

OBSERVACION DE LOS OCEANOS polares durante el Año Polar Internacional y después del mismo

por Colin Summerhayes¹, Bob Dickson², Mike Meredith³, Peter Dexter⁴ y Keith Alverson⁵

Introducción

Un objetivo fundamental del Año Polar Internacional (API) 2007-2008 es dejar un legado (Allison y otros, 2007). Una de las principales herencias del Año Geofísico Internacional (AGI) de 1957-1958 fue la creación de una red de bases en la región antártica que sirviera de trampolín para un programa mucho más ambicioso de exploración del interior del continente. La mayor parte de estas bases todavía se encuentran activas a día de hoy y, como resultado del creciente interés científico por las regiones polares, su número ha aumentado con las bases establecidas por otras naciones que aún no eran participantes en el AGI.

En el caso del API 2007-2008, nos centraremos en distintos tipos de legados científicos, en la creación de sistemas de observación encaminados a detectar y vigilar los cambios en el sistema atmósfera/hielo/océano en latitudes altas y en proporcionar los datos fundamentales para la predicción de cambios futuros. Esta diferencia de enfoque entre el AGI y el API ha tenido lugar por los enormes avances que se han registrado durante los últimos 50 años en el campo de la robótica, la automatización, la miniaturización, la comunicación y la potencia de cálculo, capacitándonos, por primera vez en la historia, para efectuar un muestreo en zonas, como los océanos

polares, en las que hasta el momento no se había efectuado ninguno, o los que se habían hecho eran extremadamente ínfimos. En los prolegómenos de este API, la OMM, en colaboración con el Consejo Internacional para la Ciencia (CIUC) y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (COI), fomentó la idea de que los Sistemas de observación de los océanos Ártico y Austral deberían convertirse en los resultados fundamentales de la inversión en el API 2007-2008. Algunas zonas de estos océanos son de difícil acceso durante los seis meses del año en los que la superficie queda cubierta por el hielo y suele ser complicado trabajar en ellas debido a los fuertes vientos, los mares abiertos, la escasa visibilidad, las temperaturas por debajo de cero, la oscuridad invernal las 24 horas del día y la acumulación de hielo en las superestructuras de los barcos.

No obstante, gracias a los accesos automatizados combinados con sistemas de medición y comunicación remotos como flotadores de subsuperficie, amarres, planeadores y vehículos submarinos autónomos (AUV), dispositivos automatizados empleados en otras plataformas autónomas y sistemas avanzados de comunicación acústica submarina, se ha incrementado sobremanera el potencial para recopilar datos in situ que antes no se podían recoger, con el fin de combinarlos con los datos de

satélite, actualmente bien asentados. Explotar estas posibilidades debería permitirnos hacer de manera rutinaria lo que era difícil llevar a cabo en tiempos pasados: efectuar mediciones del agua durante todo el año y hacerlas por debajo del hielo marino.

En el Ártico, la idea es desarrollar y mantener un Sistema integrado de Observación del Océano Ártico (SiOOA), mientras que en la zona antártica se ha planificado un Sistema de Observación del Océano Austral (SOOS). Tanto el SiOOA como el SOOS proporcionarán capacidad de conocimiento, de comprensión y de predicción: conocimiento del estado del sistema en cualquier momento; comprensión de los procesos en funcionamiento; y la posibilidad de combinar ese conocimiento y esa comprensión en forma de modelos numéricos avanzados para predecir el cambio. Estos dos nuevos sistemas contribuirán directamente al Sistema Mundial de Observación de los Océanos (SMOO), patrocinado por la COI, la OMM y el PNUMA y, a través de aquel, al Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), para el cual, el SMOO proporciona la componente oceánica. El SMOO y el SMOC son, a su vez, componentes de la Red mundial de sistemas de observación de la Tierra (GEOSS), que ofrece asesoramiento a los responsables de elaborar las políticas a nivel mundial. Ni el SiOOA ni el SOOS son

