

polar, incluyendo la variabilidad del ciclo hidrológico ártico

por B. Goodison¹, J. Brown², K. Jezek³, J. Key⁴, T. Prowse⁵, A. Snorrason⁶ y T. Worby⁷

Introducción

La criosfera, en su conjunto, describe los elementos del sistema terrestre que contienen agua en estado de congelación, y que abarca fenómenos como el hielo de mares, lagos y ríos, la cubierta de nieve, las precipitaciones sólidas, los glaciares, los casquetes glaciares, los mantos de hielo, el permafrost y el suelo helado de manera estacional. La presencia de agua congelada en la atmósfera, en el suelo terrestre y en la superficie de los océanos afecta a los flujos de energía, humedad, gas y partículas, así como a las nubes, la precipitación, las condiciones hidrológicas y a la circulación atmosférica y oceánica. La criosfera es inseparable del sistema polar de agua dulce en tierra, hielo y en el mar.

La criosfera, sus cambios y sus impactos no solo son objeto de cada vez más análisis por parte de la comunidad científica, sino que actualmente gozan de una cobertura constante por parte de los medios de comunicación, creando una demanda sin precedentes de datos e información sobre los cambios pasados, presentes y futuros de nuestros recursos de nieve y hielo. El índice de reducción de muchas masas de nieve y hielo durante la última década sigue aumentando (Lemke y otros, 2007). Cabe

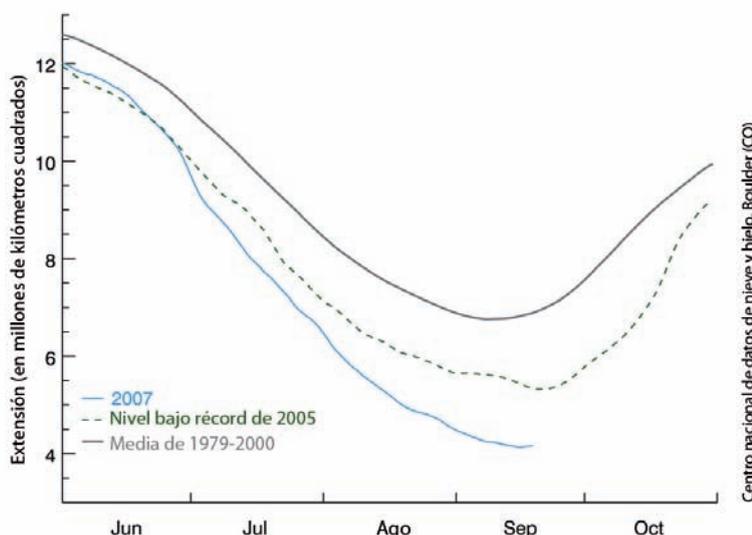


Figura 1 – Extensión del hielo marino en el Ártico durante la estación de fusión veraniega (área de océano con al menos un 15 por ciento de hielo marino)

esperar que la pérdida de la cubierta de hielo afecte al sistema de agua dulce de la región ártica y al balance energético de la superficie, y podría manifestarse en las latitudes medias modificando los patrones de circulación atmosférica y de precipitación (Serreze y otros, 2007). Más recientemente, la reducción del hielo ártico estableció un nuevo mínimo histórico en agosto de 2007, con una reducción progresiva de su extensión hasta mediados de septiembre de 2007 (Figura 1), captando la atención de los gestores políticos, en la medida que las perspectivas de nuevas rutas marítimas

transárticas aparecen en un horizonte próximo. Se antoja fundamental conocer de forma adecuada la criosfera para las aplicaciones científicas polares y mundiales, incluyendo la predicción del tiempo y del clima, además de la evaluación y predicción de la subida del nivel del mar, la disponibilidad de recursos de agua dulce, la navegación, el transporte, la pesca, la exploración y explotación de recursos minerales y la construcción en regiones de clima frío. Hasta el momento, podría decirse que la criosfera es el campo menos investigado del sistema climático. El momento elegido para observar y aumentar nuestro conocimiento acerca del rápido cambio que está teniendo lugar en nuestras regiones polares, en el marco del API 2007-2008, no ha podido ser más adecuado. Actualmente se están desarrollando los proyectos del API relacionados con la criosfera. A continuación se exponen los planes y se repasan los progresos de algunas de las iniciativas del API encaminadas a conocer mejor la criosfera y sus correspondientes componentes hidrológicos.

1 Presidente del GDC del PMIC/ClC y Responsable científico del API, Environment Canada, Ottawa (Canadá). barry.goodison@ec.gc.ca
 2 Presidente de la Asociación Internacional del Permafrost, P.O. Box 7, Woods Hole MA 02543, EEUU. jerrybrown@igc.org
 3 Centro de Investigación Polar, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad del Estado de Ohio, Columbia, Ohio (EEUU). jezek.1@osu.edu
 4 NOAA/NESDIS, 1225 West Dayton St., Madison, WI 53706, EEUU. jkey@ssec.wisc.edu
 5 Científico investigador, Environment Canada y Universidad de Victoria, Victoria (Canadá). terry.prowse@ec.gc.ca
 6 Servicio Hidrológico, Autoridad Nacional de la Energía, Grensasvegur 9, IS-108, Reikiavik (Islandia). asn@os.is
 7 Científico investigador superior, División antártica australiana, Hobart (Australia). A.Worby@utas.edu.au

Presente y futuro de la criosfera

El programa "Presente y futuro de la criosfera" (API 105) ofrece un marco para comprender el estado de la criosfera y su correspondiente variabilidad y cambio espaciotemporal en el pasado, en el presente y en el futuro. El objetivo pasa por documentar no solo los cambios que afectan a la criosfera global, sino también hacer hincapié en los diferentes impactos de estos cambios a la hora de comprender el entorno polar en términos de sus interacciones físicas y biogeoquímicas con los sistemas oceánico, atmosférico y terrestre, así como los efectos sobre los sistemas sociales, culturales y económicos, y las interacciones con ellos. Este programa permitirá:

- estimar el estado actual de los parámetros de la criosfera en las regiones de latitudes elevadas, proporcionando una fotografía instantánea de la criosfera y una evaluación de su estado actual (API) en el contexto de las situaciones experimentadas en el pasado y de las perspectivas para el futuro;
- formular las necesidades de observación de las variables criosféricas con vistas a la predicción y vigilancia del tiempo, el clima y los recursos hídricos, así como para llevar a cabo otras evaluaciones medioambientales (Tema relativo a la criosfera de la Estrategia integrada de observación mundial (IGOS-Cryo));
- fortalecer la cooperación internacional en el desarrollo de sistemas de observación de la criosfera.

