

¿Qué podemos predecir del cambio y la variabilidad



Por Antonio Busalacchi¹, David Legler², Howard Cattle³, Tim Palmer⁴ y John Gould⁵

Introducción

Los efectos de la variabilidad del clima y la amenaza del cambio climático futuro son en la actualidad temas clave sobre los que se reclama nuestra atención de manera casi diaria. Obtener un mejor conocimiento de la variabilidad, predictibilidad y el cambio del clima es un objetivo clave de la misión del proyecto de Variabilidad y Predictibilidad del Clima, CLIVAR, del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC). Las interacciones entre el océano y la atmósfera constituyen un centro de atención particular

del CLIVAR, que refleja el legado de dos proyectos anteriores del PMIC, el Programa sobre los Océanos Tropicales y la Atmósfera Mundial (TOGA) y el Experimento Mundial sobre la Circulación Oceánica (WOCE). Ciertamente, el CLIVAR representa ahora la vanguardia del PMIC en investigación del océano global, de sus interacciones con la atmósfera y de su papel clave en la variabilidad y el cambio del clima. La primera parte de este artículo resume brevemente el legado global del TOGA y del WOCE, a partir del cual ahora avanza el CLIVAR. En la segunda parte, resumimos algunas de las contribuciones fundamentales del CLIVAR desde su puesta en marcha, utilizando los resultados de la Primera Conferencia Científica Internacional del CLIVAR, celebrada en 2004.

El legado del TOGA y del WOCE

La década del TOGA (1985-1994) supuso, por primera vez, un esfuerzo internacional concertado en la observación y la predicción de una componente principal de la variabilidad del sistema acoplado del clima —El Niño-Oscilación Austral (ENOA)— y su efecto sobre la atmósfera mundial. Durante el TOGA, se dispuso de observaciones rutinarias en tiempo real de la interface entre el aire y el mar y de la estructura térmica superficial de las aguas en el Océano Pacífico tropical por medio de la serie de observación océano-atmósfera en los mares tropicales (TAO). Estas observaciones fijas se han mantenido desde entonces en el Pacífico (Figura 1) y, con el patrocinio del CLIVAR, se han ampliado al Atlántico y ahora al Océano Índico.



Al tiempo que se hicieron otras mejoras en los sistemas de observación de la atmósfera y el océano, críticos para la predicción del ENOA, se creaban y ponían en marcha modelos de predicción acoplados océano-atmósfera en muchos de los importantes centros de predicción del mundo. La asimilación de datos oceánicos demostró ser un elemento clave en la inicialización de los sistemas de predicción climática estacional a interanual. Por otra parte, el enfoque de conjunto sobre la ciencia del clima evolucionó durante el TOGA. Antes del mismo, entre principios y mediados de la década de 1980, los oceanógrafos y meteorólogos se solían encontrar en grupos separados y distintos. Como parte del TOGA, estas comunidades se unieron para formar una nueva raza de científicos del clima que se dedicó a explorar modos de variabilidad que se producen en el sistema acoplado entre el océano y la atmósfera y que no existen en el océano o la atmósfera por separado.

De manera similar, el WOCE (1982-2002) dejó una huella importante en nuestro conocimiento de los océanos mundiales y en nuestra capacidad para modelizarlos. Introdujo tecnología innovadora, e hizo cambios en nuestro método científico. El WOCE aportó una perspectiva global sobre la variabilidad temporal y el estado medio de los océanos mundiales, desde la superficie hasta el fondo. Creó una base

1 Director del Centro Interdisciplinar de Ciencias del Sistema Terrestre, de la Universidad de Maryland, en EE.UU.

2 Director de la Oficina de Proyecto CLIVAR en los EE.UU., Washington, EE.UU.

3 Director de la Oficina del Proyecto Internacional CLIVAR, Southampton, Reino Unido.

4 Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo, Reading, Reino Unido.

5 Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth, Hobart, Australia.