1 Director Ejecutivo, Comité científico de investigaciones antárticas, Instituto de investigación polar W. Scott, Cambridge (Reino Unido), cps32@cam.ac.uk
 2 Presidente del Estudio internacional de los flujos oceánicos árticos y subárticos, Centro científico del medio ambiente, las pesquerías y la acuicultura, Lowestoft (Reino Unido), bob.dickson@cefas.co.uk
 3 Jefe del Grupo de atmósfera y océanos, British Antarctic Survey, Cambridge (Reino Unido), mmm@bas.ac.uk
 4 Copresidente de la Comisión mixta OMM-COI sobre oceanografía y meteorología marina (CMOMM), Sección de servicios oceanográficos, Oficina de Meteorología, Melbourne (Australia), p.dexter@bom.gov.au
 5 Director de la Oficina de proyectos del SMOO, COI/UNESCO, París (Francia), k.alverson@unesco.org

organismos regionales del SMOO, sino que más bien son diseños técnicos para poner en funcionamiento por naciones trabajando conjuntamente o de forma independiente, según proceda.

Las observaciones de los océanos Ártico y Austral se efectuarán mediante una selección de herramientas diversas, incluyendo (y ampliando) las metodologías de observación desarrolladas por la comunidad de investigadores del océano y empleadas y coordinadas a nivel operativo bajo los auspicios de la Comisión técnica Mixta OMM/COI sobre Oceanografía y Meteorología Marina (CMOMM), que incluye, por ejemplo, operaciones efectuadas por buques, por boyas a la deriva o fijas y por estaciones a nivel del mar.

El desarrollo de los sistemas de observación oceánica para los océanos polares es complementario a la creación de un sistema de Vigilancia de la Criosfera Global (VCG), propuesto en el XV Congreso Meteorológico Mundial, donde la iniciativa se acogió con los brazos abiertos. El concepto de la VCG está basado en las recomendaciones de la Estrategia Integrada de Observación Mundial (EIOM) relativa al tema de la criosfera (CryOS), desarrolladas recientemente por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), a través de su proyecto relacionado con el clima y la criosfera, así como por parte del Comité Científico de Investigaciones Antárticas (CCIA). El informe sobre el tema fue aprobado por la sociedad EIOM en mayo de 2007 e incluye, entre otros aspectos, las recomendaciones para la observación del hielo marino (más detalles en <http://igos-cryosphere.org>).

Durante más de un siglo, se ha puesto de relieve la necesidad de contar con sistemas de observación integrados y mantenidos, especialmente en las regiones polares, donde los efectos del calentamiento global se están manifestando más rápidamente que en cualquier otro lugar. Carl Weyprecht, el arquitecto austriaco del Primer Año Polar Internacional, fue quien anunció públicamente, por primera vez, la necesidad de estudiar la Tierra como un sistema integrado y que, para emprender semejante empresa, se necesitaban "observaciones coordinadas y sincronizadas para proporcionar información sobre las características, los cambios y

la naturaleza distintiva de los fenómenos que tienen lugar en el espacio y en el tiempo" (Weyprecht, 1879). Era un hombre adelantado a su tiempo.

Los gobiernos están ansiosos por ver cómo la comunidad científica lleva hacia delante este desarrollo. La reunión del Consejo Ministerial del Ártico del 26 de octubre de 2006 emitió un mandato destinado a las redes de observación del Ártico sostenidas, instando a "todos los países miembros a mantener y ampliar la vigilancia a largo plazo de los cambios en todas las zonas del Ártico, y solicitando (...) los esfuerzos necesarios encaminados a crear una red coordinada de observación del Ártico que pueda dar respuesta a las necesidades sociales identificadas". La reunión consultiva del Tratado Antártico celebrada el 11 de mayo de 2006 decidió instar a las partes "a mantener y ampliar la vigilancia científica a largo plazo y las observaciones continuas de los cambios ambientales en los componentes físicos, químicos, geológicos y biológicos del entorno antártico; a contribuir a una red coordinada de sistemas de observación de la región antártica durante el API (2007-2008); y a respaldar la vigilancia a largo plazo y las observaciones continuas del medio ambiente antártico, así como la gestión de datos asociados como una herencia principal del API, a fin de permitir la detección, y de apoyar la comprensión y la predicción, de los impactos del cambio climático y medioambiental".