Los resultados de numerosos estudios relacionados con el API y de otros de carácter científico que se están llevando a cabo posibilitarán realizar una evaluación global cuantitativa del estado actual de los parámetros criosféricos e hidrológicos afines. En la web http://cliv.npolar.no/reports/archive/ipy_fnd_proj_cipo_22May07.xls pueden encontrarse los proyectos árticos y bipolares creados con motivo del API, que están relacionados con el clima, incluidos los vinculados a la criosfera y la hidrología.

El sistema de observación de la criosfera: legado del API 2007-2008

El Año Polar Internacional 2007-2008 ofrece una oportunidad única para desarrollar sistemas de observación polar y, en consecuencia, para llenar uno de los vacíos más importantes de las observaciones a nivel mundial. Un objetivo fundamental del proyecto "Presente y futuro de la criosfera" ha conseguido un notable éxito: el Tema relativo a la criosfera de la Estrategia integrada de observación mundial (IGOS-Cryo). Uno de los objetivos a corto plazo del proyecto "Clima y la Criosfera" (CliC) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) está dirigido a ayudar a garantizar que el API no sea tan solo algo pasajero, sino que exista un legado de infraestructuras, sistemas de observación y gestión de datos que permanezca tras el API.

El CliC y diversos socios, incluyendo el copatrocinador, el Comité Científico de Investigaciones Antárticas (CCIA), están desarrollando el marco conceptual del CryOS (Figura 2), un robusto sistema de observación sostenida de la criosfera y un elemento fundamental del futuro sistema de observación multidisciplinar. En el recién aprobado Informe IGOS-Criosfera (<http://igos-cryosphere.org>) se documentan las actuales capacidades de observación, los requisitos para llevarlas a cabo, y los productos y recomendaciones al más alto nivel que se necesitan para emprender acciones que desarrollen de forma adicional el sistema CryOS.

La fase inicial de desarrollo del sistema CryOS coincide con el API. La idea es la de ocuparse de los proyectos del API pertinentes e incrementar la coordinación entre ellos con el objetivo de obtener conjuntos de datos que sirvan como legado, además de la capacidad de ampliar estos conjuntos de forma continua tras la finalización del API. Un Tema dedicado a toda la criosfera dentro de la estrategia IGOS proporciona economías de escala y garantiza que la criosfera sea tratada adecuadamente por los sistemas de observación que apoyan las labores de investigación y las operaciones de tipo climático, meteorológico y medioambiental. Las

recomendaciones específicas para cada elemento criosférico (como, por ejemplo, la nieve terrestre, los mantos de hielo o el permafrost) se ofrecen en los capítulos individuales de este informe. De cara al corto, medio y largo plazo se facilitan recomendaciones generales. Existen numerosas recomendaciones a corto plazo para llevar a cabo durante el API, dos de cuyos ejemplos son:

- garantizar una planificación coordinada entre las distintas instituciones con el fin de esbozar la imagen polar del API, y alcanzar una mejor continuidad en los productos polares del más alto nivel basados en datos obtenidos por los satélites existentes, para elaborar el conjunto de datos que sirva de legado del API;
- complementar las escasas y esporádicas redes básicas de observación in situ de la precipitación, el equivalente en agua de la nieve, las temperaturas en perforaciones de permafrost, las propiedades de los núcleos de los mantos de hielo, el balance de masas con boyas de seguimiento meteorológico, oceánico y de hielo, y los glaciares de montaña; y planificar la selección y el aumento de, al menos, 15 "grandes localizaciones" de vigilancia integrada con series de medidas criosféricas relevantes (por ejemplo, ampliando el número de emplazamientos existentes del Período mejorado de observaciones coordinadas (CEOP) y/o de la Red Terrestre Mundial (RTM)).

Si se adoptan las recomendaciones, se garantizará, por un lado, que los conjuntos de datos que queden como legado del API estarán disponibles como referencia para estimar la variabilidad y el cambio del clima en el futuro; por otro lado, que se refuerzan las redes de observación in situ más importantes y se planifican programas de seguimiento de los sensores a bordo de vehículos espaciales (por ejemplo, los sistemas pasivos generadores de imágenes por microondas); y, por último, que los innovadores sistemas de gestión de datos proporcionan servicios de datos y de sistemas de información geográfica, a la comunidad científica, a los gestores políticos y al gran público. Los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacio-

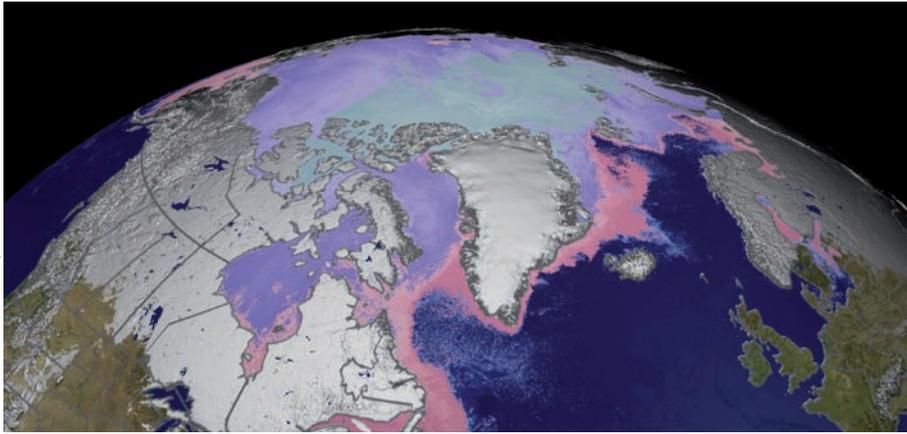


Figura 2 – La perspectiva del CryOS ofrece la posibilidad de trazar una imagen completa de los componentes de la criosfera durante los próximos 10-15 años. Esta imagen de satélite (espectrorradiómetro de imágenes con resolución moderada) de la cubierta de nieve, la temperatura del hielo marino, los glaciares y los mantos de hielo en la región ártica ilustra la diversidad de la criosfera.

nales y las agencias espaciales deben desempeñar un papel de liderazgo en lo que respecta a estas recomendaciones, con el fin de que estas sean puestas en práctica.