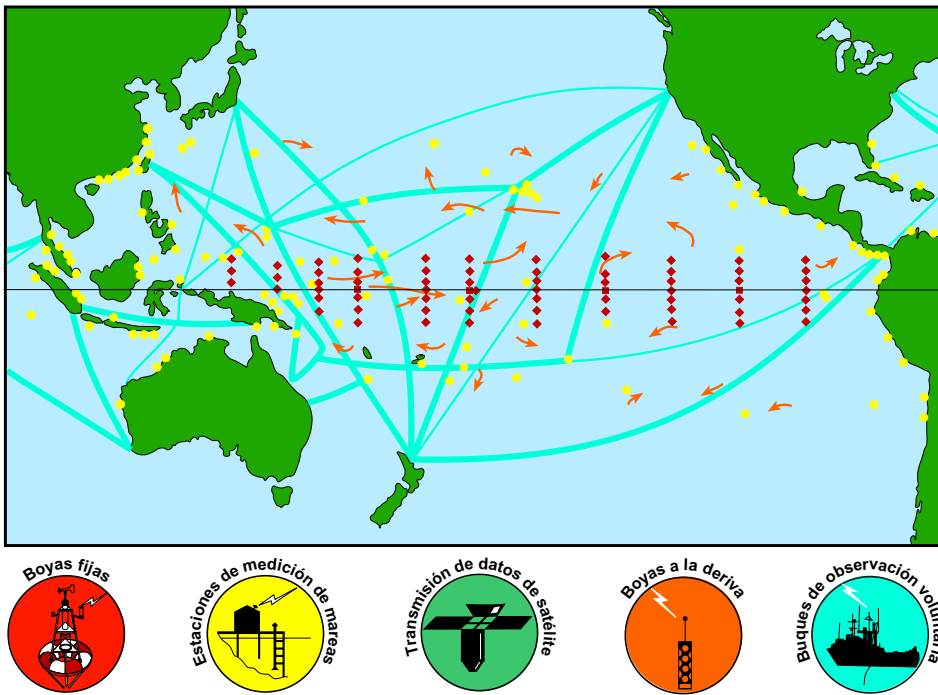


Figura 1 — Componentes in situ del sistema de observación de El Niño-Oscilación Austral

frente a la que evaluar los cambios pasados y futuros y los efectos antropogénicos sobre la circulación oceánica mundial, una actividad clave que se está desarrollando dentro del CLIVAR. En asociación con el Estudio Conjunto de los Flujos Oceánicos Mundiales (JGOFS), del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (PIGB), se realizó un estudio de dióxido de carbono (CO_2) y de trazadores químicos, lo que supuso el primer inventario exhaustivo de CO_2 en los océanos. Los estudios de procesos regionales y las campañas de observaciones mejoraron nuestro conocimiento del Océano Austral, de la formación de agua profunda en mares subpolares así como de la mezcla oceánica, de la circulación termohalina global y del transporte meridional de calor entre el ecuador y el polo.

Los avances en la tecnología oceánica han jugado un papel importante al permitir esta perspectiva verdaderamente mundial. Por ejemplo, los altímetros-radar de TOPEX/Poseidon y del ERS ofrecieron observaciones conti-

nuas de la altura de la superficie del mar sobre todo el mundo: un legado a partir del cual seguimos avanzando. Dentro del océano, los desarrollos en la tecnología de flotadores, impulsados por el WOCE, condujeron al despliegue de flotadores perfiladores que podían vigilar la temperatura y la salinidad del océano superior y suministrar campos de corrientes subsuperficiales a escala mundial. Estos flotadores fueron los precursores del programa mundial Argo, cuya especificación fue redactada por un Equipo Científico de Argo a finales de 1998 y dada a conocer en la conferencia OceanObs'99, copatrocinada por el CLIVAR (San Rafael, Francia, 18-22 de octubre de 1999). Se planificó que una serie de 3 000 flotadores Argo, cofinanciada por el CLIVAR y el Experimento Mundial de Asimilación de Datos Oceánicos (GODAE), utilizaría observaciones y modelos para estimar el estado de los océanos mundiales.

Los primeros flotadores Argo fueron desplegados en 2001. A principios de 2005, 1 650 flotadores suministrados

por dieciocho países ofrecían datos de los 2 km superiores del océano mundial (véase la Figura 2 y <http://www.argo.net>). Los centros operativos de análisis y predicción del clima ya utilizan los datos de manera rutinaria y contribuyen de manera importante a los conjuntos de datos oceánicos de alta calidad necesarios para la investigación del clima.

Puestos en marcha por el esfuerzo de modelización de la comunidad del WOCE y gracias a los avances en la capacidad de computación, los modelos oceánicos mundiales pueden resolver en la actualidad corrientes energéticas de frontera, los procesos de inestabilidad asociada, y el flujo entre cuencas oceánicas, y también ofrecen una descripción consistente desde el punto de vista dinámico de muchos aspectos observados de la circulación del océano. La capacidad para representar tales procesos oceánicos supone un paso esencial para lograr un mayor realismo en los modelos climáticos acoplados.

