

Figura 3 — (A la izquierda): esquema del sistema de radiosondas con paracaídas del NCAR. Está diseñado para volar en la baja estratosfera por encima de los niveles de la aviación comercial y desplegar radiosondas con paracaídas a petición en intervalos de 1 hora o mayores, (a la derecha) fotografía de una sonda a la deriva durante un vuelo de prueba sobre el oeste de Oregón. Tuvo lugar un exitoso vuelo de varios días.

THORPEX, cuyos miembros son nombrados por los Representantes Permanentes de los Miembros de la OMM. El THORPEX se compromete con otros programas internacionales dentro de la OMM, el Consejo Internacional de Ciencia y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. A este respecto, el THORPEX aspira a ser el segundo Programa Mundial de Investigación Atmosférica (GARP), creciendo a partir de los logros del Primer Experimento Mundial del GARP. También tiene vínculos estrechos con organizaciones e iniciativas internacionales.

Los objetivos de investigación se desarrollan dentro de cuatro subprogramas: Predictibilidad y Procesos Dinámicos; Sistemas de Observación; Estrategias de Asimilación de Datos y de Observación; Aplicaciones Sociales y Económicas. Estos subprogramas coordinan las actividades de investigación previstas en los

Planes Internacionales de Ciencia y de Aplicación del THORPEX y colaboran con otros programas internacionales cuando se necesita experiencia relacionada y se obtienen beneficios mutuos. Las naciones y los consorcios de naciones han creado Comités Regionales THORPEX que definen las prioridades regionales para participar dentro del marco de los Planes Internacionales de Ciencia y de Aplicación del THORPEX.

#### Agradecimientos

Los autores quieren dar las gracias a la comunidad meteorológica internacional que ha hecho importantes aportaciones al desarrollo del THORPEX. Gracias especiales para Michel Bédard (Presidente del ICSC), Elena Manaenkova (Directora del PIAMA de la OMM) y David Rogers (jefe del grupo de Aplicación del THORPEX) por sus valiosos e importantes esfuerzos para desarrollar el THORPEX como un programa de investigación.

## Servicios meteorológicos mundiales en 2025: una actualización cinco años después

Por Richard A. ANTHES\*

*En 2025 se habrá resuelto el problema de los datos para la predicción meteorológica. Se habrán eliminado los errores de las observaciones, tal como los conocemos en la actualidad. Los modelos de*

*predicción meteorológica con resolución horizontal de 1 km habrán alcanzado los límites teóricos de la teoría de la predictibilidad. Las predicciones numéricas en el marco temporal de 0 a 2 días serán perfectas en lo esencial. Las predicciones a una semana serán tan perfectas como las predicciones a corto plazo de la actualidad. La informa-*

\* Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica

ción meteorológica será cientos de veces más útil para la sociedad que en la actualidad y a un menor coste por persona.

Hice la optimista "predicción" anterior en mi presentación de 1999 "Global weather services in 2025" ("Servicios meteorológicos mundiales en 2025") (<http://www.ucar.edu/pres/2025/web/index.htm>). Ahora han pasado cinco años de esta predicción a 25 años. Este artículo estudia brevemente cómo se está verificando mi visión de futuro de un cuarto de siglo y la actualiza de la manera adecuada, dando ejemplos de progresos recientes en las áreas de las observaciones, los avances científicos, la modelización y las aplicaciones. Se basa en una presentación que hice en la Conferencia Internacional sobre Tiempo y Clima de Gran Impacto en Seúl, en la República de Corea, en marzo de 2004, con motivo del 100.º aniversario de la Administración Meteorológica de Corea y del 40.º aniversario de la Sociedad Meteorológica de Corea (La presentación completa, animaciones incluidas, puede obtenerse en CD a través de la OMM).

