

Necesidades de observación para la predicción y adaptación climáticas

por Kevin E. Trenberth*

Introducción

El clima está cambiando. En términos generales, las temperaturas están experimentando un aumento (Figura 1), como consecuencia de los cambios en la composición de la atmósfera inducidos por el ser humano, con un importante incremento de las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2007). En su mayor parte, la tierra se está calentando a un ritmo más elevado que el océano. No obstante, un análisis exhaustivo de la Figura 1 muestra que las temperaturas incluso descendieron entre 1901 y 2005 en la zona del sureste de los Estados Unidos y en el Atlántico Norte. ¿A qué se debe esto? En el Atlántico Norte, los cambios en las corrientes oceánicas contribuyen de un modo evidente, mientras que sobre la región del sureste de los Estados Unidos los cambios en la circulación atmosférica, que trajeron consigo condiciones más nubosas y más húmedas, desempeñaron un papel fundamental (Trenberth y otros, 2007). Esta falta de uniformidad en el cambio pone de manifiesto los desafíos del cambio climático a nivel regional, que cuenta con una importante estructura espacial y variabilidad temporal.

La base de la investigación climática y de las proyecciones futuras son las observaciones, que proceden de muchas y variadas fuentes. Muchas se hacen para realizar pronósticos meteorológicos. Los cambios son habituales en la instrumentación y en el emplaza-

miento, desbaratando así el registro climático, para el que la continuidad y la homogeneidad son aspectos de vital importancia de cara a evaluar las variaciones y los cambios climáticos. El aumento en la cantidad de observaciones proviene de plataformas con base espacial, pero los satélites tienen un período de vida limitado (normalmente, alrededor de cinco años), la órbita se desvía y desaparece con el paso del tiempo, los instrumentos se degradan y, por tanto, el pretendido registro climático puede corromperse. Uno de los desafíos actuales es el de crear registros de datos climáticos a partir de las observaciones para abordar diferentes propósitos.

La pérdida de satélites de observación de la Tierra también resulta preocupante, tal y como se ha documentado en el reciente estudio decenal publicado

por el Consejo Nacional de Investigación (2007). Las observaciones desde estaciones situadas en la superficie terrestre no están teniendo una continuidad adecuada en muchos países, la calibración de los registros climáticos representa un proceso crítico, y los pequeños cambios que ocurren en un largo período de tiempo, característicos del cambio climático, tienen lugar en medio de grandes variaciones asociadas con cambios meteorológicos y climáticos naturales, como El Niño. No obstante, el clima está cambiando, y es imprescindible registrar estos cambios y las causas en el momento en que surgen, así como identificar cuáles son las perspectivas para el futuro (hasta el punto en que se puedan predecir). Tenemos que crear un sistema basado en estas observaciones, con la finalidad de informar a los responsables de la toma de decisiones sobre qué es