Sistema de Observación del Océano Austral (SOOS)

La naturaleza coordinada del cambio antártico y subantártico

La capacidad de la sociedad para adaptarse o mitigar la amenaza del cambio climático requiere, en primer lugar, entender cómo funciona el sistema climático. El océano almacena enormes cantidades de calor y de dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, y las traslada lentamente por todo el mundo, influyendo de esta manera en el clima a nivel tanto regional como mundial. El

conector clave en esta circulación global es el Océano Austral: recibe señales climáticas del resto de los océanos mundiales y exporta la huella climática de la región antártica. Las aguas profundas del Atlántico Norte llegan con características provenientes de los mares de Noruega, Groenlandia y el Labrador. En la Corriente Circumpolar Antártica (CCA), la corriente oceánica más extensa del mundo con un flujo de 130 millones de metros cúbicos por segundo, esta agua se integra con otras aguas profundas en el agua profunda circumpolar (CDW). Bajo la influencia de los fuertes vientos dominantes del oeste, las aguas superficiales son impulsadas hacia el norte, permitiendo a la CDW aflorar en las proximidades del continente. En la plataforma continental existe una temperatura lo suficientemente fría como para que esta CDW se torne densa y se hunda por el talud continental, dando lugar a la denominada agua antártica de fondo (AABW) que ventila y enfría las zonas abisales de los océanos del mundo. Más al norte, en la propia CCA, los procesos que implican el hundimiento de las aguas superficiales provocan la formación de agua en modo subantártico y de aguas intermedias antárticas más densas. Estas masas de agua ocupan la zona que se encuentra bajo la superficie y las aguas de la capa termoclina hasta una profundidad de varios cientos de metros o más y se sabe que son sensibles a los cambios en el forzamiento climático, incluidos los que tienen un origen antropogénico.

La comprensión de estos procesos oceanográficos y sus conexiones con el resto del sistema climático constituye una de las bases para predecir el momento, la magnitud y la dirección de un cambio futuro y, por tanto, es necesario que vigilemos las propiedades físicas del Océano Austral (Figura 1).

El cambio es evidente en una gran extensión del Océano Austral. Desde mediados de la década de 1960, la costa oriental de la Península Antártica septentrional se ha calentado rápidamente en el verano, experimentando un incremento de las temperaturas atmosféricas cercanas a la superficie de más de 2°C, provocando el desplome de las dos secciones septentrionales de la plataforma glaciar de Larsen. El calentamiento se atribuye a los vientos del oeste que, en

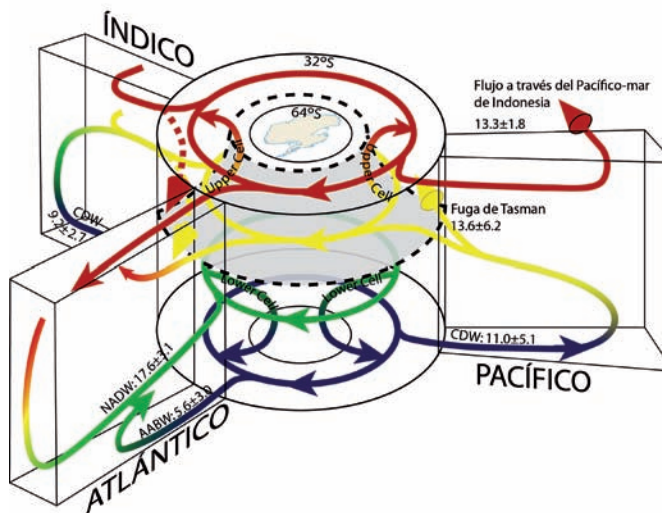


Figura 1 – Circulación de retorno a nivel mundial, que muestra el papel vinculante decisivo del Océano Austral (Lumpkin y Speer, 2006).

verano, llegan a ser suficientemente fuertes como para arrastrar aire marítimo cálido desde el oeste sobre la barrera presentada por la Península Antártica. El fortalecimiento de los vientos del oeste se debe a un cambio del patrón meteorológico dominante –el modo anular del hemisferio sur (SAM)– a su fase positiva, en la que las presiones en superficie disminuyen sobre la zona antártica y aumentan en las latitudes medias. El cambio y el rápido calentamiento observado en la zona oriental de la Península Antártica parecen ser una reacción a los forzamientos antropogénicos provocados por los gases de efecto invernadero (Marshall y otros, 2006).

