de precipitación mensual al Centro mundial de climatología de las precipitaciones.

En la Figura 8 se presentan las variaciones en las anomalías medias anuales entre 1979 y 2010 correspondientes a zonas del centro de Europa, el sureste de Australia y África oriental. Los promedios de cada área se construyen utilizando todos los valores disponibles de los análisis CRUTEM3 y todos los valores del GPCC para cuadrículas que incluyan, al menos, una estación de observación. En este caso, los datos del GPCC se utilizan para una resolución de 1°. La tempera-

tura y la precipitación media mensual del análisis ERA-Interim se representan gráficamente en las rejillas del CRUTEM3 y del GPCC respectivamente, y se utilizan únicamente cuando los análisis CRUTEM3 y GPCC ofrecen datos, tal y como se establece en Simmons y otros (2010).

La región de Europa central está muy bien observada, y las temperaturas de los análisis CRUTEM3 y ERA-Interim guardan una sintonía muy estrecha en este caso. Las variaciones térmicas son mayores que las registradas en otras regiones estudiadas y muestran abundancia de años relativamente cálidos más adelante. Por regla general, las anomalías en la precipitación suelen ser menores que las existentes en las demás regiones, con coincidencia de los análisis ERA-Interim y GPCC, normalmente, en el margen de alrededor de 0,1 mm/día. Aquí se incluye la pronunciada anomalía seca de 2003 y la húmeda de 2010.

La región sureste de Australia también cuenta con una red de observación relativamente buena, y las variaciones térmicas interanuales se registran correctamente. Sin embargo, existe un cambio claro en los valores de las temperaturas alrededor de 1990. Las anomalías del ERA-Interim son cálidas en comparación con el CRUTEM3

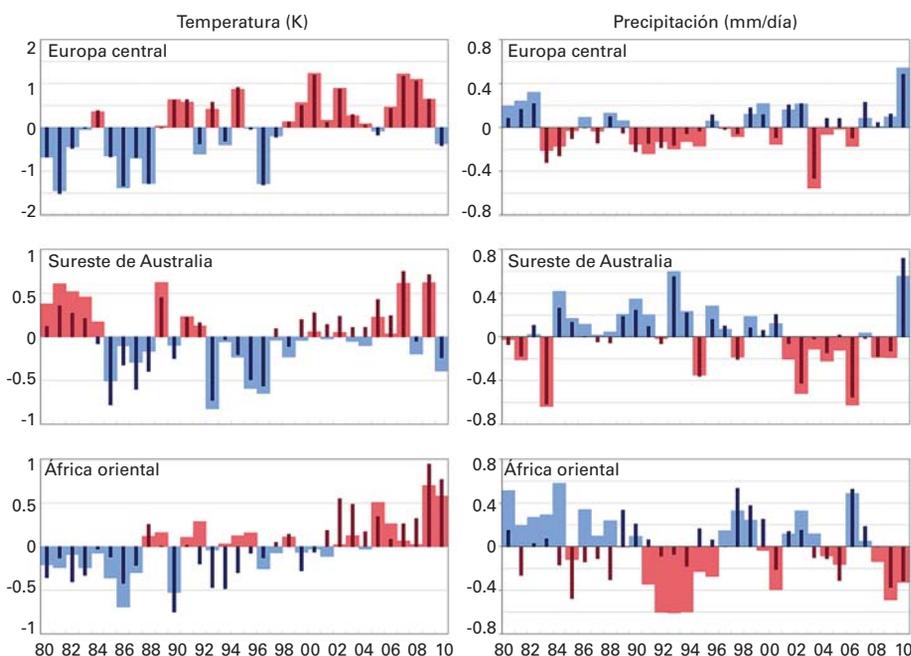


Figura 8 — Anomalías anuales en la temperatura del aire en superficie (K; izquierda) y en la precipitación (mm/día; derecha) correspondientes al ERA-Interim (barras anchas) y al CRUTEM3 y el GPCC respectivamente (barras estrechas) sobre Europa central (10-25°E, 45-55°N; arriba), el sureste de Australia (135-150°E, 30-40°S; centro) y África oriental (30-40°E, 15°N-10°S; abajo).

para los primeros años, y frías para los años siguientes. De hecho, el nivel de coincidencia es mucho mayor en el caso de la precipitación; el reanálisis ERA-Interim recoge de forma bastante acertada los años secos de los primeros años ochenta y de la década de 2000, así como los años lluviosos de 1992 y 2010, aunque con una subestimación de la anomalía de 2010 en comparación con los datos GPCC. Esto sugiere que el cambio en el análisis de la temperatura procede de un cambio en los datos de temperatura en las proximidades de la superficie empleados por el reanálisis ERA-Interim (o quizás el análisis CRUTEM3) más que de una degradación más general de los campos de referencia del reanálisis en cuestión.