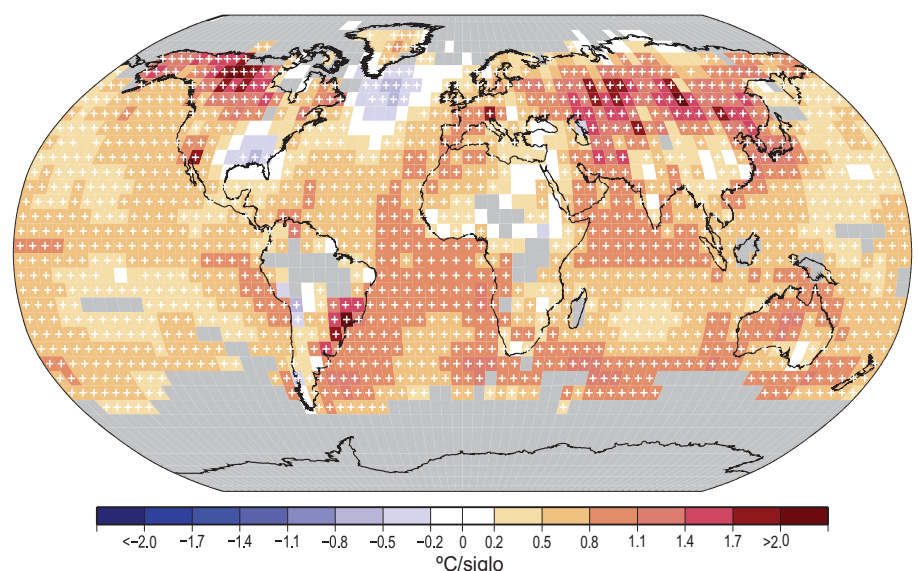


Figura 1 – Tendencia lineal de temperaturas anuales entre 1901 y 2005 ($^{\circ}\text{C siglo}^{-1}$). Las zonas en gris no cuentan con suficientes datos como para registrar una tendencia fiable. Las tendencias significativas al nivel del 5% se señalan con cruces blancas (extraído de Trenberth y otros, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, IPCC).

* Centro Nacional de Investigación de la Atmósfera, Boulder, Co 80307 (EEUU). Correo electrónico: trenbert@ucar.edu

lo que está ocurriendo y por qué, así como las predicciones disponibles en diversos horizontes temporales.

En este artículo se presenta un resumen relativo a un subconjunto de actividades relacionadas con las necesidades de información climática de los encargados de la toma de decisiones de cara a la adaptación. Está basado en algunos debates mantenidos durante un seminario de aprendizaje surgido a partir de la cuarta evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Sídney, Australia, 4-6 de octubre de 2007). El seminario fue patrocinado por el Sistema Mundial de Observación del Clima, por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) y por el Programa Internacional Geosfera-Biosfera del Consejo Internacional para la Ciencia. Dentro del PMIC, su Grupo de expertos en observaciones y asimilación (WOAP), que preside el autor, trata de hacer hincapié en asuntos pendientes y en las formas de abordarlos de cara al futuro.

Creación de información base para la adaptación

Un diagnóstico detallado de los signos vitales del planeta Tierra ha revelado que el planeta está sufriendo una "fiebre", y el pronóstico afirma que la situación es propensa a tornarse mucho peor. "El calentamiento del sistema climático es inequívoco", y es "muy probable" que se deba a las actividades humanas. Este es el veredicto emitido por el cuarto informe de evaluación del IPCC, conocido como AR4 (IPCC, 2007). Aunque la mitigación del cambio climático por la acción humana tiene una importancia fundamental, las evidencias apuntan a que el clima continuará cambiando de forma importante como resultado de las actividades humanas durante las próximas décadas, por lo que la adaptación será esencial.

Un primer paso imprescindible y fundamental es crear un sistema de información climática (Trenberth y otros, 2002; 2006) que se encargue de aportar datos a los responsables de la toma de decisiones acerca de qué está pasando y por qué, y cuáles son las perspectivas inmediatas (véase la Figura 2). En términos generales, lo que