Se ha sugerido que el aumento del SAM puede haber provocado una variación latitudinal y un incremento en el transporte de la CCA (Fyfe y Saenko, 2006). Aunque existen pruebas de observación palpables relativas a que el transporte de la CCA depende en gran medida del SAM a escalas temporales que van desde días y semanas (Aoki, 2002; Hughes y otros, 2003) hasta años (Meredith y otros, 2004), también se ha argumentado que es más probable que la tendencia de los vientos origine una tendencia en la actividad turbulenta circumpolar más que una tendencia en el transporte de CCA (Meredith y Hogg, 2006).

Gille (2002, 2003) ha puesto de relieve que, en las últimas décadas, se ha producido un calentamiento a gran escala de unos 0,2°C en el seno de las aguas profundas de la CCA. Este estudio se amplió hace poco para demostrar que

este calentamiento se intensifica en la superficie, donde alcanza un valor de hasta +1°C (Gille, 2007). Parte de este calentamiento podría atribuirse al desvío hacia el sur de los núcleos de la corriente CCA, reflejando, fundamentalmente, una redistribución del calor más que un incremento del mismo, aunque es posible efectuar otras interpretaciones. Por ejemplo, podría explicarse mediante un incremento en la actividad turbulenta en el Océano Austral, transportando así más calor hacia el sur, hacia la región antártica, como consecuencia del aumento de la intensidad de los vientos circumpolares del oeste (Meredith y Hogg, 2006; Hogg y otros, 2007).

Los modelos numéricos avanzados pueden reproducir en la actualidad un calentamiento comparable al observado en el Océano Austral, el cual se produce de forma más rápida que en cualquier otro lugar del océano a nivel mundial. Los análisis revelan que el Océano Austral podría tener unas temperaturas incluso más cálidas de las que registra ahora, debido al efecto de enmascaramiento de los restos volcánicos y otros aerosoles. (Fyfe, 2006).

También se ha observado un cambio regional en el Océano Austral. Robertson y otros (2002) descubrieron que la capa de agua cálida profunda (WDW) en el mar de Weddell había experimentado un calentamiento de unos 0,3°C. Boyer y otros (2005) advirtieron una importante disminución de la salinidad al sur de los 70°S en la zona del Pacífico del Océano Austral y en el mar de Weddell. Se ha detallado una reducción de la salinidad en el mar de Ross, y la

barrera de Amundsen y la cima de la pendiente se enfriaron y crecieron entre 1994 y 2000 (Jacobs, 2006). Estas aguas incluyen fuentes de agua del AABW de los sectores del Pacífico y del Índico que se encuentran en el Océano Austral, los cuales han mostrado una consiguiente disminución rápida de la salinidad (Rintoul, 2007). Thompson y Solomon (2002) atribuyen un descenso regional de la extensión del hielo en la zona del mar de Weddell y la Península Antártica a un efecto de retirada del hielo provocado por la temperatura del aire y causado por el cambio del SAM. Las disminuciones continuas del hielo marino en esa región se equilibran gracias a un aumento del hielo marino en el mar de Ross (Gloersen y otros, 1992).

El calentamiento de la zona occidental de la Península Antártica parece estar vinculado a un descenso del hielo marino en el contiguo mar de Bellingshausen, donde la superficie oceánica y sus zonas próximas, en época de verano, han experimentado un calentamiento de más de 1°C, más rápido que en la mayor parte de las demás zonas del océano mundial. El mar también se ha vuelto más salino en verano. Estos cambios constituyen realimentaciones positivas en ambos casos, que sirven para fomentar un mayor descenso en la producción de hielo y un mayor calentamiento atmosférico. Puesto que el océano se calienta solo cerca de la superficie, es probable que la causa sea más meteorológica que oceánica. Un calentamiento adicional puede provocar pérdidas en especies y poblaciones de la biodiversidad marina (Meredith y King, 2005).

Los modelos apuntan a que a lo largo de los próximos 80 ó 100 años es probable que seamos testigos del calentamiento de la zona marginal de hielo marino durante los meses de invierno en hasta 0,6°C por década. Se espera que el hielo se reduzca en un 25%. Los vientos del oeste cobrarán más fuerza sobre el océano, sobre todo en otoño, pero los vientos costeros del este se debilitarán (Bracegirdle y otros, en imprenta).