El WOCE también contribuyó al concepto del GODAE y a la esperanza en los esfuerzos de reanálisis del océano, que son análogos al concepto de reanálisis atmosférico emprendido en la actualidad en numerosos centros operativos. El WOCE cambió el modo en el que miramos al océano y la manera en la que trabajamos como comunidad oceanográfica. Ahora es posible una síntesis oceánica en la que se reúnen observaciones in situ y/o de teledetección con métodos inversos o metodologías de asimilación de datos. Por último, el WOCE dejó como legado su recogida sin precedentes de observaciones oceánicas publicada en DVD a tiempo para la Conferencia final del WOCE en San Antonio, Texas, en EE.UU. (18-22 de noviembre de 2002). Este año se publicarán atlas de las cuatro cuencas oceánicas principales basados en estos datos.

Alcance y perspectivas del CLIVAR

Hace casi cinco años, en noviembre de 1998, representantes de 63 países se reunieron en París y se comprometieron a incrementar nuestro conocimiento de las variaciones del clima y la capacidad de predecirlas, en escalas temporales de estaciones y más largas, a través del CLIVAR. Para poner de manifiesto los muchos avances en la ciencia del CLIVAR desde entonces así como para identificar los futuros desafíos de investigación, se celebró en 2004 la primera Conferencia Internacional de Ciencia del CLIVAR (<http://www.clivar2004.org>). Asistieron más de 640 científicos de 56 países distintos, la mayor conferencia del PMIC hasta la fecha. La conferencia se ocupó específicamente de numerosos temas importantes para los esfuerzos del CLIVAR: la predicción climatológica a corto plazo; los monzones; el desafío de la predicción decenal; el conocimiento de las variaciones del clima a largo plazo; el papel de los océanos en el clima; la influencia humana sobre el clima; las aplicaciones de la ciencia del CLIVAR; y los desafíos futuros del CLIVAR.

La predicción del clima a corto plazo sigue siendo un interés clave del

CLIVAR, como lo fue para el TOGA. Hay varios mecanismos que, a través de las respuestas a las anomalías en, y/o las interacciones con, la temperatura de la superficie del mar (TSM), el hielo marino, la humedad del suelo, la vegetación e incluso, tal vez, las interacciones entre la troposfera y la baja estratosfera, pueden dar lugar a variabilidad del clima en escalas temporales estacionales a interanuales. Aunque hemos aprendido mucho sobre estos mecanismos, es fundamental un conocimiento más completo para estimar la predictibilidad y para mejorar nuestras predicciones. A través de los avances aportados por el TOGA y ahora por el CLIVAR, el conjunto actual de modelos de predicción estacional a interanual ha demostrado amplias capacidades para predecir las temperaturas mundiales y la precipitación. El uso de conjuntos de multi-modelos (Figura 3) ha incrementado en gran medida las capacidades globales, pero la predicción de la variabilidad del clima con más antelación de unos pocos meses sigue constituyendo un desafío fundamental. Entre las razones para que esto sea así se incluyen el error del modelo y el crecimiento del error así como el papel de las condiciones iniciales y del forzamiento estocástico.

Es fundamental que se mantenga el sistema de observación y hay desafíos continuos para que la comunidad científica explote estas observaciones, dirija su ejecución, identifique nuevas y más rentables tecnologías y para que mantenga un papel activo como parte de la transición del sistema hacia la operatividad.

Los sistemas monzónicos en Asia, África y América tienen mucho en común, incluidos una fuerte estacionalidad, contrastes de las temperaturas del mar y la tierra e, incluso, la relación entre los monzones y las montañas. El contraste entre la predictibilidad basada en sistemas estadísticos/empíricos y la predictibilidad relativamente baja obtenida de los sistemas dinámicos sugiere que hay que conocer mejor el sistema acoplado entre el océano, la atmósfera y la tierra y que deberían reducirse los sesgos sistemáticos del modelo para mejorar las predicciones del monzón. Con el Experimento Mundial sobre la Energía y el Ciclo Hídrico (GEWEX) del PMIC, el CLIVAR lidera las investigaciones multinacionales sobre acoplamiento entre la tierra, el océano y la atmósfera, como pone de manifiesto el ciclo diurno y el chorro en niveles bajos de los siste-