Año mundial interagencias de las fotografías polares en el seno del API (GIIPSY)

Los datos de satélite resultan fundamentales en la obtención de nuevos productos criosféricos para las latitudes elevadas, puesto que los datos in situ son escasos o inexistentes en estas regiones remotas. Los primeros logros del sistema CryOS se sitúan en el ámbito de la coordinación de las observaciones por satélite de la criosfera. Un proyecto denominado "Año mundial interagencias de las fotografías polares en el seno del API" (GIIPSY) (API 91) tiene como meta la obtención de fotografías de amplio espectro y alta resolución de las regiones polares durante el período 2007-2008.

El objetivo principal es emplear estas imágenes como indicadores para comparar los cambios medioambientales pasados y futuros en lo que respecta al hielo, el océano y la superficie de las regiones polares. En el marco del espíritu del Año Geofísico Internacional (AGI), la meta es la de afianzar estos conjuntos de datos como nuestro legado particular para la nueva generación de científicos polares. El objetivo programático es identificar formas de

emplear los recursos de la totalidad de los países implicados en la carrera espacial, de tal manera que puedan conseguirse nuestros fines científicos sin que esto suponga una carga para cualquier organización en concreto. Puede encontrarse una descripción general del programa GIIPSY, incluyendo los objetivos relacionados con la observación, en la página web <http://www-bprc.mps.ohio-state.edu/rsl/GIIPSY/>. En la Figura 3 se muestran los sistemas disponibles para estudios criosféricos. El programa GIIPSY generará una serie de conjuntos de datos sin precedentes, contribuyendo de esta manera al desarrollo de estudios relativos al ascenso del nivel del mar, el clima hemisférico, la circulación oceánica y las interacciones entre el aire y el mar en las regiones polares, el clima regional, la precipitación y la hidrología en las regiones polares, el permafrost y los ecosistemas acuáticos en la región ártica, el transporte y los riesgos. Sin duda alguna, el CryOS está considerado como "un éxito prematuro" del API.

Arctic Hydra: un nuevo estudio integrado del ciclo hidrológico de la región ártica

El sistema criosférico es inseparable del sistema de agua dulce. La temperatura, la salinidad, el hielo marino y la circulación del Océano Ártico dependen en gran medida de la afluencia de agua dulce. A la hora de valorar la con-

cordancia de los modelos climáticos en el cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC AR4), Waliser (2007) puso de manifiesto que existe una buena concordancia de los modelos en aquellos lugares donde se cuenta con una sólida base de observación y no hay ambigüedad física en las magnitudes. Los componentes vinculados al agua congelada suelen llevarse la peor parte en lo que respecta a la concordancia, mientras que los flujos por lo general muestran una mejor concordancia que los embalses. Recientemente se ha informado de estimaciones de almacenamiento y flujo del ciclo hidrológico a lo largo del Ártico, sintetizando las estimaciones contenidas en la literatura existente e introduciendo los resultados en modelos (Serreze y otros, 2006). A través de sus sistemas integrados de vigilancia, entre los que se incluyen estaciones hidrográficas integradas, el programa Arctic-HYDRA del API ayudará a establecer un nuevo nivel de coherencia nunca antes conseguido en la información de referencia a partir de la cual pueden esbozarse estas síntesis.

El Arctic-HYDRA (API 104) es un estudio internacional basado en un sistema de consorcio, y cuyo objetivo es ofrecer una imagen cuantitativa del estado del sistema hidrológico panártico (Figura 4) durante la campaña del API. Los principales objetivos del proyecto son:

- Caracterizar la variabilidad en el ciclo hidrológico ártico (CHA) y examinar los vínculos existentes entre el forzamiento atmosférico y la descarga continental al océano.
- Evaluar la reacción histórica del Océano Ártico a las variaciones en la entrada de agua dulce procedente de ríos y precipitaciones netas sobre el océano.
- Atribuir las fuentes de variabilidad espaciotemporal observada en el sistema tierra-océano-hielo-atmósfera a elementos específicos del CHA o a un forzamiento externo.
- Detectar cambios emergentes en el estado actual del CHA en tiempo casi real y situar esos cambios en un contexto histórico más amplio.