En los cinco últimos años se ha producido un importante progreso dirigido a lograr muchas partes de mi visión de futuro, continuando una tendencia a largo plazo de más de 40 años de mejoras en la predicción meteorológica mundial, regional y local. Las predicciones de las alturas del geopotencial de 500 hPa en el hemisferio norte están mejorando a un ritmo de alrededor de un día por década (p. ej., la predicción a cinco días ahora en 2004 es más o menos igual de precisa que la predicción a cuatro días de hace 10 años). La Figura 6 del artículo de Uppala y otros de este número del *Boletín de la OMM* (véase la página 226) muestra la mejora desde 1980 de la correlación de la anomalía de las predicciones de la altura de 500 hPa hechas por el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo (CEPMMP). En una sorprendente convergencia de la pericia de la predicción, en la actualidad las predicciones de 500 hPa del hemisferio sur son tan precisas como las predicciones del hemisferio norte.

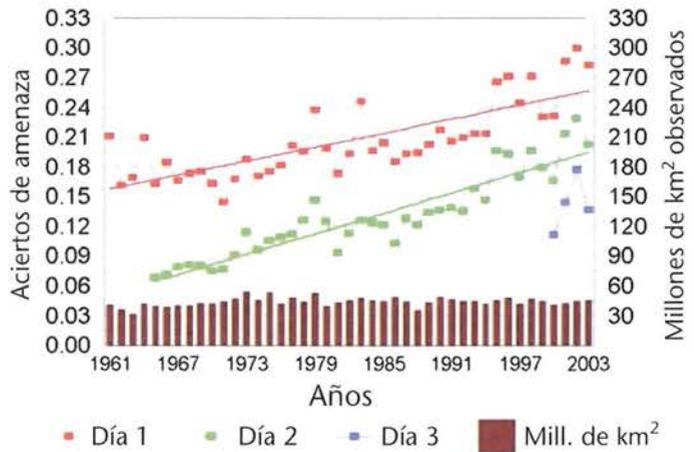


Figura 1 — Aciertos de amenaza de las predicciones de precipitación de 1,0 pulgada (25,4 mm) hechas por el Centro de Predicción Hidrológica, los Centros Nacionales de Predicción Medioambiental, el Servicio Meteorológico Nacional, la NOAA en los días 1, 2 y 3 (Cortesía de los NCEP).

Tanto las mejoras de las predicciones en cualquier lugar como la convergencia de la precisión de las predicciones del hemisferio sur y del hemisferio norte se deben al mayor número y tipos de datos de satélites, a los métodos mejorados de asimilación de datos, y a los mejores modelos. Merece la pena notar que estos aumentos en la precisión de la predicción se han producido a pesar de una reducción en el número de las observaciones de radiosondas mundiales de alrededor del 20 por ciento en los 45 últimos años. En marzo de 1958 había 45 478 observaciones de radiosondas; en marzo de 1997 el número era de 36 312 (CEPMMP, comunicación personal). A diferencia de esto, el número

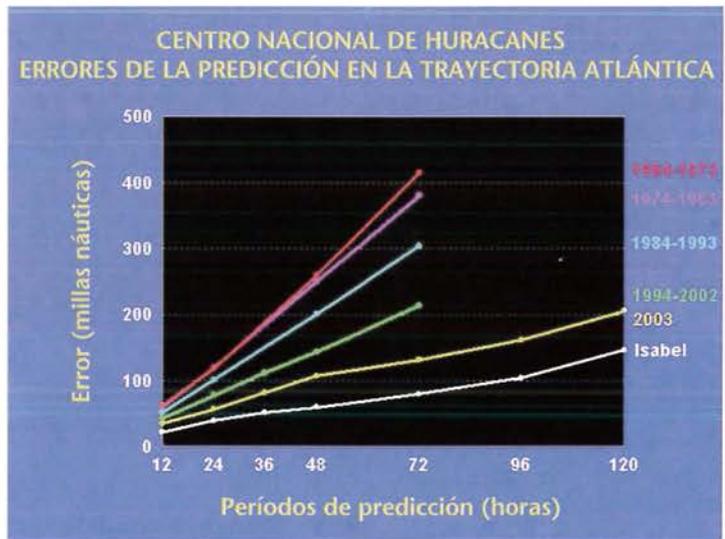


Figura 2 — Mejoras en las predicciones de las trayectorias de los temporales tropicales entre 1964-1973 y 2003 (Cortesía de los NCEP).