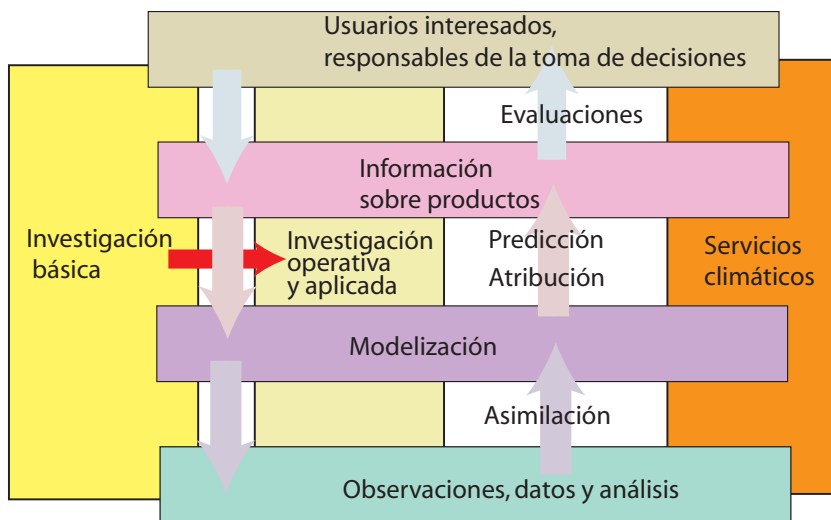


Figura 2 – Esquema del flujo del sistema de información climática: descripción de cómo la investigación básica alimenta la investigación aplicada y operativa para el desarrollo de los servicios climáticos. El conjunto está construido sobre el sistema de observación climática, que incluye: el análisis y la asimilación de datos mediante modelos para obtener análisis y campos con el fin de iniciar otros modelos, así como la utilización de modelos para la atribución y predicción; con toda la información valorada y reunida se obtienen productos e información que son distribuidos a los usuarios. Por su parte, los usuarios suministran información de retorno acerca de sus necesidades y la forma de mejorar la información.

se necesitan son observaciones (que satisfagan los principios de observación climática); un sistema de seguimiento del rendimiento; la adquisición, archivo y administración de datos; el acceso a los mismos (incluyendo la gestión e integración de los datos); el análisis y reanálisis de las observaciones y la obtención de productos, incluyendo en particular los registros de datos climáticos (Consejo Nacional de Investigación, 2005); la evaluación de lo que ha sucedido y por qué (atribución), incluyendo posibles impactos sobre los seres humanos y los ecosistemas; la predicción del cambio climático a corto plazo durante varias décadas; y la receptividad de los encargados de la toma de decisiones y de los usuarios.

Todo esto, en primer lugar, significa reunir la información relativa a los cambios en el clima y los forzamientos, y formular en la medida de lo posible los motivos por los que han tenido lugar los cambios. Cualquier actividad de atribución se centra fundamentalmente en la ciencia de la predicción climática, incluyendo la capacidad de predicción de la variabilidad climática (por ejemplo, El Niño/Oscilación Austral), variabilidad estacional, etc.), así como el cambio climático a largo plazo. De hecho, la comprensión y la atribución de qué es lo que acaba de ocurrir se podrían plantear

como un requisito previo de cara a llevar a cabo la siguiente predicción climática. El objetivo fundamental es comprender las causas de la variabilidad y los cambios climáticos observados, incluyendo las incertidumbres, y también ser capaces de (a) utilizar este conocimiento para mejorar el realismo de los modelos y la técnica de predicción, y (b) comunicar este conocimiento a los usuarios del fenómeno climático y al público en general.

La atribución podría contemplar dos fases: por ejemplo, una fase supone la utilización de modelos atmosféricos con el fin de determinar hasta qué punto las condiciones recientes podrían haber sido previstas a partir de las temperaturas de la superficie del mar (TSM), la humedad del suelo, el hielo marino y otras influencias anómalas que se hubieran observado en la atmósfera. El segundo paso es afirmar por qué las TSM y la humedad del suelo, etc., son de la forma que son. En la medida en que los modelos han mejorado, los fenómenos climáticos que no podían ser atribuidos a ninguna causa en el pasado ahora sí pueden ser objeto del mencionado proceso de atribución.

Los modelos siguen estando muy lejos de ser perfectos, y es probable que subestimen lo que realmente puede

someterse al proceso de atribución. Los investigadores individuales podrían encontrarse por encima del consenso, por lo que ambos pasos deberían tomar en consideración los defectos de los modelos, y las pruebas empíricas (estadísticas, etc.) pueden resultar en ocasiones más convincentes. Un requisito es contar con recursos informáticos muy amplios con el fin de poder llevar a cabo simulaciones de conjunto y simulaciones que tengan una resolución suficiente para una atribución climática a escala regional (por ejemplo, sequías, huracanes, crecidas, etc.). Una cuestión a investigar es cómo llevar a cabo este proceso de forma eficaz.

El desarrollo de este sistema de información climática asumiría, potencialmente, en un marco más operativo, una parte fundamental de lo que actualmente se lleva a cabo por parte del IPCC. Hay muchas cuestiones sobre cómo desarrollar el sistema, lo que debe incluir y el modo de hacerlo viable. Las actividades continuadas relacionadas consistirían en inicializar modelos climáticos y en realizar predicciones por conjuntos para los próximos 30 años y siguientes como se muestra a continuación.