Misiones polares de satélite

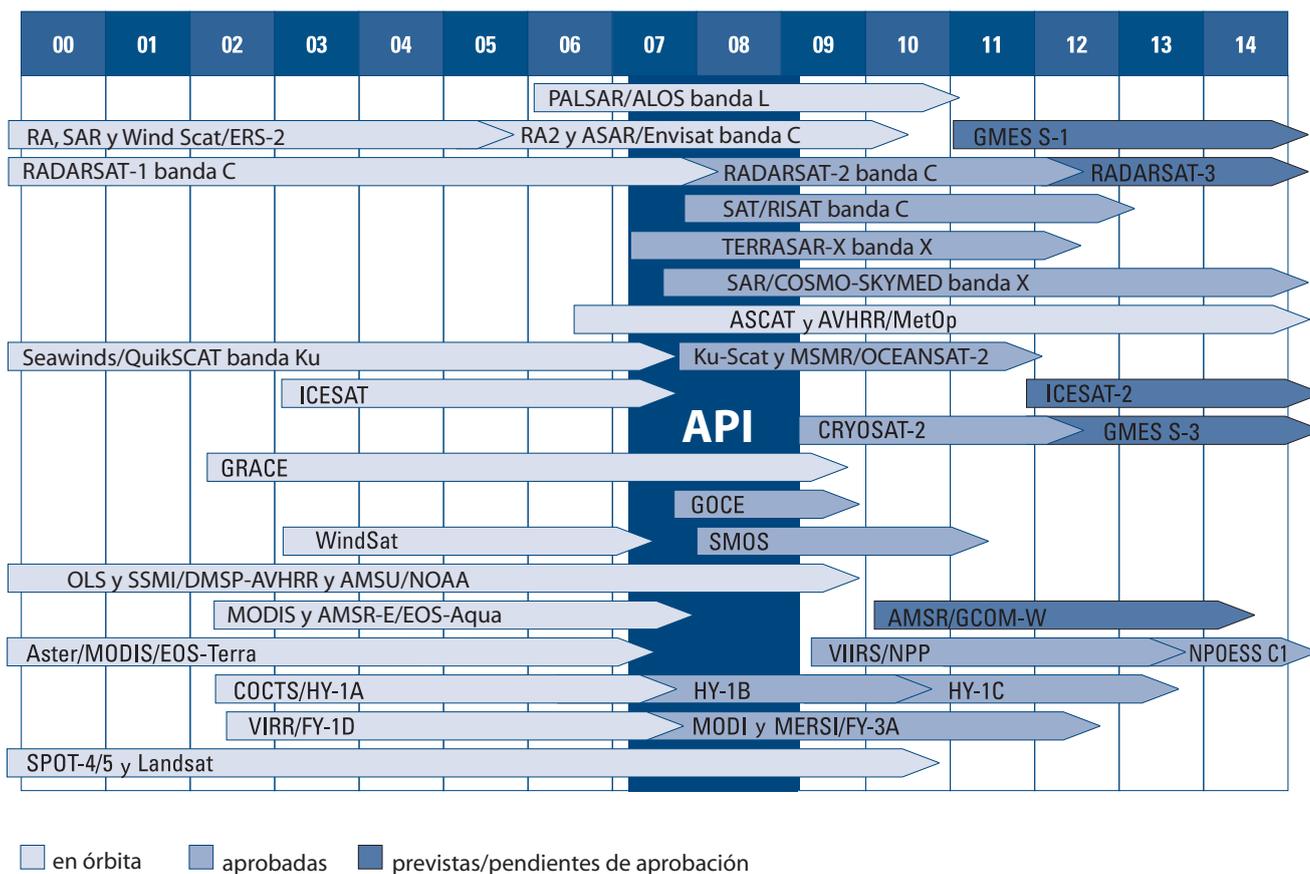


Figura 3 — Cronograma de las misiones criosféricas de satélite.

Dado el alcance de estos objetivos y el marco temporal relativamente pequeño del API, el programa Arctic-HYDRA también forma parte de los objetivos paralelos a más largo plazo (de 10 a 15 años) del proyecto correspondiente al Grupo de trabajo 7 de la Conferencia internacional sobre planificación de la investigación ártica (ICARP): Procesos y sistemas criosféricos e hidrológicos terrestres.

Canadá cuenta con un nivel de actividad en el API que supondrá una importante contribución al proyecto Arctic-HYDRA. Un componente fundamental es la investigación y predicción del flujo de agua dulce, en aras de cuantificar los procesos y parámetros más importantes de tipo hidrológico y de regiones frías que afectan al flujo de agua dulce hacia el Océano Ártico, así como validar y mejorar el acoplamiento de los modelos hidrológicos y de tierra-superficie a fin de predecir la intensidad y dirección del flujo de agua dulce hacia el Océano Ártico y proporcionar así una evaluación más completa de la hidroclimatología de la región ártica canadiense. Este compo-

nente, a su vez, se encuentra relacionado con los ecosistemas acuáticos a través de las iniciativas de investigación y predicción del flujo de nutrientes, con la hidroecología e integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y con la vigilancia basada en las comunidades, ofreciendo así una perspectiva integrada de los sistemas acuáticos septentrionales de agua dulce.

Con el fin de optimizar las sinergias existentes entre los componentes hidrológicos y ecológicos, y para añadir infraestructura adicional a la establecida para los programas de investigación existentes, la región de Mackenzie fue seleccionada como el emplazamiento de "gran lugar" para llevar a cabo el trabajo de campo experimental más intensivo basado en procesos y las tareas de recopilación de datos. Además, se podrá disponer de datos procedentes de nueve estaciones árticas nuevas a través del *Water Survey* de Canadá. Estos estudios contribuirán a mejorar las simulaciones climáticas a escala regional y en el seno de los sistemas de predicción numérica del tiempo. Estos resultados

se extenderán más allá del alcance del API, y proporcionarán la base de cara a futuros estudios en estas regiones septentrionales.

La planificación e implantación del programa Arctic-HYDRA, y de los numerosos estudios del API que están implicados

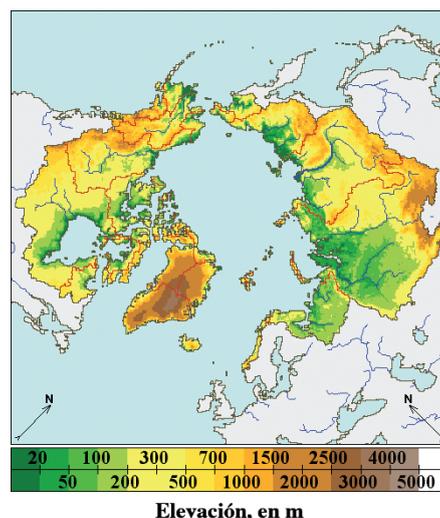


Figura 4 — El programa Arctic-HYDRA impulsará una perspectiva completamente panártica de cara a sus estudios hídricos durante el API.

Arctic-RIMS, <http://rims.unh.edu/>

en el trabajo de campo y en los estudios de simulación, necesitan aportaciones provenientes de estos estudios regionales, y se beneficiarán de la experiencia adquirida en proyectos similares llevados a cabo durante el período previo al API, como por ejemplo el Estudio nórdico sobre clima y energía (<http://www.os.is/ce/>).

Contribuciones criosféricas terrestres a nivel nacional y regional

La variabilidad y los cambios en la criosfera de Canadá sientan los cimientos del proyecto canadiense CRYSYS, relativo a los esfuerzos de Canadá en materia de teledetección, análisis y simulación del clima, y actividades operativas. Se diseñó para aportar una importante contribución al proyecto "Presente y futuro de la criosfera" del CliC/PMIC, y lleva a cabo un estudio preliminar sobre la respuesta de la criosfera canadiense durante el verano extremadamente cálido de 1998 (Atkinson y otros, 2006). Este proyecto permitirá:

- proporcionar información sobre el estado actual de la criosfera canadiense durante el API, como contribución a la instantánea de dicho API y a sus conjuntos de datos en forma de legado;
- establecer las condiciones criosféricas actuales en el contexto del registro histórico, con el fin de documentar la magnitud de los cambios habidos durante los 50 años transcurridos desde la celebración del Año Geofísico Internacional (AGI 1957-1958);
- caracterizar y explicar la variabilidad y los cambios observados en el contexto del sistema acoplado clima-criosfera; y
- mejorar la representación de la criosfera en la superficie terrestre canadiense y en los modelos climáticos mundiales y regionales, con el fin de proporcionar simulaciones climáticas actuales y futuras de la criosfera para llevar a cabo estudios sobre adaptación e impactos climáticos.

Los componentes fundamentales son el desarrollo adicional del portal de datos canadiense del Sistema distribuido de información del API y el desarrollo de actividades de difusión para incorporar el conocimiento tradicional junto con la información obtenida por teledetección y el compromiso de las comunidades septentrionales con la vigilancia de la criosfera. El programa permitirá que las zonas más al norte de Canadá accedan a nuevas informaciones sobre lo rápido que se están fundiendo la nieve y el hielo, qué fenómenos provocan que las condiciones varíen de un año a otro y qué aspecto tendrá el hielo para la próxima generación en un período de 30 años.