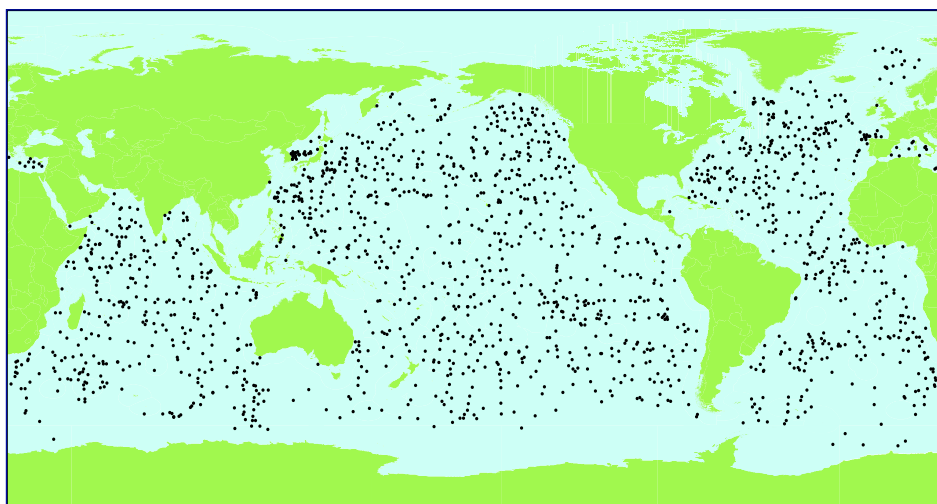


Figura 2 — Despliegue de flotadores Argo (izquierda); y el conjunto de flotadores Argo en enero de 2005 (a la derecha). Unos 1 600 flotadores ofrecen una configuración dispersa sobre los océanos libres de hielo en los 2 000 m superiores de profundidad. El conjunto sigue creciendo para lograr el objetivo de 3 000 flotadores.

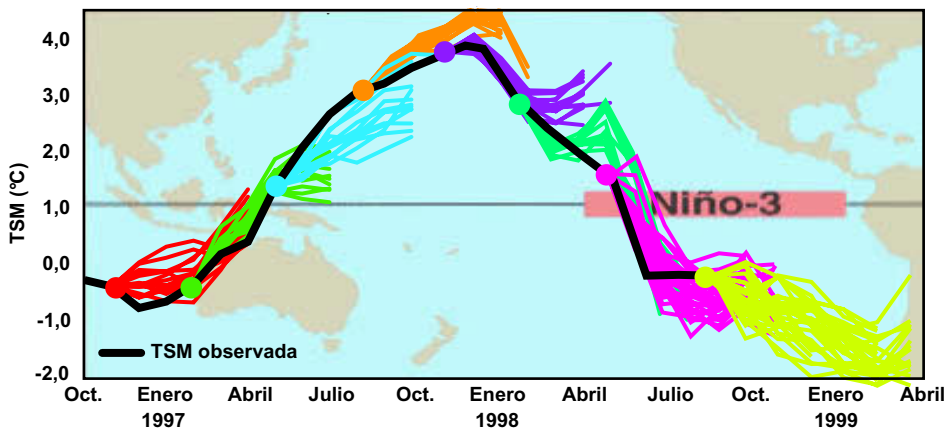


Figura 3 — Las predicciones del ENOA, como las que se muestran aquí para el episodio de 1997-1998, han sido posibles a través de esfuerzos intensivos de investigación en el campo de las predicciones estacionales. Los distintos colores representan múltiples pasadas del modelo (predicciones) iniciadas en distintos momentos del año. (Cortesía del CEPMMMP)

das sobre la implicación de cada uno. Por lo tanto, el nivel de predictibilidad sigue siendo incierto. Las observaciones ayudan a vigilar mecanismos importantes. Por ejemplo, en el Atlántico hay un esfuerzo multinacional para vigilar partes de la circulación de retorno meridional. Podría aprenderse mucho a través de diagnósticos más completos que lleven a predicciones inmediatas del estado actual de las variaciones decenales y amplíen los esfuerzos actuales para predecir las Oscilaciones Decenales del Pacífico y del Atlántico Norte.

El océano tiene un efecto muy directo sobre el clima a través de los cambios

mas de monzón americano (Figura 4) y los estudios del sistema del monzón asiático-australiano. Además, un nuevo esfuerzo, el experimento de Análisis Multidisciplinar del Monzón Africano ofrecerá contribuciones críticas que podrían mejorar nuestro conocimiento del monzón africano y su efecto sobre la vida en el oeste de África.