Inicio y validación de las predicciones decenales

La utilización de modelos atmosféricos con TSM especificadas ha significado con frecuencia la comprensión de las anomalías climáticas del pasado. Por ejemplo, la sequía en la región del Sahel (Giannini y otros, 2003) y el período de sequía "Dust Bowl" en los Estados Unidos acaecido durante la década de 1930 (Schubert y otros, 2004; Seager y otros, 2005) pueden simularse de esta manera. Hurrell y otros (2004) descubrieron que algunos aspectos de la Oscilación del Atlántico Norte pueden simularse con TSM previamente establecidas. Resulta fundamental contar con los patrones de TSM que se registran a lo largo y ancho de todo el planeta, tanto en simulación como en observación, y es manifiestamente imposible llevar a cabo las predicciones en cuestión sin inicializar los procesos relacionados con el ámbito oceánico y otros aspectos del sistema climático.

El punto hasta el que este proceso desemboca en capacidad de predicción aún no está claro, pero la hipótesis subyacente afirma que existe un importante nivel de capacidad de predicción que puede emplearse en mejorar la adaptación y de cara a la planificación por parte de los responsables de la toma de decisiones. Algunas pruebas iniciales a este respecto (Smith y otros, 2007) muestran un beneficio prometedor al inicializar los modelos, aunque el beneficio proviene en gran medida del fenómeno ENOA.

En un marco temporal de 30 años, las predicciones climáticas no se muestran sensibles a los escenarios de emisión, por lo que este aspecto puede retirarse en gran parte de la consideración. Aun así las predicciones en este marco temporal podrían ser extremadamente valiosas. Las predicciones sobre el (cambio del) clima son, por ende, necesarias de cara a suministrar información en una escala temporal de 0 a 30 años, pero con estimaciones de incertidumbre (conjunto) y estimaciones de sensibilidad ante los errores en las condiciones iniciales. Esto también desemboca en modelos mejorados a través de pruebas regulares frente a los datos, tal y como se pone de relieve más adelante. El PMIC ha iniciado la investigación en este ámbito bajo el marchamo de "predicción climática sin fisuras", que requiere la predicción a escalas temporales múltiples, abarcando desde la predicción numérica del tiempo con validez de semanas (véase el Experimento de investigación y predictibilidad del sistema de observación (THORPEX), en la dirección <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/thorpe/x/>) hasta la variabilidad interanual que incluye el fenómeno ENOA y las predicciones pluridecenales, todos ellos problemas de valores iniciales que necesitan que se especifique el estado inicial observado.

Para la predicción meteorológica se necesitan análisis detallados de la atmósfera, aunque las incertidumbres del estado inicial crecen rápidamente durante varios días. Para las predicciones climáticas, el estado inicial de la atmósfera es menos crítico; los estados separados por un día aproximadamente pueden sustituirse. Sin embargo, los estados iniciales de otros componentes del sistema climático, de los que algunos podrían no ser fundamentales para la predicción del día a día, se convierten en esenciales. Para la predicción de una estación a un año vista

aproximadamente, las TSM, la extensión del hielo marino y el contenido de calor de la capa superior del océano, la humedad del suelo, la cubierta de nieve y el estado de la vegetación de la superficie son todos factores importantes. Estas predicciones de los valores iniciales ya están operativas para predecir el fenómeno de El Niño, y la ampliación a todos los océanos del planeta se encuentra en marcha. Si se trabaja con escalas temporales más amplias, el hecho de contar con una mayor información relativa a todo el océano es fundamental. La masa, extensión, grosor y estado del hielo marino y de la capa de nieve son esenciales en latitudes elevadas. El estado de la vegetación y la humedad del terreno, junto con otros aspectos de la superficie terrestre, son especialmente importantes a la hora de comprender y predecir las anomalías de precipitación y temperatura de la estación cálida. Todas las informaciones relativas a los cambios sistemáticos de la atmósfera (especialmente su composición y la influencia de las erupciones volcánicas), así como forzamientos externos, como los provenientes de cambios en el Sol, también son necesarios. Las incertidumbres en el estado inicial, la falta de predictibilidad detallada y otros aspectos del clima, obligan a realizar predicciones por conjuntos y de tipo estadístico.