La cubierta de nieve y sus propiedades sobre el suelo terrestre, el hielo marino y las masas de hielo serán objeto de una considerable atención durante el API. La Academia Rusa de Ciencias ha planificado varias iniciativas, entre ellas, la medición de las variaciones de la profundidad de la nieve y del equivalente en agua de la nieve a lo largo de la región euroasiática, así como la investigación de la influencia de los cambios en el grosor de la cubierta de nieve en el período preinvernal en los regímenes con suelos helados. En el caso de Canadá, un aspecto fundamental es la información concerniente a la cubierta de nieve y al equivalente en agua de la nieve para las zonas montañosas y las regiones altas del Ártico. Sería deseable contar con productos integrados de datos mediante la utilización de imágenes de satélite, observaciones in situ y datos simulados, pero la validación de cualquier producto proveniente de regiones remotas se antoja fundamental.

Durante el mes de abril de 2007 ya se completó una contribución singular al API, en forma de serie coordinada de mediciones de la nieve efectuadas a través de los territorios del noroeste y en Nunavut (Canadá), como parte del programa SnowSTAR-2007 (M. Sturm, CRREL, Fairbanks, EEUU, responsable), una travesía de 4 000 km sobre las tierras yermas (<http://www.barrenlands.org/MainPage.html>) desde Fairbanks, en Alaska (EEUU) hasta el Lago Baker, en Nunavut. Las mediciones de las propiedades físicas y químicas de las cantidades de nieve recogidas a lo largo de la travesía representan la primera recopilación sistemática, nunca antes realizada, de datos de nieve en

esta región. Estos datos se emplearán para mejorar los algoritmos de obtención del equivalente en agua de la nieve por satélite, para evaluar el rendimiento de los modelos de nieve distribuidos y para determinar los gradientes regionales del mercurio y del hollín. Además de los objetivos científicos de la travesía, más de 50 escuelas de Canadá y los Estados Unidos participaron en el viaje efectuando un seguimiento del progreso de la expedición a través de una página web actualizada diariamente con textos, sonidos y documentos fotográficos obtenidos sobre el terreno. En todas las comunidades visitadas se llevaron a cabo actividades informales de difusión. Se trata este de un ejemplo excelente de divulgación dirigida a crear capacidad científica entre los estudiantes y los habitantes de las regiones septentrionales: uno de los objetivos del API.

Es imposible considerar la capa de nieve y su variación sin tener en cuenta los cambios en la precipitación, concretamente en la precipitación sólida. Como contribución al API, la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO) de la OMM, en consulta con el Grupo de expertos en meteorología antártica del Consejo Ejecutivo, con el Programa Mundial sobre el Clima, con las Comisiones de Sistemas Básicos, Climatología, Hidrología y Meteorología Agrícola, con el programa CliC del PMIC y con el Sistema Mundial de Observación del Clima, va a evaluar los métodos de medición y observación de la precipitación sólida, la nieve caída y la profundidad de la nieve en las estaciones automáticas no dotadas de personal que se utilizan en los climas fríos (polares y alpinos) (http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/reports/2003-2007/CIMO-MG-4_2006_Final-Report.doc#Item_Annex_2, página 3). El apoyo de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales a esta actividad constituye un magnífico ejemplo de las contribuciones realizadas por los Miembros de la OMM al API y a su legado.

Los cambios que tienen lugar en el hielo de ríos y lagos son componentes criosféricos e hidrológicos de gran importancia en el sistema terrestre de las latitudes elevadas, ya que afectan a los ecosistemas acuáticos, controlan la escorrentía de primavera y tienen impacto en el transporte sobre hielo y en el desarro-



Figura 5 – El SnowSTAR 2007 atraviesa la tundra canadiense: los retos de obtener una estimación zonal del equivalente en agua de la nieve (un esfuerzo de colaboración de los científicos norteamericanos y canadienses, liderado por Matthew Sturm, CRREL (Laboratorio de investigación e ingeniería para las regiones frías), Estados Unidos)

llo económico. Canadá actualizará su archivo relativo al hielo en agua dulce y efectuará una evaluación nacional de los cambios en el hielo terrestre por toda la geografía canadiense, que no se producía desde el AGI. La investigación sobre la cubierta de hielo de los lagos de la región panártica proporcionará un mejor conocimiento de los impactos de las oscilaciones atmosféricas y oceánicas a gran escala en las condiciones del pasado que afectaban al hielo existente sobre los lagos y, junto con las proyecciones simuladas del clima futuro, ofrecerá una buena perspectiva en relación con los futuros cambios a nivel regional que afecten a las características del hielo existente en los lagos, y también con respecto a los impactos hidrológicos y ecológicos resultantes en diversas regiones del Ártico.

Environment Canada y el Instituto Hidrológico Estatal de Rusia están comenzando a procesar los datos relativos a la congelación y ruptura, de cara a efectuar un análisis circumpolar cooperativo de las tendencias temporales en los regímenes de hielo en agua dulce. La Federación Rusa también tiene previsto investigar la variabilidad de las condiciones térmicas y del hielo en los ríos situados en la parte septentrional europea de esa nación, así como estimar la influencia de la escorrentía en los ríos sobre el balance térmico y salino, y el régimen de hielos de la cuenca oceánica ártica. Aún están por desarrollar las bases para predecir situaciones catastróficas asociadas a los episodios de hielo en las zonas de desembocadura de los ríos mediante la utilización de

datos procedentes de observaciones y de modelos numéricos.

Muchos centros contribuirán a perfeccionar sus capacidades de simulación de los componentes hidrológicos y criosféricos terrestres con ayuda de las nuevas observaciones y de las mejores parametrizaciones de los modelos que se han conseguido durante el API. Entre ellas cabe incluir la evaluación de las simulaciones de la criosfera en versiones operativas y de desarrollo de modelos climáticos globales y regionales, y en modelos de predicción numérica del tiempo. Algunos países harán especial hincapié en la parametrización de la cubierta de nieve (efectos de nieve y vegetación, estructura de las acumulaciones de nieve) para aumentar la comprensión de los mecanismos de respuesta y realimentación de la criosfera en el seno del sistema climático mundial, así como la sensibilidad y solidez de las proyecciones de cambio climático en las latitudes altas.