La región oriental de África, menos observada, representa mucho más que un desafío. Existe una gran coincidencia entre CRUTEM3 y ERA-Interim en lo que respecta a la tendencia general de calentamiento, puesto que ambos conjuntos de datos identifican 2009 y 2010 como los años más cálidos del período. Sin embargo, las discrepancias son del orden de 0,5 K en los períodos de 1991-1994 y de 2002-2003.

Durante la primera parte del período se observan marcadas discrepancias

plurianuales en las anomalías en la precipitación de África oriental, con el ERA-Interim relativamente húmedo en comparación con el GPCC para los primeros nueve años y seco para los siguientes ocho por un margen bastante importante. Sin embargo, el ERA-Interim establece el año de sequía de 1984 como el más seco en su primera década. En la segunda mitad del período hay una mayor coincidencia, ya que tanto el ERA-Interim como el GPCC muestran un nivel de precipitación extraordinariamente elevado en los años de inundaciones de 1997/1998 y 2006, así como una situación muy seca como factor adicional al calor de los dos últimos años. Si se repite la comparación utilizando la cobertura de los datos completos en el caso del ERA-Interim en lugar de la misma cobertura que el GPCC se obtiene como resultado prácticamente la misma imagen.

Servicios para la composición atmosférica

Las posibilidades en continua evolución de llevar a cabo la observación, la modelización y la asimilación de datos de la atmósfera han dado lugar a la aparición, en los últimos años, de nuevos servicios relacionados con sustancias traza importantes para la

calidad del aire y el clima, con aplicaciones destinadas al usuario final en áreas tales como la sanidad y el suministro de energía solar. Entre estas sustancias se incluyen los gases de efecto invernadero de larga duración, los gases de reacción rápida que afectan a la calidad del aire y los aerosoles que influyen en la contaminación atmosférica y en el forzamiento climático. Los diversos tipos de sustancias interactúan entre sí e influyen en las condiciones meteorológicas a través de procesos radiativos e interacciones entre aerosoles, nubes y precipitaciones. La vigilancia y la predicción del ozono estratosférico y de la radiación UV en superficie son temas que ya han sido comentados.

La predicción o la vigilancia de sustancias pueden llevarse a cabo con cierto grado de éxito si se utilizan modelos de transporte químico con emisiones establecidas o parametrizadas en superficie, y datos meteorológicos proporcionados por la predicción numérica del tiempo o el reanálisis. Sin embargo, cada vez se presta mayor atención al uso de la asimilación de datos y a enfoques de modelización más integrados. Esto ha venido provocado en parte por la disponibilidad de datos como los procedentes de los satélites europeos ERS-2, ENVISAT y Metop, de la serie norteamericana