Observaciones en el Océano Austral

La CMOMM es responsable de la coordinación de las observaciones oceánicas

rutinarias en los océanos polares y en cualquier otro lugar como parte del SMOO; en la actualidad, estas tareas se llevan a cabo a través de los siguientes medios:

- El programa de Buques de observación voluntaria (VOS), que mide las propiedades de la superficie del océano y de la atmósfera inferior. Se recopila un subconjunto de estos datos (que llevan numerosos metadatos asociados), con los máximos niveles de normalización que exigen las observaciones climáticas, y siempre a través del subconjunto climático del VOS, denominado VOSclim.
- El programa de Buques de observación ocasional (SOOP), que emplea batitermógrafos no recuperables (XBT), en gran medida procedentes de los buques de investigación y de suministro a la zona antártica en rutas a través del Océano Austral, con la intención de medir el contenido de calor de la capa superior del océano.
- El Sistema mundial de observación del nivel del mar (GLOSS), que utiliza medidores de mareas y el Sistema de posicionamiento mundial (SPM) para medir la altura del nivel del mar alrededor de la cuenca ártica y en la costa de la región antártica y sus islas próximas al litoral, y que emplea aparatos de registro de la presión del fondo para medir la altura del nivel del mar por encima del fondo marino del Océano Austral.
- El Programa Internacional de Boyas en el Antártico (PIBA) y el Programa Internacional de Boyas en el Ártico (PIBA) (ambos grupos de acción del Grupo de Cooperación sobre Boyas de recopilación de Datos (GCBD)), que emplean boyas que viajan a la deriva con las corrientes por la superficie oceánica o sobre el hielo marino, y proceden a recopilar los datos relativos a las propiedades del agua en la superficie y de la atmósfera inferior; en otros lugares, otros grupos de acción del GCBD, incluido el Programa mundial de derivadores, emplean boyas en el Océano Austral y en las regiones cercanas

a los casquetes polares del resto de cuencas oceánicas.

- En aguas libres de hielo, el programa de flotadores Argo, que emplea flotadores instrumentales que se desplazan a través del océano a una profundidad de 1 000 ó 2 000 metros, ascendiendo cada 10 días aproximadamente para elaborar un perfil vertical de temperaturas y salinidad que se envía a la base vía satélite cuando un flotador alcanza la superficie; a continuación, el flotador repite el ciclo.
- La red de boyas de referencia de estaciones, donde se recopilan las mediciones de las propiedades del océano a través de la columna de agua en el mismo lugar varias veces al año, a fin de ofrecer una imagen del cambio que se produce con el tiempo.
- Observaciones de la superficie del océano efectuadas por teledetección vía satélite, que emplean diversos tipos de instrumentos capaces de medir los cambios en la extensión del hielo marino y las características del mismo, la altura de la superficie del océano (por altimetría), la temperatura de la superficie del mar (mediante radiometría de infrarrojos), la rugosidad de la superficie marina (a través

de dispersómetros) y el color del océano (mediante radiometría con longitudes de onda visibles).

El módulo climático mundial del SMOO se encontraba operativo en un 58% en mayo de 2007, y se prevé que alcance el pleno rendimiento en el año 2014, aunque siguen presentándose importantes desafíos para conseguir este objetivo (Alverson y Baker, 2006). Uno de los retos más notables es el de alcanzar una extensa cobertura del remoto Océano Austral (véase la Figura 2). El hecho de vigilar el Océano Austral supone un desafío vital, puesto que se encuentra extremadamente aislado desde el punto de vista geográfico, ofrece un entorno muy duro para trabajar (especialmente durante el invierno austral) y se halla muy lejos de los centros oceanográficos principales y de las vías marítimas. Se necesitará un esfuerzo mucho mayor del que puede realizarse hoy por hoy para ampliar las observaciones actuales en un SOOS que resulte viable. Hasta que pueda acometerse esta empresa, el Océano Austral será sinónimo de una laguna en el conocimiento necesario para predecir el cambio climático de forma precisa.

Durante el API, las observaciones físicas del Océano Austral se llevarán a cabo mediante diversos medios, principalmente a través de los programas del API que aparecen en la tabla siguiente.