La predicción de la variabilidad decenal requiere una mayor perspectiva global. El limitado número de datos de observaciones históricas (sobre todo en el océano) significa que los modelos tienen que jugar un papel todavía más importante en el conocimiento de la variabilidad decenal y en la identificación de la predictibilidad potencial. Los modelos pueden sugerir mecanismos, esquemas de pruebas de diagnóstico, realizar experimentos y simular predicciones. Identificar los mecanismos subyacentes que son fundamentales para la "memoria" del sistema climático es el primer paso crítico para caracterizar los límites de predictibilidad. En el Pacífico, por ejemplo, al menos tres mecanismos (variaciones intrínsecas de la atmósfera, variaciones del ENOA, variaciones de la TSM y los meandros de Kuroshio) contribuyen a la variabilidad decenal, pero hay teorías enfrenta-

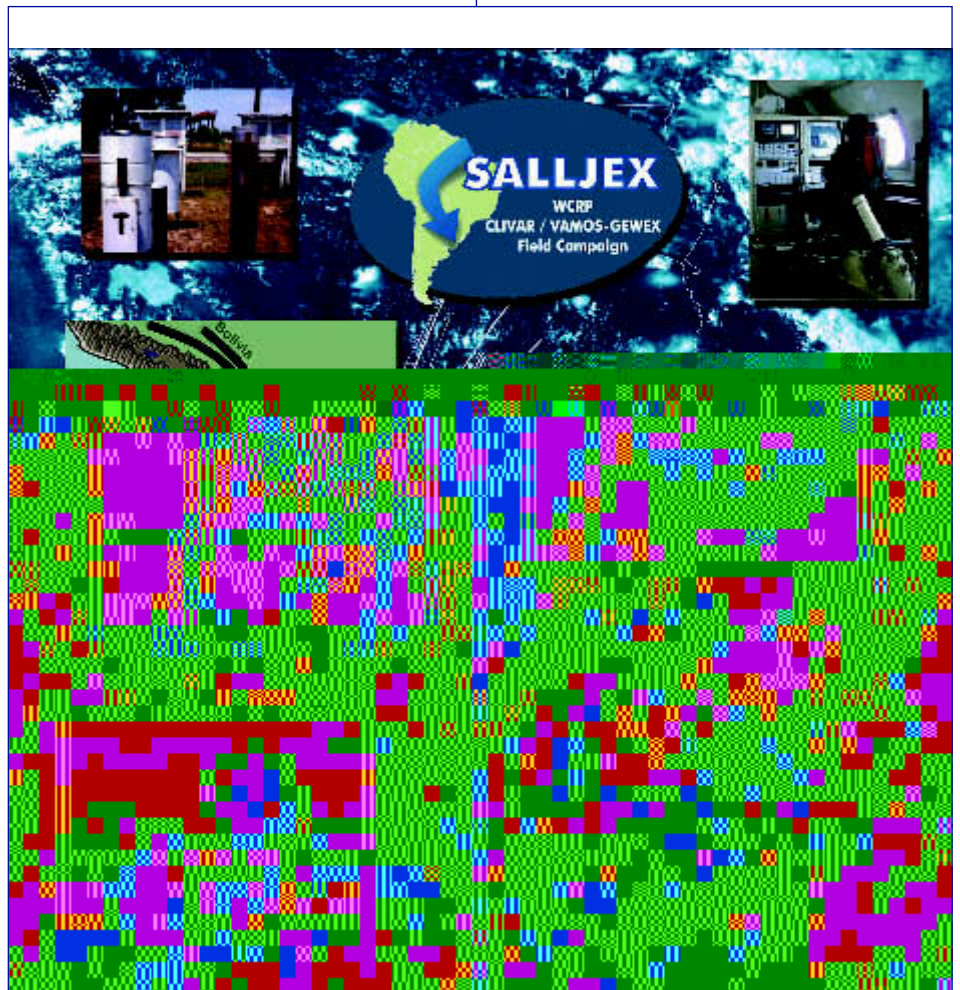


Figura 4 — El Experimento de Chorro a Niveles Bajos en Sudamérica, la primera campaña internacional del CLIVAR en Sudamérica