Presente y futuro del permafrost

Una de las mayores contribuciones a la comprensión de los cambios que tienen lugar en la criosfera y en la hidrosfera vendrá a través del proyecto denominado “Estado térmico del permafrost” (TSP) (API 50), coordinado por la Asociación Internacional del Permafrost (IPA). El régimen de temperaturas del permafrost (a profundidades de 10-200 m) es un indicador sensible de la variabilidad

climática que tiene lugar en un período que va de décadas a siglos, así como de los cambios a largo plazo en el balance energético de la superficie. El proyecto TSP se encargará de medir las temperaturas en los pozos de sondeo existentes y en otros nuevos durante un período de tiempo fijo, con el fin de proporcionar una “fotografía instantánea” de las temperaturas del permafrost tanto en el espacio como en el tiempo. Se han identificado aproximadamente 500 pozos de sondeo existentes en el hemisferio norte, y también hay un número limitado de pozos disponibles en la región antártica. El TSP incluye el proyecto CALM (Vigilancia de la capa activa circumpolar), con sus 150 localizaciones aproximadamente (www.gtnp.org) (véase la Figura 6).

Se han identificado varios “transectos regionales” a través de las principales zonas con permafrost de América del Norte, Europa (proyecto Permafrost y clima en Europa (PACE)) y Eurasia, con el fin de evaluar los cambios en los límites meridionales y septentrionales del permafrost. La red IPA/TSP proporcionará los emplazamientos para efectuar las mediciones a largo plazo. Actualmente no existe ninguna base de datos a nivel mundial que defina el estado térmico del permafrost dentro de un período de tiempo concreto. Las medidas registradas o no publicadas de la temperatura han sido obtenidas a diferentes profundidades y en distintos períodos durante las cinco últimas décadas, aunque sabemos que estas temperaturas han cambiado y en diferentes proporciones en función de las diversas regiones.

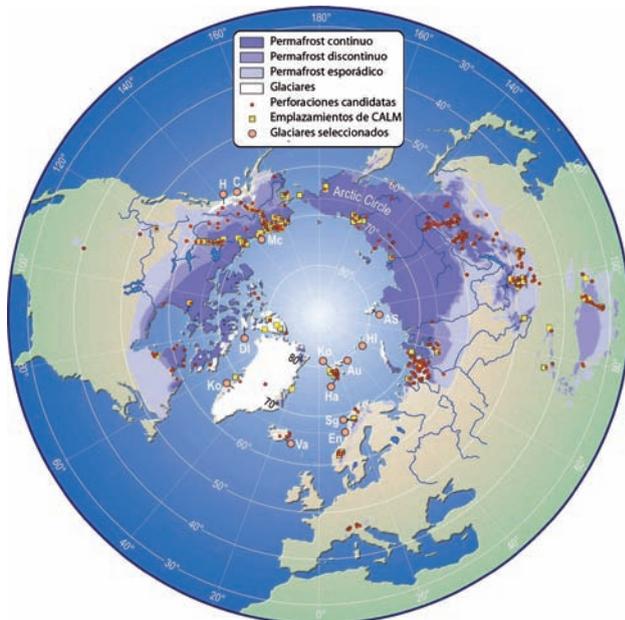


Figura 6 – Situación de las perforaciones candidatas para analizar el permafrost, emplazamientos de vigilancia de la capa activa (según la Asociación Internacional del Permafrost) y glaciares seleccionados en el marco del programa GLACIODYN.

Los conjuntos de datos relativos a la temperatura y a la capa activa del TSP servirán de referencia en el futuro para estimar la velocidad de cambio de las temperaturas del permafrost en las proximidades de la superficie, para evaluar los cambios en los límites del permafrost y para validar modelos, escenarios climáticos y enfoques relativos al reanálisis de temperaturas. Cada uno de los 18 países implicados en el proyecto TSP es responsable de sus propias mediciones. Los datos se incluyen en la Red terrestre mundial del permafrost (GTNP) de la OMM, la FAO y la IPA. Entre los proyectos relacionados con el API-IPA figuran el control de la erosión costera en lugares clave bajo los auspicios del proyecto “Dinámica costera en el Ártico” (API 90) y la evaluación de las existencias de carbono en las regiones con permafrost en el marco del proyecto “Reservas de carbono en las regiones con permafrost” (API 373).

Criosfera marina

Además de la extensión, el conocimiento del espesor del hielo y de la altura de la nieve sobre el mismo resulta esencial para nuestra comprensión del hielo marino y de sus cambios, a fin de poder evaluar el flujo de agua dulce hacia el océano, el clima local, los cambios en los ecosistemas marinos o el nivel de transitabilidad.

La cubierta de hielo marino, sobre todo en la región ártica (véase la Figura 1), está sufriendo importantes cambios provocados por el clima, entre ellos, una reducción de su extensión y una disminución neta de su grosor. Durante el API, investigadores de muchas naciones estudiarán las propiedades y los procesos que gobiernan esta cubierta de hielo marino y analizarán su papel como indicador y amplificador del cambio climático, como parte de sus trazados oceánicos coordinados. Es necesario mejorar la representación del hielo marino en los modelos climáticos, tanto para la región ártica como para la antártica, en función de las evaluaciones del IPCC AR4, puesto que no hay simulaciones de modelos individuales (o hay muy pocas) que muestren tendencias comparables a las observaciones, dependiendo de la ventana temporal del análisis (Stroeve, 2007).

Se emplearán numerosas técnicas para abordar esta tarea, incluyendo expediciones, teledetección por satélite, vehículos autónomos, boyas, amarres oceánicos y modelos numéricos. Los sistemas autónomos permiten llevar a cabo estudios sobre las interacciones climáticas del hielo marino en regiones que no siempre son de fácil acceso. Por ejemplo, el proyecto API 95 se encarga de estudiar la zona con hielo estacional (SIZONET), midiendo de forma autónoma el balance de masas del hielo marino y examinando la radiación solar en el sistema atmós-

fera-hielo-océano (<http://www.crrel.usace.army.mil/sid/IMB/>). De cara al API 2007-2008, de nuevo, la Federación Rusa desplegó la estación de muestreo NP-35 para el Polo Norte, cuyo primer modelo, el NP-1, había sido empleado en 1937. Los científicos rusos investigarán la parte superior del océano, el hielo marino y la cubierta de nieve, y recopilarán medidas meteorológicas y atmosféricas con el fin de identificar los procesos más importantes que tienen lugar en la atmósfera y las alteraciones de la cubierta de hielo marino para analizar el acoplamiento entre la atmósfera, el mar y el hielo.