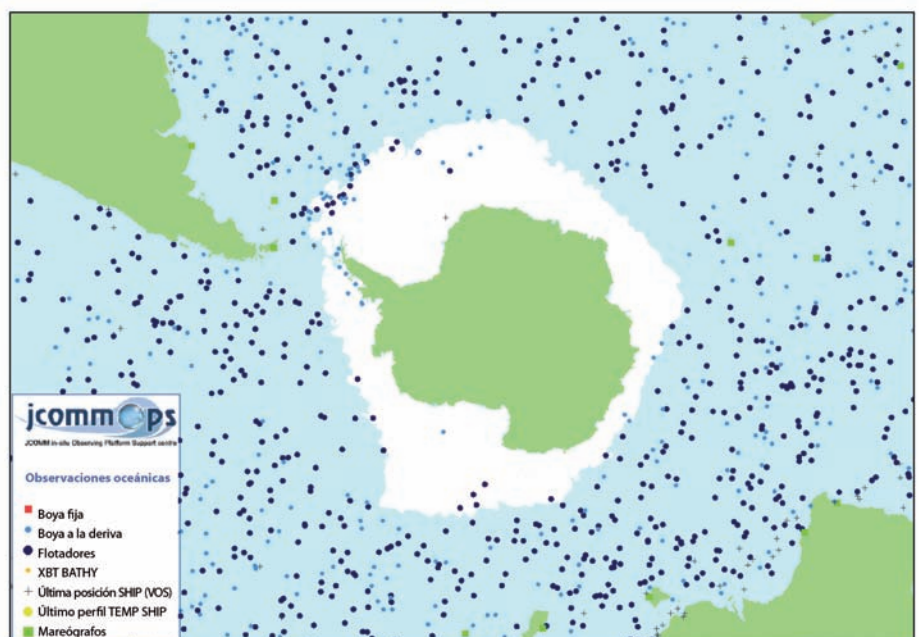


Figura 2 – Observaciones del Océano Austral y de la región antártica, disponibles en tiempo casi real, a 23 de julio de 2007.

Programas oceánicos del API encargados de efectuar mediciones físicas (A = ártico; B = bipolar; S = antártico)

8 (S)	Interacciones sinópticas entre la plataforma y el talud antárticos (SASSI)
13 (B)	Ciencia de las mareas y del nivel del mar
14 (A)	Sistema integrado de observación de los océanos (Si00A)
23 (B)	Circulación termohalina atlántica (BIAC)
40 (A)	Desarrollo de las capacidades de observación y de simulación en el Ártico con vistas a los estudios medioambientales a largo plazo (DAMOCLES)
70 (S)	Capa superior del océano: de África a la Antártida
132 (S)	El clima de la Antártida y del Océano Austral (CASO)
141 (S)	Procesos de hielo marino y clima del Antártico (ASPeCT)
153 (B)	Exploración de los océanos, con mamíferos marinos, de polo a polo (MEOP)
305 (A)	Consortio para la coordinación de la observación y vigilancia del Ártico con fines de evaluación e investigación (COMAAR)
379 (A)	Oceanografía operativa del Océano Ártico y mares contiguos durante el API (SMOO Ártico en el API)

API 8: Estudio sinóptico de las interacciones entre la plataforma y el talud antárticos (SASSI)

Este proyecto, en el que están implicados científicos pertenecientes a 11 países, se encargará de medir la temperatura, la salinidad y la velocidad de flujo del agua sobre la plataforma y el talud continentales, incluyendo los entornos bajo el hielo, a lo largo de transectos cortos a través de la plataforma y el talud continentales de la Antártida (véase la Figura 3). Esto es algo sobre lo que los científicos saben muy poco, pero los datos resultan fundamentales para desarrollar unos mejores modelos climáticos mundiales.

Las pocas mediciones recientes con las que contamos apuntan a que las aguas cercanas a la región antártica reciben aportaciones de agua dulce. Pero, ¿de dónde provienen estas aguas adicionales más dulces? Solamente a través de la medición (especialmente durante el invierno) de las propiedades del agua y de la rapidez con la que esta fluye seremos capaces de comprender los procesos que están teniendo lugar, y asegurarnos de que estos son introducidos en nuestros modelos climáticos de manera correcta. Nunca se ha realizado un esfuerzo conjunto encaminado a efectuar mediciones en la plataforma y el talud continentales de la región antártica durante el invierno. El API está permitiendo que todo el mundo trabaje codo con codo para que esto ocurra, dejando instrumentos sobre el lecho

marino y dentro del agua durante un año, incluso cuando el hielo cubre la superficie marina que hay por encima de ellos. Cada nación se dispone a desplegar instrumentos, de tal manera que, por primera vez, pueda obtenerse una cobertura circumpolar. Además del proceso de recopilación de datos durante el API, algunos de los instrumentos del sistema SASSI se dejarán en el mismo lugar una vez concluido este, ofreciendo

un importante legado para las investigaciones futuras.