en la TSM y la presión parcial del CO₂ (y de otros gases). Los cambios futuros en el nivel del mar son una cuestión fundamental desde una perspectiva del cambio climático. Están influidos no sólo por factores como la expansión térmica y la fusión de los glaciares y de los casquetes de hielo sino también por los procesos de transporte y mezcla oceánicos, algunos de los cuales son regionalmente intensos y a menudo están simulados de manera pobre y con observaciones escasas. Todavía estamos ante el desafío de cómo representar correctamente los remolinos en nuestros modelos; cómo tener en cuenta el acoplamiento de la atmósfera y el océano en escalas menores; y cómo predecir mejor la TSM anómala. Los océanos tropicales son fundamentales para el clima ya que redistribuyen grandes cantidades de calor y de agua dulce, que a menudo se manifiestan como anomalías de la TSM y de la salinidad en un tiempo posterior y, con frecuencia, en un lugar distinto.

En escalas de tiempo mayores, las relaciones entre los océanos tropicales y extratropicales se vuelven más importantes (por ejemplo, la variabilidad decenal del ENOA). La disminución cada varias décadas de la salinidad en el Atlántico Norte puede ser un indicio de un cambio en la circulación de retorno mundial o de una aceleración del ciclo hidrológico mundial. Evidencias con modelos sugieren alguna relación con el forzamiento atmosférico polar, pero estos modelos resuelven los procesos oceánicos importantes sólo de manera burda, lo que dificulta el poder ofrecer una respuesta. Además del cambio hidrográfico de las propiedades del agua, las circulaciones del océano pueden estar variando (como sugieren las observaciones in situ y de altimetría), lo que podría intensificar el aumento del nivel del mar en el ámbito regional.

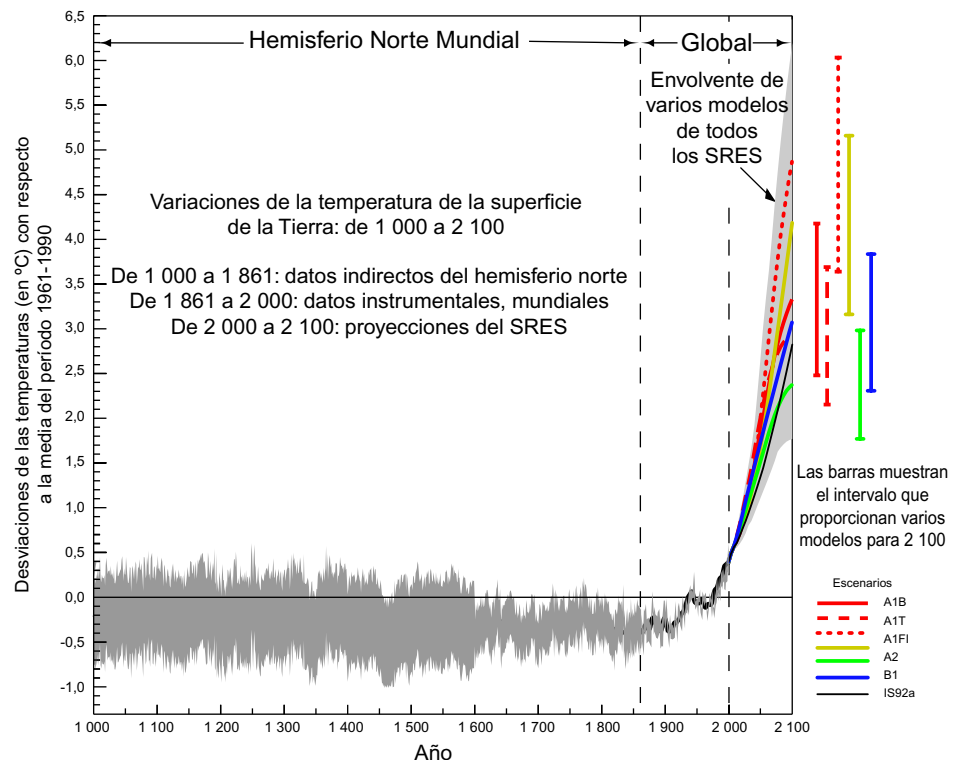


Figura 5 — Temperatura del aire superficial en los 1 000 últimos años y proyecciones futuras (según el IPCC, 2001)

Estos cambios podrían tener efectos mundiales sobre la temperatura del océano, tasas de mezcla y los ritmos de absorción del CO₂. La caracterización de la distribución y de las variaciones temporales de la salinidad es crítica tanto para los océanos extratropicales como para los tropicales. Se necesitan mejores diagnósticos de la circulación termohalina mundial. El Océano Austral también es importante en el contexto del clima mundial. Relaciona las ramas superiores e inferiores de la circulación mundial de retorno, almacena el 60 por ciento del carbono antropogénico total, puede tener un modo anular, ha sido relacionado con el ENOA y es probable que sea sensible a las variaciones mundiales del clima.