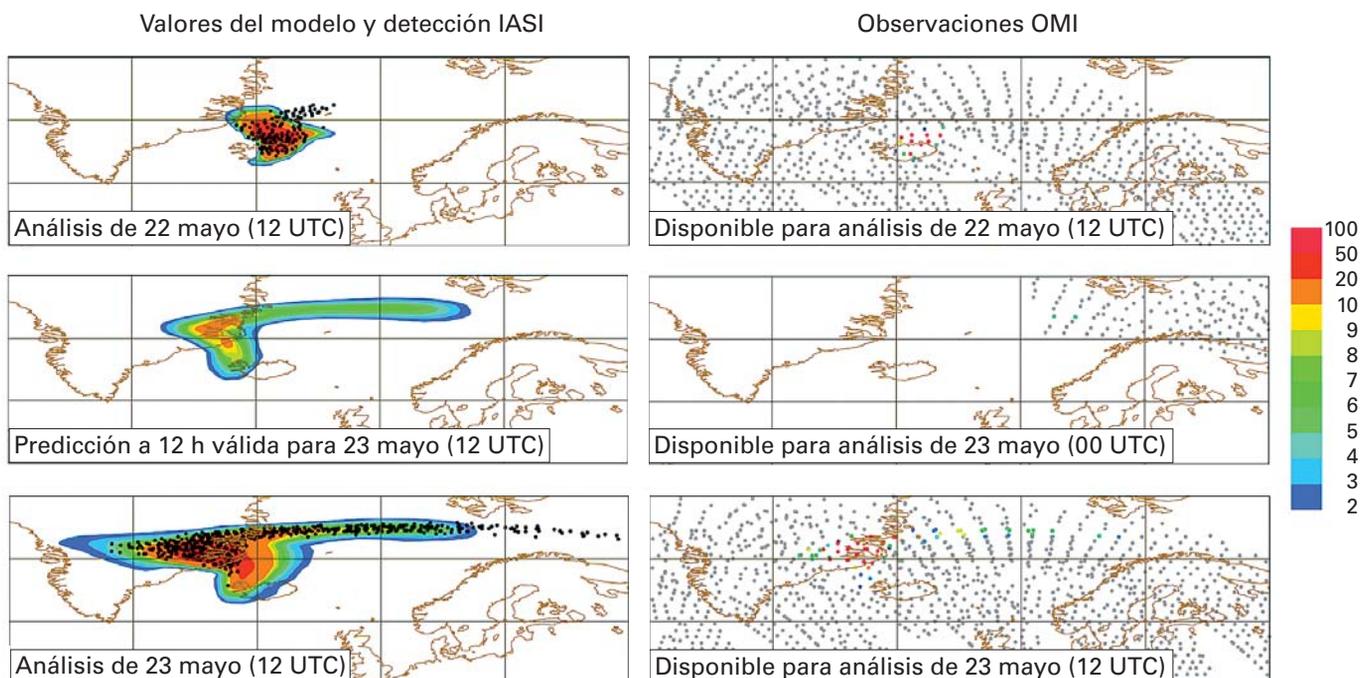


Figura 9 — Columna de SO_2 (unidades Dobson) de la erupción del Grimsvötn en mayo de 2011. El color sombreado en los paneles de la izquierda muestra el análisis de las 12 UTC para los días 22 de mayo (arriba) y 23 de mayo (abajo), así como la predicción de referencia a 12 horas vista para el análisis de las 12 UTC del 23 de mayo (centro). En los paneles de la derecha se muestran los datos OMI disponibles para su asimilación; los puntos grises señalan los valores inferiores a 2 unidades Dobson, mientras que los puntos de los paneles de la izquierda indican una detección independiente de SO_2 a partir de datos IASI.

El desarrollo continuo y la comparación de enfoques alternativos para generar conjuntos de datos de cara a la vigilancia del clima es especialmente importante

de satélites EOS y de la misión japonesa GOSAT. El CEPMMMP y sus socios en los proyectos de servicios atmosféricos de la Vigilancia mundial del medio ambiente y de la seguridad (GMES) (www.gmes-atmosphere.eu) están desarrollando una modelización integrada a nivel mundial para las variables meteorológicas, químicas y de partículas, además de utilizar esta modelización en la asimilación de datos 4D-Var para el análisis conjunto de especies traza y de la meteorología.

Los servicios operativos prototipo a escala mundial ofrecen pronóstico y reanálisis, además de apoyar la predicción regional de la calidad del aire. Los sistemas regionales también han comenzado a utilizar el reanálisis para la evaluación de la calidad del aire sobre Europa, con interpretación a través de la modelización fuente-receptor. Esta integración de la prestación de un servicio atmosférico piloto tiene cabida en el marco de la amplia integración del sistema GMES, que incluye los servicios correspondientes sobre el océano y la tierra, el suministro de la necesaria observación desde el espacio a través de la próxima serie Sentinel de satélites y la coordinación de la observación in situ.

Profundizar más en estas y en otras iniciativas va más allá del ámbito de este artículo, aunque sí hay un nuevo reto que es digno de mención y que hace referencia a la estimación de emisiones o de flujos superficiales netos. De hecho, la principal motivación para desarrollar la asimilación de datos acerca de los gases de efecto invernadero de larga duración es mejorar el conocimiento de las variaciones en el espacio y en el tiempo de los flujos superficiales, puesto que el control básico de las concentraciones de los gases ya se ofrece a través del análisis de muestras recopiladas a partir de la red de matraces en superficie.