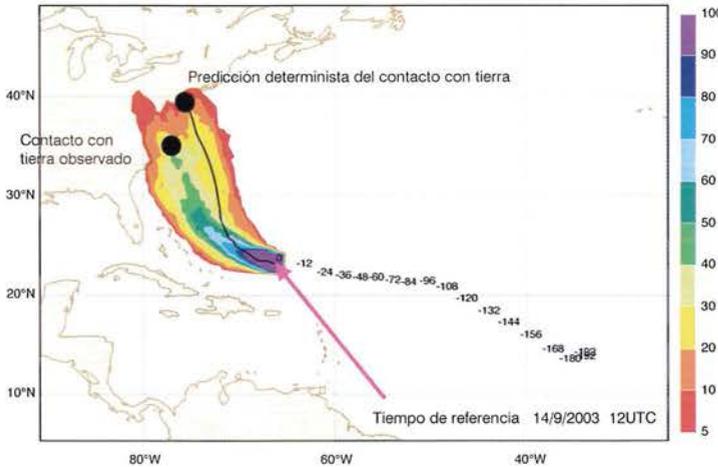


Figura 3 — Predicciones deterministas y de conjunto del CEPMMMP del huracán Isabel (2003) (Cortesía del CEPMMMP).

total de observaciones utilizadas en el sistema de asimilación de datos del CEPMMMP está creciendo exponencialmente, superando en 2003 los tres millones.

También están mejorando las predicciones de variables más importantes para la sociedad que las alturas de 500 hPa, incluidas las predicciones cuantitativas de precipitación (PCP). Por ejemplo, los aciertos de amenaza para el umbral de precipitación de 1,0 pulgada (25,4 mm) para una predicción a 48 horas en los EE.UU. han aumentado de unos 0,05 en 1962 a unos 0,19 en 2002 (Figura 1). No sabemos cuál es el límite teórico de predictibilidad de la PCP; sin embargo, a este ritmo, ¡se necesitarán unos 245 años para alcanzar el acierto de amenaza máximo posible de 1,0! Así que el progreso debe acelerarse para alcanzar mi visión de futuro de una predicción de precipitación a dos días “perfecta en lo esencial” antes de 2025. Al final de este artículo, especularé sobre por qué el ritmo de mejora en la PCP es relativamente lento y qué hará falta para acelerar el ritmo de mejora.

Mirando el lado alentador, se ha acelerado el ritmo de mejora en las predicciones de las posiciones de los ciclones tropicales. Como se muestra en la Figura 2, en la cuenca del Atlántico Norte, el error de la predicción de la trayectoria a 72 horas que comete el Centro Nacional de Huracanes de los EE.UU. ha disminuido de unas

410 millas náuticas (760 km) durante la década comprendida entre 1964 y 1973 a menos de 150 millas náuticas (278 km) en 2003.

Como se observa en *A Vision for the National Weather Service - Road Map for the Future (Visión de futuro del Servicio Meteorológico Nacional - Hoja de ruta para el futuro)*, del CNI (1999) (<http://pompeii.nap.edu/books/0309063795/html/index.html>), estas mejoras se deben a tres factores principales: mayor potencia de computación; mejores observaciones; y mejor conocimiento. La mayor potencia de computación permite modelos con mayor resolución horizontal y vertical, métodos avanzados de

asimilación de datos y predicción por conjuntos. La categoría de mejores observaciones incluye observaciones nuevas y un mejor uso de las existentes a través de la asimilación de datos. Y el mejor conocimiento está conduciendo a mejores modelos y a mejores técnicas de asimilación de datos.

Se están cumpliendo otras partes de mi visión de futuro de 1999. Se están desarrollando y aplicando, para usos beneficiosos para la sociedad, modelos de aplicaciones y de efectos. Entre los ejemplos se incluyen modelos de red anidada de alta resolución de huracanes, temporales polares en el Antártico, tiempo