Los registros paleoclimáticos son críticos para explorar las variaciones del clima a escalas temporales más largas, es decir, escalas temporales

de siglos y superiores. Al comparar las reconstrucciones múltiples basadas en datos indirectos paleológicos, resulta fundamental emplear una escala y una calibración adecuadas. Muchas de las diferencias entre las reconstrucciones pueden atribuirse a las calibraciones que suelen basarse en datos de distintas estaciones y regiones. Sin embargo, el calentamiento observado a finales del siglo xx es anómalo al compararlo con las reconstrucciones indirectas y con los modelos (a lo largo de los 2 000 últimos años).

La fusión recientemente incrementada de la Capa de Hielo de Groenlandia no tiene antecedentes (según los registros paleológicos) pero, si se cumplen los cambios de temperatura previstos con las mayores concentraciones de gases de efecto invernadero, el aumento del nivel del mar podría ser más rápido de lo esperado. Por

último, los modelos paleoclimáticos han mejorado y pueden ofrecer algunos conocimientos nuevos adicionales a las variaciones del clima (p. ej., el ENOA) y a la manera en que pueden haber cambiado sus forzamientos y su evolución.

Hay muchos desafíos científicos relacionados con la influencia humana sobre el clima, incluidas las relaciones entre las variaciones naturales del clima y los cambios inducidos antropogénicamente. El CLIVAR ofrece aportaciones al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y le ayuda a enfrentarse a estos desafíos mediante el fomento de esfuerzos en predicción y detección del cambio climático. De esta forma, los Equipos de Procesos Climáticos del CLIVAR de EE.UU., que están atrayendo participación internacional, se dedican a importantes zonas de incertidumbre en los modelos de familias de escenarios IPCC, mientras que el CLIVAR ayuda a liderar los esfuerzos para evaluar las integraciones de modelos para el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4), con un importante seminario en marzo de 2005.

La detección del cambio antropogénico depende de una rigurosa evaluación de los datos observados y simulados para ofrecer estimaciones de los cambios en parámetros climatológicos clave (Figura 5), incluidos valores extremos. Para calificar completamente cualquier cambio detectado, debemos tener en cuenta todas las incertidumbres, y también ser conscientes de los forzamientos que faltan o son inciertos. A pesar de la creciente similitud de las sensibilidades de los modelos, los cambios climáticos predichos suelen ser muy distintos de un modelo a otro. Los cambios futuros predichos también son sensibles (a menudo más que la envolvente de la variabilidad natural) a las parametrizaciones, lo que demuestra la necesidad de



La ciencia del CLIVAR se utiliza en distintas aplicaciones sobre varios sectores económicos, tales como las pesquerías. (Fotografía: FAO/I. De Borhegyi)

seguir mejorándolos a través del uso de diagnósticos y análisis más discriminatorios de las diferencias entre los modelos y las observaciones.

La ciencia del CLIVAR se utiliza para distintas aplicaciones. Para África, las predicciones climatológicas estacionales se utilizan para desarrollar un sistema de alerta temprana frente a la malaria y la meningitis. Las predicciones avanzadas de una serie de variables como la precipitación (incluyendo los totales, las fechas de inicio y de fin) y de condiciones medioambientales (p. ej., el polvo y la humedad) son un primer paso necesario, pero los sistemas de predicción tienen dificultad para obtener pronósticos de estas variables y las observaciones de validación y de control suelen ser inadecuadas. Las historias largas de análisis de predicciones a posteriori son útiles para demostrar el valor de las predicciones estacionales y han llevado a un mayor uso operativo de las mismas. El

CLIVAR y el GEWEX están trabajando juntos para mejorar la simulación y las predicciones de los monzones y las predicciones intraestacionales a interanuales, las cuales son valiosas para los gestores de recursos hídricos. Las predicciones estacionales han demostrado ser útiles para la gestión de la energía hidroeléctrica. Algunas de las aplicaciones más significativas de la ciencia del CLIVAR se han dado en la agricultura.