En el caso del dióxido de carbono, el sistema CarbonTracker de la NOAA (Peters y otros, 2007, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker/>) ofrece la prestación de servicios relativa a los flujos en superficie y a las

distribuciones atmosféricas a partir del uso de matraces en superficie y observaciones desde torres, modelización del transporte y asimilación de datos. La estimación del flujo de metano para el servicio atmosférico piloto del sistema GMES también utiliza la modelización del transporte y la asimilación de datos para determinar la inversión del flujo (Bergamaschi y otros, 2009), pero emplea el análisis de metano del exhaustivo sistema mundial integrado como datos iniciales, además de las mediciones en superficie.

El sistema integrado actual asimila solo datos SCIAMACHY sobre el metano y aunque, en este caso, el enfoque en dos fases no aporta ningún beneficio obvio sobre el uso directo de los datos SCIAMACHY en la inversión, se espera que sea útil cuando se empleen los datos del metano procedentes de múltiples satélites. En el caso del dióxido de carbono se ha desarrollado un planeamiento similar para el cual se están obteniendo datos muy alentadores mediante el uso de datos GOSAT, tal y como comentó Chevalier en un acto paralelo al Decimosexto Congreso (www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/GHG_all.pdf).

En general, el sistema GMES utiliza emisiones especificadas o parametrizadas para su rango de especies. Las emisiones altamente variables procedentes de incendios forestales tienen como base la asimilación de observaciones satelitales de la energía radiativa del fuego. Este componente del sistema, así como su análisis y la predicción de aerosoles procedentes de los incendios que azotaron el oeste de Rusia en julio y agosto de 2010, son comentados por Kaiser y otros (2011). Actualmente, el sistema no responde por defecto en lo que respecta a las emisiones derivadas de las erupciones volcánicas de otra forma que no sea asumir cualquier incremento resultante en el dióxido de azufre o en los aerosoles captados en las observaciones asimiladas.

Esto se ilustra en la Figura 9 en relación con la reciente erupción

del volcán islandés Grimsvötn. La emisión inicial de dióxido de azufre fue bien captada por las observaciones del satélite OMI asimiladas en el sistema GMES, tal y como se muestra a las 12 UTC del 22 de mayo, y confirmada mediante un algoritmo de detección, empleando datos IASI (Clarisse y otros, 2008). De cara al siguiente período de asimilación de 12 horas solo hubo disponibilidad de una cantidad muy limitada de datos correspondientes a la punta oriental de la columna, y ante la ausencia de una fuente de emisión en el modelo de asimilación, la siguiente predicción de referencia a 12 horas vista subestimó notablemente la intensidad y la extensión hacia el oeste de la columna, algo que pudo mejorarse considerablemente mediante la asimilación de los datos OMI con buena cobertura para el análisis de las 12 UTC correspondiente al 23 de mayo.

La intervención manual para especificar niveles de emisión poco habituales resulta fundamental para el uso de los modelos de transporte gestionados por los centros consultivos sobre cenizas volcánicas de cara a la prestación de servicios a la aviación, o bien por parte de los Centros meteorológicos regionales especializados de la OMM para dar respuesta en casos de emergencia ambiental ante la aparición de otros tipos de eventos. No obstante, existe un gran interés por desarrollar el enfoque 4D-Var de forma que sea capaz de determinar no solo las distribuciones atmosféricas iniciales, sino también los ajustes en las emisiones durante el período de asimilación de las especies que varían más rápido (Elbern y otros, 2007).

Este enfoque ofrece perspectivas que pueden explicar las fluctuaciones a corto plazo o las tendencias en emisiones de especies que, actualmente, se prescriben a partir de los inventarios así como de cara a reducir los efectos de las deficiencias en la parametrización de las emisiones naturales, además de calcular las emisiones procedentes de fenómenos extremos aislados.

Estos plantean otros retos, como el de especificar los errores de fondo en caso de condiciones atípicas. Los enfoques de conjuntos también serían adecuados de cara a reconocer la inevitable incertidumbre que afecta a las emisiones, aunque los costes del cálculo adicional sobre la modelización química y de aerosoles suponen un factor de limitación a la hora de ampliar este enfoque desde la predicción meteorológica.