API 13: Ciencia de las mareas y del nivel del mar en los océanos polares

La subida del nivel del mar será la responsable de uno de los mayores (y costosos) impactos del cambio climático sobre la sociedad humana, por lo que resulta fundamental recopilar datos precisos relativos a los niveles del mar en todo el mundo. Aunque el nivel del mar se vigila en cientos de puntos a través del Sistema mundial de observación del nivel del mar del consorcio COI-OMM, existen importantes lagunas en lo que respecta a los datos de los océanos Ártico y Austral, puesto que la medición del nivel del mar a lo largo de las remotas líneas costeras polares encierra un desafío técnico considerable. Mediante la mejora de los actuales medidores del nivel del mar que existen en la región antártica, y con la instalación de nuevos dispositivos de alta tecnología en la región ártica y en las islas del Océano Austral que se encarguen de proporcionar datos con una

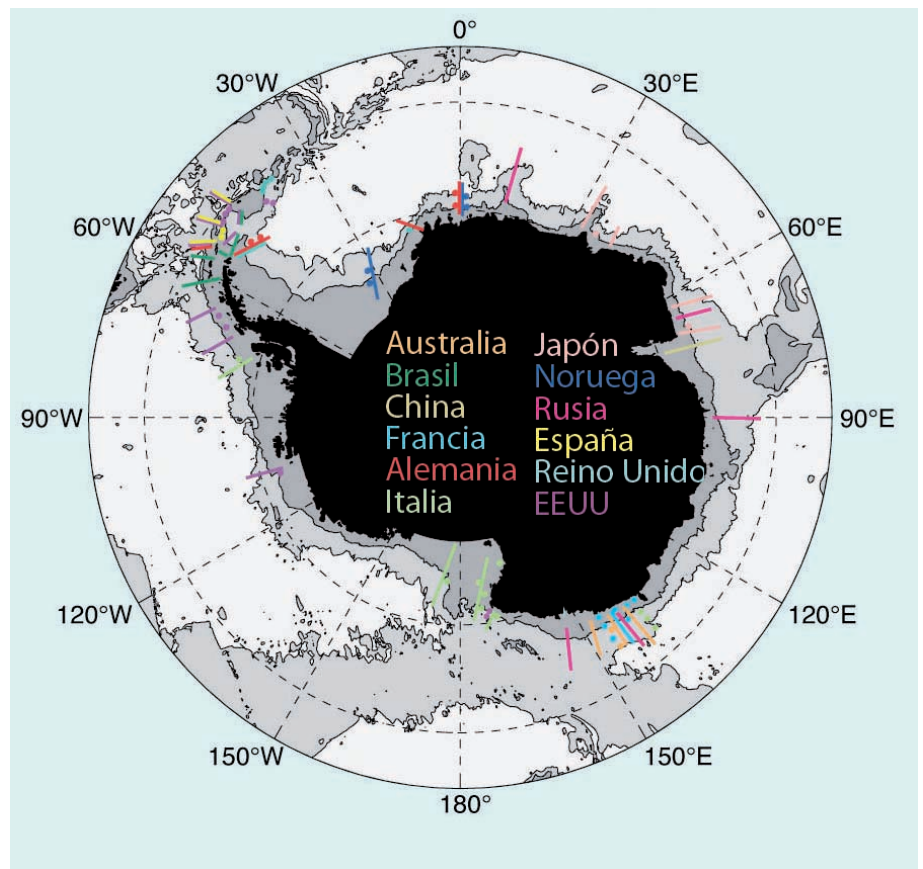


Figura 3—Secciones del registrador de conductividad, temperatura y profundidad/perfilador de corriente de efecto Doppler acústico del programa SASSI y boyas fijas previstas para el API

API 132: El clima de la Antártida y del Océano Austral (CASO)