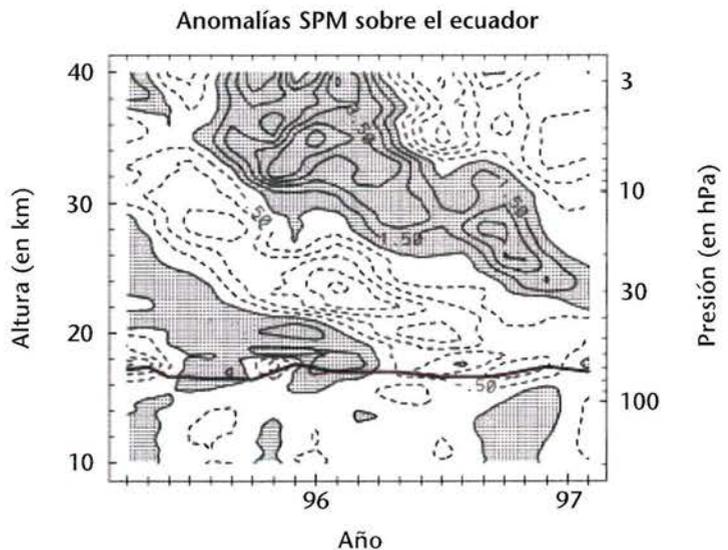


Figura 4 — Anomalías de la temperatura deseasonalizadas en la banda de latitudes comprendida entre 4°S y 4°N, calculada utilizando datos de ocultación de radio del SPM-MET. Los intervalos de contorno son  $\pm 0,5$ , 1,5 y 2,5 K, habiéndose omitido el contorno del cero. Los modelos de propagación hacia abajo muestran la Oscilación Cuasibienal. (Randel y otros, 2003).

violento en latitudes medias, meteorología química, modelos de enfermedades, meteorología de incendios y modelos acoplados de dispersión meteorológica. Las predicciones por conjuntos se están utilizando cada vez más para predecir episodios extremos como crecidas y huracanes. La Figura 3 muestra las predicciones por conjuntos del CEPMMP del huracán *Isabel*, que empieza a las 12 UTC del 14 de septiembre de 2003 y muestra con claridad el grado de incertidumbre en las predicciones de la trayectoria, que es tremendamente útil. Por ejemplo, aunque *Isabel* se estaba dirigiendo hacia el centro de Florida en el momento inicial de la predicción, se pudo asegurar a todo el estado de Florida, a partir del conjunto de predicciones, que era muy improbable (probabilidad inferior al 5 por ciento) que *Isabel* tomara tierra en Florida: ¡un resultado imposible hace 20 años! La Figura 3 también ilustra que la

predicción por conjuntos de la trayectoria es superior a la predicción determinista sencilla.

El análisis del crecimiento de los errores de la predicción en los modelos indica que la mayor parte de las mejoras en las predicciones a medio plazo se han producido por una reducción de la magnitud de los errores iniciales; una vez alcanzado un cierto error umbral en la predicción, las predicciones se degradan tan rápido ahora como hace 20 años. Este resultado sugiere que la mejora continuada en la capacidad de predicción en todos los períodos temporales dará como resultado una reducción adicional en la magnitud de los errores iniciales.

Afortunadamente, las nuevas tecnologías de observación sugieren que son posibles mejoras adicionales en la definición del estado inicial de la atmósfera. Se están desarrollando espectrómetros de imagen por