Las diversas actividades se emplean directamente para ofrecer predicciones a nivel regional, incluyendo la reducción de escala o *downscaling*, y deberían derivar en distribuciones de probabilidad para campos de interés. Los resultados tendrían aplicación directa a nivel regional, donde los impactos se notan en mayor medida y donde puede tener lugar una adaptación planificada.

La predictibilidad debería surgir de determinados fenómenos que evolucionan lentamente, o que cuentan con una gran inercia térmica, como por ejemplo los sistemas de corrientes oceánicas, incluyendo la circulación meridional de retorno del océano, los mantos de hielo, el nivel del mar y las propiedades de la tierra. Algunas predictibilidades pueden determinarse a partir de experimentos con modelos, pero solo hasta el punto en que los modelos son adecuados por sí mismos. Tratar con los errores sistemáticos constituye un desafío particular de cara a la asimilación de observaciones reales. El hecho de contar con conjuntos exhaus-

tivos de datos de alta calidad tanto para iniciar los modelos como para probarlos en modo de predicción retrospectiva, es de una importancia fundamental, y está directamente vinculado con el reanálisis de los componentes del sistema climático, quizás en modo acoplado. Estos datos también son fundamentales para mejorar los modelos. Debe llegarse a un compromiso entre alta resolución y fidelidad frente a realizar múltiples pasadas o a realizar predicciones de conjunto, usando estados iniciales perturbados o empleando múltiples modelos. La métrica para poder proceder a la evaluación es un campo que se encuentra en vías de desarrollo, pero debe prestarse atención a los modos de variabilidad, como por ejemplo el fenómeno ENOA, y cómo hacer frente a los fenómenos no tratados, como por ejemplo los ciclones tropicales.

Confrontación de modelos frente a las observaciones

Es deseable confrontar los modelos con pruebas observacionales para interpretar los cambios históricos percibidos en el sistema climático y tener confianza en las proyecciones de cambios futuros. El AR4 muestra que actualmente contamos con una comprensión relativamente buena de las causas por las que se producen los cambios en la temperatura de la superficie que se han observado durante el siglo XX, tanto a escala mundial como continental. Somos capaces de cuantificar las contribuciones al cambio observado procedentes de las principales influencias externas (incluyendo las influencias del ser humano) sobre el clima durante el siglo pasado. No obstante, nuestra capacidad de interpretar los cambios en la mayor parte de las demás variables de gran impacto (como los cambios de circulación, cambios en las precipitaciones y modificaciones en extremos de varios tipos) sigue siendo más limitada.

Es necesario llevar a cabo experimentos diseñados de forma específica para aislar y corregir las causas de las tendencias de los modelos de larga duración, resultantes, por ejemplo, de las continuas dificultades en la representación de procesos convectivos, que dan como resultado una representación deficiente

del ciclo diurno de precipitaciones, de los modos asociados de interacción aire-mar y de la distribución de los estratos marinos. Se necesita focalizar la experimentación con modelos climáticos para aislar las causas de las tendencias específicas y persistentes en el modelo al nivel del proceso. Por ejemplo, el Proyecto de intercomparación de modelos de realimentación de nubes (CFMIP) (<http://cfmip.metoffice.com/index.html>) se centra en las realimentaciones de las nubes, mientras que el Proyecto de intercomparación de modelos de transferencia en la atmósfera emplea modelos climáticos en modo de predicción meteorológica con el fin de examinar las tendencias que se desarrollan rápidamente en previsiones de hasta cinco días.

Existe una acuciante necesidad de desarrollar y aplicar un conjunto de métricas, aceptadas por el conjunto de la comunidad, y que podrían emplearse para sopesar todos los modelos diferentes que contribuyen a los grandes conjuntos. Podrían basarse en: la capacidad de simular el ciclo anual medio; la variabilidad climática observada a escalas que van desde horas (diurnas) hasta decenios; las características de la evolución histórica a largo plazo del sistema climático calculadas a partir de antiguos registros datados, por ejemplo, a lo largo del último milenio, en el Último Máximo Glacial, o en otro momento en el que las restricciones de observación fueran considerables; o la capacidad de producir predicciones meteorológicas a corto plazo como un problema de valores iniciales y una evolución a corto plazo del sistema climático durante el tiempo que se ha contado con asistencia satelital como problema de valores iniciales y de condiciones de contorno forzadas.