Conclusiones

Las observaciones son fundamentales para la prestación de servicios meteorológicos, climáticos y sobre la calidad del aire, pero la forma en que se utilicen en el proceso que va desde que se efectúa la medición original hasta que se presta el servicio a los usuarios también se antoja básica. Este artículo se ha centrado en un aspecto concreto como es el de la asimilación de datos. Durante las últimas tres décadas se han logrado importantes avances en lo que respecta a la extracción de una creciente cantidad de información procedente de las observaciones efectuadas durante el período, pero aún queda mucho que abordar para mejorar la vigilancia y la predicción. Sobre todo, el continuo desarrollo de los sistemas de asimilación y predicción resulta fundamental para extraer todo el beneficio de las inversiones efectuadas en materia de observación.

En este artículo no se han comentado algunos requisitos importantes para seguir mejorando la observación in situ y por satélite de la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, aunque estos no deben minimizarse. Sin embargo, independientemente del progreso experimentado en este sentido, es necesario afrontar los continuos retos que se plantean para así mejorar el uso de las observaciones que ya se hayan realizado o que estén llevándose a cabo.

Las oportunidades para recuperar datos pasados y garantizar un acceso rápido y a gran escala a todos los datos tienen que aprovecharse hasta el mayor extremo posible, con el fin de ofrecer las diferentes vías con arreglo a las cuales se utilizarán las observaciones para diversos propósitos. Este proceso incluye el hallazgo y la digitalización de antiguas observaciones de estaciones de la superficie terrestre y el reprocesamiento de los datos satelitales anteriores.

El desarrollo continuo y la comparación de enfoques alternativos para generar conjuntos de datos de cara a la vigilancia del clima es especialmente importante a la hora de ofrecer confianza, de cuantificar la incertidumbre y de identificar asuntos que tienen que resolverse, especialmente en los casos en los que la cobertura de datos es deficiente.

Agradecimientos

Quiero dar las gracias tanto a mis antiguos colegas como a los actuales por su colaboración desde la década de 1970. Un agradecimiento especial a los miembros actuales de los proyectos ERA y GMES, especialmente a Paul Poli y Antje Inness por suministrar el material para tres de las figuras. El séptimo Programa marco de la Unión Europea ha proporcionado la financiación.

Referencias

VAN DER A, R. J., M. A. F. ALLAART y H. F. J. ESKES, 2010: "Multisensor reanalysis of total ozone". *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, pp. 11277-11294.

BENGTSSON, L., M. KANAMITSU, P. KÄLLBERG y S. UPPALA, 1982a: "FGGE Research Activities at ECMWF". *Bulletin of the American Meteorological Society* 63, pp. 277-303.

BENGTSSON, L., M. KANAMITSU, P. KÄLLBERG y S. UPPALA, 1982b: "FGGE 4 Dimensional Data Assimilation at ECMWF". *Bulletin of the American Meteorological Society* 63, pp. 29-43.

BERGAMASCHI, P., C. FRANKENBERG, J. F. MEIRINK, M. KROL, M. G. VILLANI, S. HOUWELING, F. DENTENER, E. J. DLUGOKENCKY, J. B. MILLER, L. V. GATTI, A. ENGEL e I. LEVIN, 2009: "Inverse Modeling of Global and Regional CH₄ Emissions using SCIAMACHY Satellite Retrievals". *Journal of Geophysical Research* 114, doi: 10.1029/2009JD012287.

BROHAN, P., J. J. KENNEDY, I. HARRIS, S. F. B. TETT y P. D. JONES, 2006: "Uncertainty Estimates in Regional and Global Observed Temperature Changes: a new dataset from 1850". *Journal of Geophysical Research* 111, D12106, doi: 10.1029/2005JD006548.

CLARISSE, L., P. F. COHEUR, A. J. PRATA, D. HURTMANS, A. RAZAVI, T. PHULPIN, J. HADJI-LAZARO y C. CLERBAUX, 2008: "Tracking and quantifying volcanic SO₂ with IASI, the September 2007 eruption at Jebel

at Tair". *Atmospheric Chemistry and Physics* 8, pp. 7723-7734.