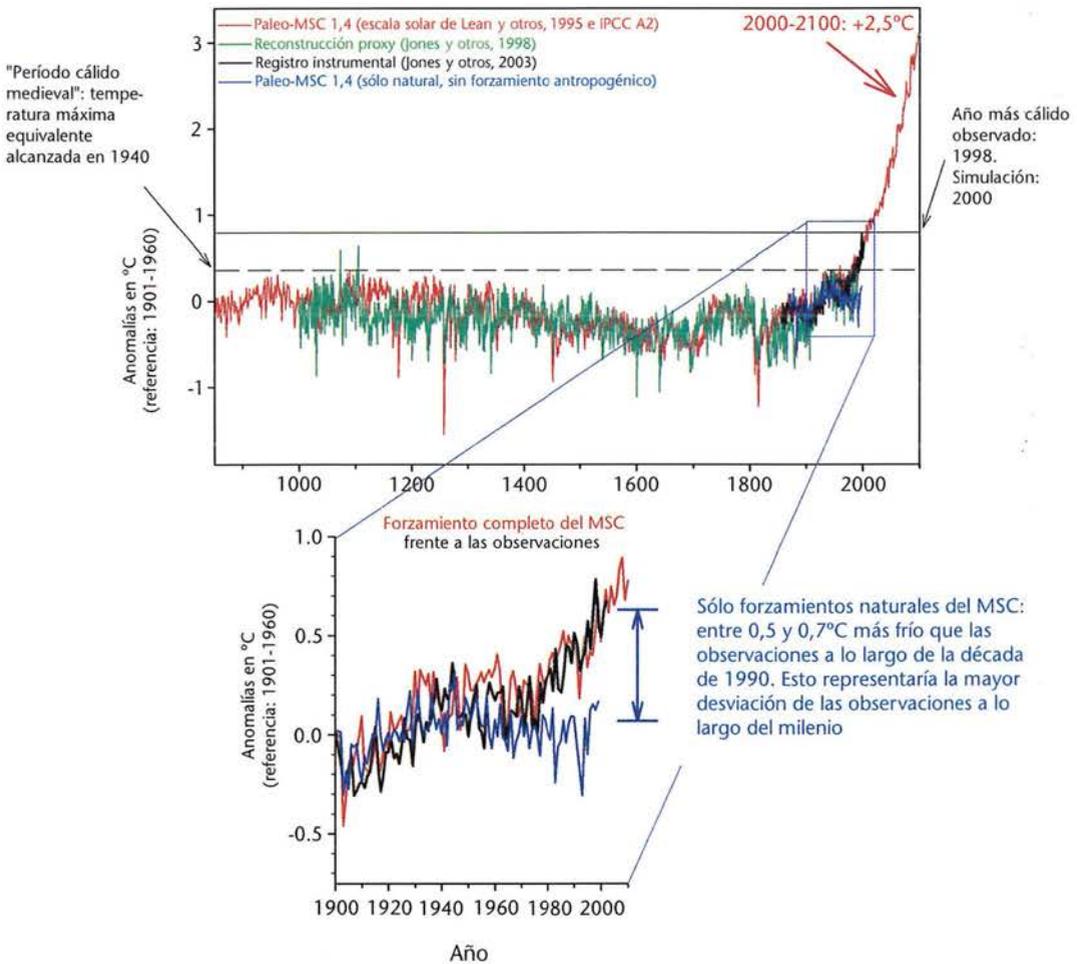


Figura 5 — Simulación de la temperatura media mundial del último milenio utilizando la versión paleoclimatológica del Modelo del Sistema Climático de la Comunidad del NCAR (Ammann, 2004)

transformada de Fourier, que ofrecen imágenes hiperspectrales de la atmósfera, para observar con alta resolución espacial y temporal la estructura termodinámica de la atmósfera desde satélites geostacionarios. Se están desarrollando líderes que puedan observar la estructura mundial de viento troposférico. Los medidores de dispersión observarán datos de viento en superficie sobre los océanos. Los radares de tierra y aire pueden observar la estructura y el movimiento de la precipitación. El reciente informe del *CNI Satellite Observations of the Earth's Environment - Accelerating the Transition of Research to Operations (Observaciones de satélite del medio ambiente de la Tierra - Cómo acelerar la transición de la investigación a las operaciones)* (<http://books.nap.edu/catalog/10658.html>) describe estas nuevas tecnologías y misiones y cómo contribuirán al Sistema de Información Terrestre (EIS): una descripción cuantitativa completa georreferenciada del sistema terrestre que sirve de apoyo a distintas aplicaciones y usuarios (NRC, 2003).