Los estudios sobre la adaptación y la utilización de las predicciones climatológicas de, por ejemplo, el proyecto Predicción del Clima y Agricultura (CLIMAG), del Sistema de Análisis, Investigación y Capacitación (START) sobre el Cambio Global, y de otros, han sido muy valiosos. Es importante desarrollar asesoramiento específico para cada región; implicar pronto a los agricultores y hacerles que prueben las estrategias recomendadas; y, por último, comunicar los factores de riesgo para evitar pérdidas desastrosas.

Los efectos de la variabilidad del clima pueden identificarse



sobre distintas especies de pescado y en muchas escalas temporales distintas (de la estacional a la multidecenal). Entre los factores que influyen en los cambios de las reservas de peces se incluyen la temperatura, los cambios de circulación y las interacciones tróficas. Modelos recientes pueden ofrecer simulaciones a escala planetaria de algunas componentes biológicas importantes de los ecosistemas. Por lo tanto, ahora deberíamos probar las hipótesis y los mecanismos que vinculan el forzamiento físico y los procesos biológicos introduciendo mecanismos biológicos sencillos en modelos existentes que simulen interacciones críticas entre el océano y la atmósfera.

Desafíos futuros

Hay muchos y evidentes desafíos futuros para el CLIVAR. Sigue existiendo la necesidad de esfuerzos más exhaustivos y coordinados para identificar y tratar las deficiencias de los modelos. Los sistemas de observación que utilizamos para fines climatológicos siguen desarrollándose (algunas partes de manera más lenta que otras) pero varias componentes (sobre todo para el océano) siguen siendo responsabilidad del colectivo de investigadores. Como tal, el CLIVAR debe garantizar que evolucionan para satisfacer sus necesidades y que las componentes maduras se transfieren cuidadosamente al estado operativo. La mezcla de observaciones y de modelos en un marco asimilativo ha hecho que se represente de manera más completa el sistema climático. Necesitamos más

capacidades en este área y un incremento de las actividades para mejorar detalles como las características del error del modelo y de la observación a fin de poder utilizar tales herramientas para el diseño de mejores sistemas de observación y de predicción.

Las capacidades de predicción tienen que seguir centrándose en la validación (aprovechándose incluso más del sistema de observación en evolución) y en el uso de nuevos resultados científicos. En particular, el análisis de diagnóstico de series de datos mundiales dentro de un ámbito regional presenta una oportunidad para desarrollar más las relaciones entre la ciencia del CLIVAR a escala mundial y en el ámbito regional, una estrategia que está siguiendo el CLIVAR.

En el caso del cambio climático, dicho análisis irá al núcleo de lo que se ha visto a menudo como la esencia de la perspectiva única del CLIVAR sobre el cambio climático: el análisis de cómo puede influir el forzamiento antropogénico en los esquemas naturales de la variabilidad del clima. Por ejemplo, ¿hasta qué punto puede comprenderse el forzamiento antropogénico del cambio climático sobre el monzón asiático en términos de la frecuencia de aparición de los principales esquemas de variabilidad intraestacional e interanual de la actividad del monzón? De manera similar, ¿cómo se ve influenciado el modo decenal asociado a la sequía del Sahel por el forzamiento antropogénico? ¿Hasta qué punto describen de manera satisfactoria los modelos

utilizados en el AR4 del IPCC las dinámicas acopladas del ENOA y cómo se verá influenciada la frecuencia del ENOA por el forzamiento antropogénico?

Además, para la predicción de la variabilidad en una escala temporal más larga (p. ej., decenal), se necesitan diagnósticos numéricos y experimentación más sistemáticos, a la vez que también desarrollamos las predicciones inmediatas y exploramos predicciones experimentales de índices importantes. El océano sigue siendo un centro de atención importante del CLIVAR. Debemos explotar completamente el sistema de observación en desarrollo y presionar con mejores modelos y sistemas acoplados para caracterizar de una manera más completa los cambios en la circulación del océano, los procesos críticos para el clima, lo que resulta intransitivo para el océano, los cambios en la absorción del carbono y el nivel del mar. Las diferencias en las retroalimentaciones de los modelos en las integraciones del cambio climático son un importante factor limitador al desarrollar mejores modelos climáticos acoplados. Hay que tratar la fidelidad de los procesos clave que originan estas diferencias. Por último, aunque es gratificante observar las muchas aplicaciones de la investigación del CLIVAR, parece que integrar las predicciones del clima en los sistemas de toma de decisiones constituye un factor clave para tener más éxito en este área.