La observación del propio hielo marino constituye el principal componente de varios proyectos oceanográficos del API en el marco del Sistema integrado de Observación del Océano Ártico (SiOOA) propuesto por el Consejo científico del Océano Ártico y por el programa CliC/PMIC (véase el artículo de Summerhayes, Dickson y otros en este volumen, 270-283). Una pieza interesante del SiOOA fue la Escuela de verano sobre el hielo marino, celebrada en Svalbard, en julio de 2007, para dar cuenta de los últimos progresos alcanzados en nuestro conocimiento del hielo marino y de su interacción con el océano y la atmósfera. Se trata de una parte integrante del programa de difusión del API.

El desarrollo en curso del Programa internacional de boyas en el Ártico por parte de los Miembros de la OMM se antoja fundamental para nuestro conocimiento del clima y de la criosfera en las variables regiones polares. En 2007, en la región ártica se desplegaron más de 120 boyas con fines investigadores y operativos a nivel nacional. Asimismo, los productos actuales e históricos que han generado los Miembros a través de sus servicios nacionales sobre el hielo proporcionarán una valiosa información de cara a establecer el referente en materia del hielo marino durante el período del API y después del mismo.

En el momento actual, están teniendo lugar los principales experimentos de campo en la región antártica. El Programa internacional de boyas en el Antártico del PMIC/CCIA pretende elevar de manera significativa el desarrollo de dichas boyas. El proyecto “Hielo marino antártico en el seno del API” (API 141) cuenta con dos grandes actividades de

investigación durante los meses de septiembre y octubre de 2007. Al igual que en el Océano Ártico, las observaciones que se realicen en el Océano Austral estarán coordinadas con las observaciones oceanográficas en el marco del proyecto "Clima de la Antártida y del Océano Austral" del PMIC (API 132), y se convertirán en parte intrínseca de cara al desarrollo del Sistema de Observación del Océano Austral (véase el artículo de Summerhayes, Dickson y otros en este volumen, 270-283).

Una de estas actividades la constituye el programa SIMBA (Balance de masas del hielo marino en la Antártida) a bordo del *Nathaniel B. Palmer* (Steve Ackley, científico jefe) en el mar de Bellingshausen, mientras que la otra es el programa SIPEX (Experimento de física y ecosistemas del hielo marino) a bordo del *Aurora Australis* (Tony Worby, científico jefe) en la zona que se encuentra a 120-130°E de la región oriental antártica. Ambos programas se centrarán en mejorar nuestro conocimiento de las características físicas del hielo marino, la deriva y dinámica del mismo, las distribuciones de grosor hielo/nieve y la relación entre los componentes físicos del hielo, las algas del hielo marino y la dinámica del ecosistema. El instrumento GLAS a bordo del ICESat se activará el 1 de octubre de 2007 para coincidir con estos programas de campo, y se llevarán a cabo todos los esfuerzos necesarios para coordinar las actividades de campo existentes en las regiones cubiertas por los datos del ICESat.

El objetivo es proporcionar datos valiosos y reales del terreno de cara al calibrado y validación del instrumental del satélite. Las iniciativas relacionadas incluyen la creación de un nuevo grupo de trabajo encargado de la clasificación de la nieve y del hielo, así como el establecimiento de un portal con datos relativos al hielo marino en el Centro australiano de datos antárticos.

Mantos de hielo, masas de hielo

Los mantos de hielo, las plataformas de hielo, los casquetes de hielo y los glaciares de todo el mundo almacenan la mayor parte de agua dulce del planeta. Su respuesta ante la variabilidad y el cambio del clima está siendo documentada hoy en día a través de la

intensificación de la observación y vigilancia in situ y vía satélite, así como por la modelización meteorológica, climática y de los procesos. La estabilidad de estas masas de hielo, las características de su superficie cambiante, y los patrones de escorrentía y su contribución final al aumento del nivel del mar constituyen un centro de atención particular del API.

El proyecto GIPSY, del que se ha hablado anteriormente, realizará una contribución fundamental mediante los nuevos registros vía satélite, además de los ya existentes, de las masas de hielo de las regiones polares. Por ejemplo, por primera vez, habrá: una imagen instantánea de verano y otra de invierno, a través del radar de apertura sintética (SAR), de los mantos de hielo polar, de los glaciares y de los casquetes de hielo para documentar los parámetros físicos de la superficie de hielo; medidas InSAR (radar interferométrico de apertura sintética), en múltiples frecuencias y desde el polo a la costa, relativas a la velocidad de la superficie del hielo y a la topografía InSAR repetida en la banda X para detectar cambios locales en la elevación del manto de hielo asociados al movimiento de aguas subglaciales.

Los estudios continuados ofrecerán nuevos conocimientos relativos al cambio en el volumen, la extensión derretida y el balance de masas. Un ejemplo de este último punto es el proyecto relacionado con la variación de la masa de nieve y hielo en las regiones polares del Ártico y del Antártico, mediante la utilización de gravimetría satelital a través del experimento GRACE (Experimento climático y de recuperación de la gravedad). El proyecto cartografiará por primera vez las variaciones temporales de las pérdidas y ganancias de masa de hielo, observadas por GRACE, como respuesta al cambio climático. Se obtendrán, así, series temporales y mapas geográficos mensuales de las variaciones integradas de masa a lo largo de amplias regiones remotas, como son la región antártica y Groenlandia, que luego podrán expresarse en función de su contribución en lo que respecta al nivel del mar.

Existen multitud de proyectos centrados en Groenlandia y en la región antártica, así como en las zonas que las rodean, que contribuirán a comprender mejor el sistema climático actual y pasado de las

regiones polares y de la Tierra. El proyecto "Acumulación en la superficie y desprendimiento de hielo en la región antártica" hace uso del foco singular de cooperación del API para sintetizar, recopilar, analizar y producir conjuntos de datos exhaustivos acerca de los patrones espaciales y temporales de acumulación de nieve y de desprendimiento de su perímetro por parte del hielo perteneciente al manto de hielo de la región antártica. Este proyecto se construirá sobre los esfuerzos del pasado y estimulará otros nuevos para:

- poder representar la variabilidad espacial y temporal de la acumulación en la región antártica con un nivel de detalle nunca antes conseguido;
- comparar los nuevos datos de velocidad de la superficie con la anterior cartografía a gran escala de la velocidad del hielo, y con las antiguas medidas aisladas, así como ofrecer indicaciones útiles de la variación temporal del desprendimiento de hielo y de la posición de la línea de tierra a lo largo de grandes extensiones del perímetro terrestre de la región antártica; y
- determinar el grosor del hielo en la línea de tierra con el fin de completar el cálculo del desprendimiento de hielo: saber lo que ocurre en el borde de los mantos de hielo es fundamental para comprender la estabilidad y la variación del nivel del mar.