Se están desarrollando con rapidez sistemas de observación SPM (Sistema de Posicionamiento Mundial) terrestres y espaciales. En Japón, Europa y los EE.UU. están surgiendo redes de mesoescala de receptores SPM terrestres que suministran medidas continuas del vapor de agua precipitable y de trayectoria oblicua. Las misiones de ocultación de radio SPM CHAMP y SAC-C han confirmado el éxito inicial del experimento SPM-MET (1995-1997) y se están desarrollando planes para una constelación de seis satélites de receptores SPM en el proyecto COSMIC (Sistema de Constelación para Observar la Meteorología, la Ionosfera y el Clima), con los lanzamientos previstos para finales de 2005 (<http://www.cosmic.ucar.edu/>). Las observaciones de ocultación de radio están demostrando ser muy prometedoras para la investigación y la vigilancia del clima (Goody y otros, 1998) y para la investigación y la predicción numérica del tiempo. La Figura 4 (Randel y otros, 2003) ilustra cómo pueden utilizarse los datos del SPM-MET para resolver con precisión las características de las ondas troposféricas superiores y estratosféricas inferiores. Se puede encontrar más información sobre la tecnología de observación SPM y sus aplicaciones en los números especiales de *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* (TAO, 2001) y en el *Journal of the Meteorological Society of Japan* (JMSJ, 2004).

Los modelos climatológicos están mejorando con rapidez, y ahora es posible simular y explicar las variaciones en la temperatura mundial a lo largo de los mil últimos años con modelos climatológicos (Figura 5). Los modelos también muestran capacidad para las predicciones mensuales, estacionales e interanuales. De hecho, se está desdibu-

jando la distinción entre modelos meteorológicos, climatológicos y del sistema terrestre y es probable que en 2025 haya pocas diferencias de principio entre los tres tipos de modelos.

En resumen, se ha hecho un progreso continuo a lo largo de los 50 últimos años en la predicción tanto de los modelos meteorológicos a escala mundial como del tiempo de importancia para la sociedad, como la precipitación y las trayectorias de los ciclones tropicales. Este progreso es el testimonio de la inversión de los países en el sistema mundial de observación y de que se comparten las observaciones entre todos los países, del rápido crecimiento en la capacidad de computación, del mejor conocimiento de la atmósfera y de otras componentes del sistema terrestre y del desarrollo de modelos numéricos más realistas del Sistema Terrestre. Además, no se puede dar demasiado énfasis al desarrollo de sistemas avanzados de asimilación de datos que puedan usar eficazmente observaciones tan diversas como las de las temperaturas, los vientos, los parámetros de la superficie terrestre, el estado del mar y los constituyentes químicos para crear mejores análisis en cuatro dimensiones de la atmósfera, los océanos, las superficies terrestre y de hielo.

Así, mi visión de futuro para los servicios meteorológicos mundiales en 2025 va, en general, por buen camino, aunque el ritmo de progreso en la predicción de distintos aspectos del sistema terrestre varía considerablemente. No hay ninguna prueba de que el ritmo de progreso esté decreciendo, y en algunos casos parece que está aumentando. Es muy probable que el ritmo de avance pueda acelerarse en todos los aspectos de las predicciones del sistema terrestre mediante una mayor inversión en los tres pilares de la predicción: las observaciones, los ordenadores y la investigación. Ya están aquí nuevas tecnologías de observación y en el horizonte hay nuevos sistemas operativos como el NPOESS. Los avances en la capacidad informática no muestran signos de decrecimiento. Para mantener el ritmo actual de progreso hará falta una inversión continuada por parte de las naciones del mundo en los sistemas mundiales de observación, los ordenadores y los recursos humanos necesarios para utilizar con eficacia el poder de las observaciones y de los ordenadores en modelos mejorados y en sistemas de asimilación de datos.

Para terminar, vuelvo brevemente al difícil y pertinaz problema de la predicción cuantitativa de la precipitación (PCP, Figura 1). La PCP es difícil porque depende de procesos dinámicos y microfísicos complejos y de la interacción de las escalas del movimiento que van de la planetaria a la microfísica, al menos 14 órdenes de magnitud. Para lograr una PCP de gran precisión harán falta condiciones iniciales de gran preci-

sión de vientos, temperatura, vapor de agua y propiedades microfísicas como las partículas y los aerosoles nubosos y de precipitación. Con las nuevas tecnologías de observación, como los sondeos hiperespectrales y de ocultación de radio SPM parece posible poder lograr una descripción cuantitativa de alta resolución de la atmósfera "casi perfecta". Cuando se produzca esto, la principal limitación de la PCP serán los mecanismos de inicialización de disparo de mesoescala, las variables de aerosoles, nubes y precipitación y la modelización precisa de los procesos de la física de nubes. Los radares Doppler y polarimétricos jugarán un papel importante en la inicialización a pequeña escala de estas variables. Todo esto requerirá modelos de muy alta resolución que contengan de manera explícita las variables microfísicas y una representación precisa de la física de aerosoles, de nubes y de la precipitación.