Reproceso y reanálisis

Aunque en términos generales se ha producido una continua mejora de la red de satélites de observación de la Tierra, con importantes avances en las mediciones efectuadas por los satélites operativos, han surgido problemas a la hora de establecer y mantener las observaciones climáticas desde el espacio, que se han puesto de manifiesto por el proceso de desenfoco del Sistema

nacional de satélites de órbita polar para el estudio del medio ambiente, en el que las observaciones climáticas se han visto seriamente comprometidas. Las perspectivas a más largo plazo de las observaciones de la Tierra tampoco son tan buenas como lo han sido hasta ahora (Consejo Nacional de Investigación, 2007).

Los continuos problemas a la hora de establecer y mantener medidas globales de variables climáticas fundamentales ponen de manifiesto la necesidad de contar con una coordinación internacional formal a través de los organismos y las misiones correspondientes, en relación con grupos de usuarios de la comunidad climática. La coordinación es especialmente importante en la fase de diseño de las misiones (de tal manera que la coherencia y la continuidad puedan conservarse), así como en los procesos de calibración y validación (de tal forma que puedan recopilarse datos coherentes desde un punto de vista tanto espacial como temporal). Ambos aspectos han sido identificados por el Comité sobre satélites de observación de la Tierra a través del concepto de constelación virtual y del Sistema mundial de intercalibración espacial.

Es necesario llevar a cabo un trabajo mucho más intenso para sacar partido de las observaciones ya realizadas. Una parte fundamental de la estrategia general a la hora de crear registros de datos climáticos es la necesidad de contar con un programa potente de reproceso de datos anteriores (SMOC, 2004) y reanálisis de todos los datos en campos globales. El informe AR4 del IPCC muestra los defectos en numerosos registros climáticos, especialmente en los procedentes del espacio. Sin embargo, la investigación relacionada también ha puesto de manifiesto el potencial de mejora de los registros en la medida en que se progresa en el desarrollo del algoritmo y se encuentren soluciones a los problemas. Estos, entre otros, incluyen discontinuidades en el registro a través de diferentes instrumentos y satélites, desvíos en los efectos orbitales y todos los aspectos relacionados con la creación de auténticos registros de datos climáticos.

El WOAP ha establecido una serie de directrices (<http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/>)

ReprocessingPrinciples.pdf) relativas a cuándo es apropiado llevar a cabo un reproceso, y si procede efectuarlo o no. La coordinación entre las principales agencias espaciales es altamente deseable de cara a ponerse de acuerdo sobre los algoritmos y los procesos de calibración. Los campos en cuestión incluirían temperatura, vapor de agua, nubes, radiación, temperaturas de la superficie del mar, hielo marino y capa de nieve, y sobre todo, tormentas tropicales y huracanes. La comunidad científica puede llevar a cabo semejante empresa, pero esta requiere importantes recursos y coordinación, en particular, entre las agencias espaciales internacionales.

Se realizan análisis atmosféricos globales de forma operativa en tiempo real. Conforme se procede a mejorar el modelo de asimilación empleado para analizar las observaciones, los análisis podrían cambiar. Reanálisis es el nombre dado al reproceso de estas y otras observaciones con un sistema avanzado que se mantiene constantemente actualizado, mejorando así la continuidad del registro climático resultante. El reto de tratar con el cambiante sistema de observación sigue presentándose ante nosotros. El resultado es una descripción más coherente de los cambiantes componentes atmosféricos, oceánicos y de la superficie terrestre así como de otros componentes climáticos que pueden ser utilizados por los muchos clientes de los productos climáticos, incluyendo aquellos que no pueden observarse directamente. Por este motivo, el reanálisis contribuye con los objetivos de creación de capacidad de programas como la Red mundial de sistemas de observación de la Tierra, y debería considerarse como un componente fundamental de un sistema de observación climática. El WOAP promueve el reanálisis (http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF_WOAPReanalysisClimate.html); en enero de 2008 se celebrará la tercera Conferencia internacional sobre reanálisis en Tokio (Japón).