DEE, D. P. y S. UPPALA, 2009: "Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 135, pp. 1830-1841.

DEE, D. P., S. M. UPPALA, A. J. SIMMONS, P. BERRISFORD, P. POLI, S. KOBAYASHI, U. ANDRAE, M. A. BALMASEDA, G. BALSAMO, P. BAUER, P. BECHTOLD, A. C. M. BELJAARS, L. VAN DE BERG, J. BIDLOT, N. BORMANN, C. DELSOL, R. DRAGANI, M. FUENTES, A. J. GEER, L. HAIMBERGER, S. B. HEALY, H. HERSBACH, E. V. HÓLM, L. ISAKSEN, P. KÄLLBERG, M. KÖHLER, M. MATRICARDI, A. P. McNALLY, B. M. MONGE-SANZ, J.-J. MORCLETTE, B.-K. PARK, C. PEUBEY, P. DE ROSNAY, C. TAVOLATO, J.-N. THÉPAUT y F. VITART, 2011: "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, pp. 553-597.

ELBERN, H., A. STRUNK, H. SCHMIDT y O. TALAGRAND, 2007: "Emission rate and chemical state estimation by 4-dimensional variational inversion". *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, pp. 3749-3769.

EKES, H., A. SEGERS y P. VAN VELTHOVEN, 2005: "Ozone Forecasts of the Stratospheric Polar Vortex-Splitting Event in September 2002". *Journal of the Atmospheric Sciences* 62, pp. 812-821.

FIORINO, M., 2009: "Record-setting performance of the ECMWF IFS in medium-range tropical cyclone track prediction". *ECMWF Newsletter* 118, pp. 20-27.

HAIMBERGER, L., C. TAVOLATO y S. SPERKA, 2008: "Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records: Some new results from a comprehensive inter-comparison of upper-air data". *Journal of Climate* 21, pp. 4587-4606.

HOLLINGSWORTH, A., R. J. ENGELEN, C. TEXTOR, A. BENEDETTI, O. BOUCHER, F. CHEVALLIER, A. DETHOF, H. ELBERN, H. ESKES, J. FLEMING, C. GRANIER, J. W. KAISER, J.-J. MORCLETTE, P. RAYNER, V.-H. PEUCH, L. ROUIL, M. G. SCHULTZ, A. J. SIMMONS y THE GEMS CONSORTIUM, 2008: "Toward a monitoring and forecasting system for atmospheric composition: The Gems Project". *Bulletin of the American Meteorological Society* 89, pp. 1147-1164.

ISAKSEN, I., P. A. E. M. JANSSEN, 2004: "Impact of ERS scatterometer winds in ECMWF's assimilation system". *Quarterly Journal of the Royal*