### Agradecimientos

Quiero dar las gracias a Tony Hollingsworth, a Francois Lalauette, a Adrian Simmons y a Jean-Noël Thépaut, del Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo (CEPMMP); a Lauren Morone y a Louis Uccellini, de los Centros Nacionales de Predicción Medioambiental (NCEP); y a Caspar Ammann y a Bill Randel, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (CNIA) por facilitarme las figuras y por sus conversaciones y sus percepciones muy productivas. El

UCAR y el CNIA están patrocinados por la Fundación Nacional de Ciencia y por otras agencias.

### Referencias

- AMMANN, C., 2004: Comunicación personal.
- GOODY, R., J. ANDERSON y G. NORTH, 1998: Testing climate models: An approach. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 79, 2541-2549.
- JMSJ, 2004: Application of GPS Remote Sensing to Meteorology and Related Fields, Anthes, Elgered, Kuo, Tsuda, Hatanaka, Satomura, Nakazawa, Aonashi, Seko y Nakamura, Ed., *Número especial del Jour. Meteor. Soc. Japan*, 82, N.º 1B, 596 pp.
- NRC, 1999: *A Vision for the National Weather Service - Road Map for the Future*. National Research Council, The National Academies Press, Washington, DC, 76 pp.
- NRC, 2003: *Satellite Observations of the Earth's Environment - Accelerating the Transition of Research to Operations*, National Research Council, The National Academies Press, Washington, DC, 163 pp.
- RANDEL, W. J., F. WU y W. RIVERA RÍOS, 2003: Thermal variability of the tropical tropopause region derived from GPS/MET observations. *J. Geophys. Res.*, 108(D1), 4024, doi:10.1029/2002JD002595.
- TAO, 2001: Applications of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate. Número especial de *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, L.-C. Lee, C. Rocken y R. Kursinski (Eds.), Springer, Hong Kong, 384 pp.
- UPPALA, S., A. J. SIMMONS y P. KÄLLBERG, 2004: Predicción numérica del tiempo mundial: un resultado del FGGE y un salto espectacular para la meteorología. *Boletín de la OMM* 53(3), 221-227.

247

## Las personas que estaban detrás del Experimento

Por James L. RASMUSSEN

### Introducción

En el artículo principal de esta colección de artículos que celebran el XXV aniversario del Primer Experimento Mundial del GARP<sup>1</sup> (FGGE), el Profesor Bo Döös describe la evolución histórica y el diseño del experimento y también su puesta en marcha. Señala los papeles críticos que jugaron el Comité Mixto de Organización (CMO) de la OMM y el CIUC, el Grupo Intergubernamental para el FGGE del Comité Ejecutivo de la OMM y los compromisos individuales nacionales que en conjunto formaron el programa de observación del FGGE, y las actividades asociadas de gestión de datos y de investigación. Mi papel en este pequeño artículo es

recordar el papel excepcional que jugó en el esfuerzo el personal de la Secretaría de la OMM, destacando cómo se ofreció apoyo, a través de la Oficina de Actividades del GARP del Grupo Mixto de Planificación (OAG del GMP) y de otros departamentos de la Secretaría, a los científicos que estaban planificando el experimento y al organismo intergubernamental que lo dirigía. Una tarea especial de la OAG del GMP fue el seguimiento de la operación durante la creación y durante el año operativo, del 1 de diciembre de 1978 al 30 de noviembre de 1979, y durante los dos Períodos Especiales de Observación, del 5 de enero al 5 de marzo de 1979 y del 1 de mayo de 1979 al 30 de junio de 1979.

Como señala el Profesor Döös, el año del FGGE fue también el año de tres experimentos de observación del monzón regional: los MONEX (de Invierno y de Ve-

<sup>1</sup> Programa de Investigación de la Atmósfera Global (GARP).