Conclusiones

La creación de un sistema de información climática (véase la Figura 2) integra, de forma potencial, la investigación y la producción del PMIC, el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (PIGB), el programa DIVERSITAS (un programa internacional de ciencia de la biodiversidad (ESSP/PIGB/PIDH/

PMIC)), el Programa Internacional sobre las Dimensiones Humanas del Cambio Ambiental Global (ESSP/DIVERSITAS/PIGB/PMIC) y el Sistema Mundial de Observación del Clima. Las investigaciones básicas aportan sus datos a la investigación aplicada y operativa que, a su vez, desarrolla productos y servicios climáticos.

Muchos aspectos requieren investigaciones relativas a recopilación de observaciones, análisis y asimilación, estudios de atribución, establecimiento de relaciones entre las variables de los impactos físicos y medioambientales, utilización de modelos y tratamiento de tendencias del modelo, predicciones y proyecciones, procesos de *downscaling* y regionalización de resultados, así como el desarrollo de sistemas de información y de vías de interacción con los usuarios. Para cumplir de forma satisfactoria los desafíos de la investigación anterior se necesita una financiación adecuada, aunque en teoría se compensa con la obtención de un valioso sistema de información.

Referencias

Global Climate Observing System [SMOC], 2004: *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC*. GCOS-92. 143 pp.

GIANNINI, A., R. SARAVANAN and P. CHANG, 2003: Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 302, 1027-1030.

HOERLING, M. and A. KUMAR, 2003: The perfect ocean for drought. *Science*, 299, 691-694.

HURRELL, J.W., M.P. HOERLING, A.S. PHILLIPS and T. XU, 2004: Twentieth Century North Atlantic climate change. Part I: Assessing determinism. *Climate Dyn.*, 23, 371-389.

Intergovernmental Panel on Climate change (IPCC), 2007: *Climate Change 2007—The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M.C. Marquis, K.B. Avery, M. Tignor and H.L. Miller (Eds). Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 996 pp.

National Research Council [Consejo Nacional de Investigación], 2004: *Climate Data Records from Environmental Satellites: Interim Report*, National Academy Press, Washington, DC, USA. 105 pp.

National Research Council [Consejo Nacional de Investigación], 2007: *Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Decade and Beyond*. The National Academies Press, Washington, DC, USA.

SCHUBERT, S.D., M.J. SUÁREZ, P.J. REGION, R.D. KOSTER and J.T. BACMEISTER, 2004: Causes of long-term drought in the United States Great Plains. *J. Climate*, 17, 485-503.

SEAGER, R., Y. KUSHNIR, C. HERWEIJER, N. NAIK and J. VÉLEZ, 2005: Modeling of tropical forcing of persistent droughts and pluvials over western North America: 1856-2000. *J. Climate*, 18, 4065-4088.

SMITH, D.M., S. CUSACK, A.W. COLMAN, C.K. FOLLAND, G.R. HARRIS and J.M. MURPHY, 2007: Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model. *Science*, 317, 796-799.

TRENBERTH, K.E., T.R. KARL and T.W. SPENCE, 2002: The need for a systems approach to climate observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1593-1602.

TRENBERTH, K.E., B. MOORE, T.R. KARL and C. NOBRE, 2006: Monitoring and prediction of the Earth's climate: A future perspective. *J. Climate*, 19, 5001-5008.

TRENBERTH, K.E., P.D. JONES, P. AMBENJE, R. BOJARIU, D. EASTERLING, A. KLEIN TANK, D. PARKER, F. RAHIMZADEH, J.A. RENWICK, M. RUSTICUCCI, B. SODEN and P. ZHAI, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. En: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M.C. Marquis, K.B. Avery, M. Tignor and H.L. Miller (Eds)). Cambridge University Press. Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 235-336, más anexo en línea.