- Meteorological Society* 130, pp. 1793-1814.
- KAISER, J. W., A. HEIL, M. O. ANDREAE, A. BENEDETTI, N. CHUBAROVA, L. JONES, J.-J. MORCRETTE, M. RAZINGER, M. G. SCHULTZ, M. SUTTIE, M. y G. R. VAN DER WERF, 2011: "Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power". *Biogeosciences* 8(4), pp. 7339-7398.
- 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, J. WANG, A. LEETMAA, R. REYNOLDS, R. JENNE y D. JOSEPH, 1996: "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project". *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, pp. 437-471.
- MATSUNO, T., 1971: "A dynamical model of the stratospheric sudden warming". *Journal of the Atmospheric Sciences* 28, pp. 1479-1494.
- MIYAKODA, K., R. F. STRICKLER y G. D. HEMBREE, 1970: "Numerical simulation of the breakdown of a polar-night vortex in the stratosphere". *Journal of the Atmospheric Sciences* 27, pp. 139-154.
- MIYAKODA, K., G. D. HEMBREE, R. F. STRICKLER e I. SHULMAN, 1972: "Cumulative Results of Extended Forecast Experiments I. Model Performance for Winter Cases". *Monthly Weather Review* 100, pp. 836-855.
- MOLTENI, F., R. BUIZZA, T. N. PALMER y T. PETROLIAGIS, 1996: "The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 122, pp. 73-119.
- ONOGI, K., J. TSUTSUI, H. KOIDE, M. SAKAMOTO, S. KOBAYASHI, H. HATSUSHIKA, T. MATSUMOTO, N. YAMAZAKI, H. KAMAHORI, K. TAKAHASHI, S. KADOKURA, K. WADA, K. KATO, R. OYAMA, T. OSE, N. MANNOJI y R. TAIRA, 2007: "The JRA-25 Reanalysis". *Journal of the Meteorological Society of Japan* 85, pp. 369-432.
- PETERS, W., A. R. JACOBSON, C. SWEENEY, A. E. ANDREWS, T. J. CONWAY, K. MASARIE, J. B. MILLER, L. M. P. BRUHWILER, G. PÉTRON, A. I. HIRSCH, D. E. J. WORTHY, G. R. VAN DER WERF, J. T. RANDERSON, P. O. WENNBERG, M. C. KROL y P. P. TANS, 2007: "An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker". *Proceedings of The National Academy of Sciences USA* 104, pp. 18925-18930.
- PLOSHAY, J. J., R. WHITE y K. MIYAKODA, 1992: "FGGE reanalysis at GFDL". *Monthly Weather Review* 120, pp. 1747-1763.
- POLI, P., S. B. HEALY, D. P. DEE, 2010. Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 136, pp. 1972-1990.
- SCHERHAG, R., 1952: "Die explosionsartigen Stratosphärenwärmungen des Spätwinters 1951/52". *Berichte des deutschen Wetterdienstes in der US-Zone* 6, No. 38, pp. 51-63.
- SHUMAN, F. G., 1989: "History of numerical weather prediction at the National Meteorological Center". *Weather and Forecasting* 4, pp. 286-296.
- SIMMONS, A. J. y R. STRÜFING, 1983: "Numerical forecasts of stratospheric warming events using a model with a hybrid vertical coordinate". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 109, pp. 81-111.
- SIMMONS, A. J. y A. HOLLINGSWORTH, 2002: "Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128, pp. 647-677.
- SIMMONS, A. J., P. D. JONES, V. DA COSTA BECHTOLD, A. C. M. BELJAARS, P. W. KÄLLBERG, S. SAARINEN, S. M. UPPALA, P. VITERBO y N. WEDI, 2004: "Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40 and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature". *The Journal of Geophysical Research* 109, D24115, doi: 10.1029/2004JD005306.
- SIMMONS, A. J., M. HORTAL, G. KELLY, A. McNALLY, A. UNTCH y S. UPPALA, 2005: "ECMWF analyses and forecasts of stratospheric winter polar vortex break-up: September 2002 in the southern hemisphere and related events". *Journal of Atmospheric Science* 62, pp. 668-689.
- SIMMONS, A. J., K. M. WILLET, P. D. JONES, P. W. THORNE y D. P. DEE, 2010: "Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets". *The Journal of Geophysical Research*, 115, D01110, doi: 10.1029/2009JD012442.
- TWELES, S., 1958: "Anomalous warming of the stratosphere over North America in early 1957". *Monthly Weather Review* 86, pp. 377-396.
- TOTH, Z. y E. KALNAY, 1997: "Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method". *Monthly Weather Review* 125, pp. 3297-3319.
- UPPALA, S. M., P. W. KÄLLBERG, A. J. SIMMONS, U. ANDRAE, V. DA COSTA BECHTOLD, M. FIORINO, J. K. GIBSON, J. HASELER, A. HERNÁNDEZ, G. A. KELLY, X. LI, K. ONOGI, S. SAARINEN, N. SOKKA, R. P. ALLAN, E. ANDERSSON, K. ARPE, M. A. BALMASEDA, A. C. M. BELJAARS, L. VAN DE BERG, J. BIDLOT, N. BORMANN, S. CAIRES, F. CHEVALLIER, A. DETHOF, M. DRAGOSAVAC, M. FISHER, M. FUENTES, S. HAGEMANN, E. HÖLM, B. J. HOSKINS, L. ISAKSEN, P. A. E. M. JANSSEN, R. JENNE, A. P. McNALLY, J.-F. MAHFOUF, J.-J. MORCRETTE, N. A. RAYNER, R. W. SAUNDERS, P. SIMON, A. STERL, K. E. TRENBERTH, A. UNTCH, D. VASILJEVIC, P. VITERBO y J. WOOLLEN, 2005: "The ERA-40 Reanalysis". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131, pp. 2961-3012.