Una de las zonas que se calienta más rápidamente en las regiones polares es la Península Antártica. Durante el transcurso del API comenzarán los estudios que emplearán las plataformas de hielo Larsen B y C como laboratorios. Con la pérdida de plataformas de hielo como estas, los glaciares efluentes que las alimentaban con hielo de la superficie se aceleraron de forma veloz, perdiendo una cantidad desproporcionada de hielo en el océano. Una nueva iniciativa en la plataforma Larsen C, que consiste en la utilización conjunta de mediciones de campo (existentes y nuevas), determinará el estado de su salud y la estabilidad como respuesta al cambio climático. Los datos existentes y las nuevas medidas de campo (por ejemplo, el Sistema

de Posicionamiento Mundial, las estaciones meteorológicas automáticas y el georradar), junto con un análisis de los datos obtenidos por teledetección, los modelos numéricos de las plataformas de hielo y los métodos de control, están destinados a ofrecer un análisis más minucioso de la evolución de las plataformas de hielo en el seno de un clima cambiante.

Asimismo, en el caso de Groenlandia, se está llevando a cabo un esfuerzo considerable para determinar su historia, su estabilidad y su evolución. Resulta crucial comprender cómo reaccionará Groenlandia ante el calentamiento global. La utilización de datos sísmicos, núcleos de hielo, medidores por radar y láser y sondas acústicas, aportará nuevos conocimientos sobre la capa de hielo de Groenlandia y mejorará la capacidad de los científicos para simular su reacción ante el cambio climático. Se encuentra en proceso de creación una nueva zona de sondeos que permitirá la extracción de núcleos de hielo que amplíen el registro más allá de los 130 000 años, proporcionando una nueva perspectiva sobre el cambio climático.

Del mismo modo, en la región antártica, el proyecto chino Panda perforará un nuevo núcleo en el Domo A, donde el grosor del hielo se estimó en más de 3 000 m. Se trata de un posible lugar donde reconstruir un registro de 1 200 años relativo al clima del pasado. El API supuso el estímulo definitivo para llevar a cabo estos estudios, arrojando nueva luz sobre los climas pasados, presentes y potencialmente futuros en las regiones polares. En el Centro polar danés (<http://www.ipy.dk>) puede accederse a la información relativa a los proyectos nacionales e internacionales del API que se llevan a cabo en las aguas propias de Groenlandia y en sus alrededores.

El calentamiento global tendrá un gran impacto en los glaciares de la región ártica. El nivel del mar se verá afectado y cabe esperar importantes cambios en lo que se refiere a los aportes de sedimentos y de agua dulce que acabarán en las ensenadas y en los fiordos. GLACIODYN es un proyecto del API que investigará los efectos del calentamiento global en un conjunto de 20 glaciares seleccionados de la región ártica durante el período 2007-2010 (véase la Figura 6). Pretende mejorar las estimaciones actuales de la

contribución de los glaciares árticos y de los casquetes glaciares al aumento del nivel del mar a través de unas técnicas de observación perfeccionadas y de una modelización dinámica de los glaciares, para simular los cambios en la escorrentía como respuesta a los escenarios de cambio climático. La experiencia adquirida en el proyecto "Clima y energía en las regiones nórdicas" resultará beneficiosa para esta iniciativa.

La Vigilancia de la Criosfera Global: un legado del API

El decimoquinto Congreso Meteorológico Mundial (mayo de 2007) respaldó el concepto de la Vigilancia de la Criosfera Global (VCG) como un legado de la OMM en el ámbito del API 2007-2008. La VCG proporcionaría un mecanismo intergubernamental para ayudar a llevar a cabo observaciones criosféricas fundamentales, tanto in situ como por teledetección, que también serían útiles a la hora de poner en marcha las recomendaciones del Tema relativo a la criosfera desarrolladas por la estrategia IGOS. La consecución de estos objetivos requerirá la creación de vínculos, asociaciones y acuerdos de desarrollo entre sistemas de observación fundamentales, redes, proveedores de observaciones y datos, usuarios y la comunidad investigadora. Se prevé que la VCG respalde la iniciativa del Sistema de información de la OMM al suministrar un portal único que recoja la información y datos oficiales de la criosfera, facilitando la evaluación de los cambios en la misma y su impacto, así como la utilización de esta información para contribuir a detectar el cambio climático. Una de las primeras tareas de la VCG será la de trabajar con los mecanismos pertinentes de la OMM en aras de garantizar que las observaciones de la criosfera, así como su vigilancia y estudios asociados, satisfacen las demandas de un amplio abanico de usuarios a lo largo y ancho del planeta.

En la actualidad se está discutiendo el concepto en el seno de la OMM y con otras instituciones, agencias y científicos. La elaboración del concepto de la VCG y el inicio de un programa de acciones orientado a su creación serán puntos a poner en marcha por el Grupo espe-

cial intercomisiones de la OMM relativo al API, previéndose que a principios de 2008 se cumplan esos objetivos.

Agradecimientos

Los autores quieren dar las gracias a todos los investigadores implicados en el API que proporcionaron información actualizada sobre sus proyectos. Dichos proyectos se encuentran en curso, y animamos a los lectores a ponerse en contacto directamente con los autores e investigadores en el caso de que deseen obtener más información.

Referencias

- ATKINSON, D. E. y otros, 2006: Canadian cryospheric response to an anomalous warm summer: a synthesis of the Climate Change Action Fund Project The State of the Arctic Cryosphere during the Extreme Warm Summer of 1998. *Atmosphere-Ocean*, 44 (4), 347-375.
- LEMKE P. y otros, 2007: Changes in Cryosphere. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. SOLOMON, D. QIN y otros (Eds.)), Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido) y Nueva York, NY (EEUU), 43-46.
- SERREZE, M. C., M. M. HOLLAND y J. STROEVE, 2007: Perspectives on the Arctic's shrinking sea ice cover, *Science*, 315, 1523-1536.
- SERREZE, M. C., A. P. BARRETT, A. G. SLATER, R. A. WOODGATE, K. AAGAARD, R. B. LAMMERS, M. STEELE, R. MORITZ, M. MEREDITH y C. M. LEE, 2006: The large-scale freshwater cycle of the Arctic. *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, No. C11, C11010 10.1029/2005JC003424.
- STROEVE, J., M. M. HOLLAND, W. MEIER, T. SCAMBOS y M. SERREZE, 2007: Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09501, doi:10.1029/2007GL029703.
- WALISER, D., K.-W. SEO, S. SCHUBERT y E. NJOKU, 2007: Global water cycle agreement in the climate models assessed in the IPCC AR4. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16705, doi:10.1029/2007GL030675.