El programa CASO pretende obtener una instantánea circumpolar sinóptica del entorno físico del Océano Austral (la colaboración con otras actividades del API aumentará la instantánea para incluir en ella los aspectos relacionados con la biogeoquímica, la ecología y la biodiversidad). El programa CASO también está dirigido a mejorar la comprensión del papel del Océano Austral en el clima pasado, actual o futuro, incluyendo las conexiones entre la circulación zonal y meridiana del Océano Austral, la transformación de masas de agua, la variabilidad atmosférica, las interacciones entre el océano y la criosfera, los vínculos físicos, biogeoquímicos y ecológicos, y las teleconexiones entre las latitudes polares y las latitudes bajas.

Los objetivos son:

- mejorar las predicciones climáticas a partir de modelos que incorporen un mayor entendimiento de los procesos polares australes;
- ofrecer evidencias conceptuales de un sistema de observación viable, económico y sostenible para las regiones polares del sur (incluyendo el océano, la atmósfera y la criosfera);
- sentar una referencia para la evaluación de cambios futuros.

El CASO involucra a varios programas de campo importantes:

- un dispositivo circumpolar de secciones hidrográficas multidisciplinares que abarquen todas las profundidades y secciones XBT/XCTD, que se extiendan desde el continente antártico hacia el norte a través de la Corriente Circumpolar Antártica, incluyendo las regiones fundamentales de formación de masas de agua;
- un conjunto circumpolar más completo de dispositivos de hielo marino a la deriva, para medir una gama de parámetros relacio-

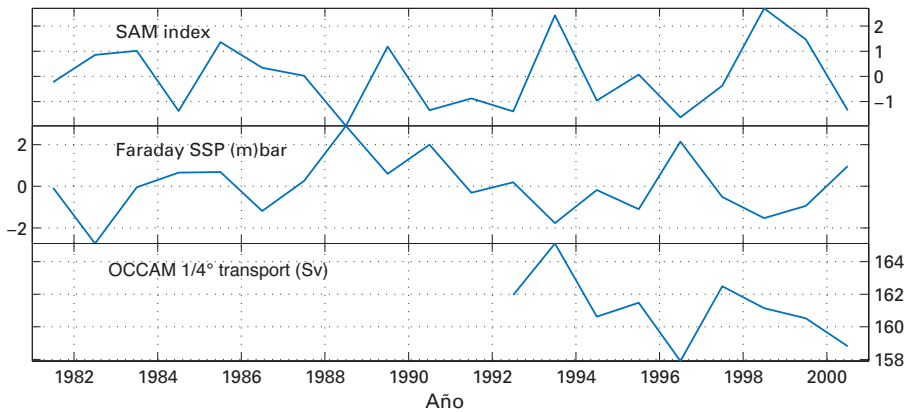


Figura 4 – Variabilidad del transporte de la Corriente Circumpolar Antártica (CCA) en el Paso de Drake, medida por el mareógrafo en la estación de Faraday/Vernadsky de la Península Antártica (línea central): la línea superior marca los oestes circumpolares cambiantes sobre el Océano Austral, que son los responsables de los cambios en el transporte de la CCA; la línea inferior muestra los cambios del transporte correspondientes a un modelo oceanográfico global (de Meredith y otros, 2004).

frecuencia alta y en tiempo real, este proyecto dará con la pieza que falta en el rompecabezas para que los científicos puedan afrontar la vigilancia de la subida del nivel del mar a lo largo y ancho del planeta. Los mismos datos relativos al nivel del mar se pueden emplear para observar los cambios en la circulación de los océanos de latitudes altas, incluyendo la variabilidad del transporte de la Corriente Circumpolar Antártica en sí misma (Figura 4). A su vez, esta información podría ofrecer pistas para adivinar por qué está aumentando el nivel del mar.

API 23: Circulación termohalina bipolar atlántica (BIAC)

Este equipo internacional de oceanógrafos se embarcará en expediciones a los océanos polares a bordo de buques con capacidad para navegar entre el hielo y medir la temperatura, la salinidad, las corrientes, la formación de hielo y la distribución del mismo en el océano, especialmente en los mares de Barents y de Weddell. Para alimentar los modelos numéricos globales, emplearán la teledetección, así como boyas fijas con instrumental anclado en el fondo. El proyecto tratará de estimar el impacto de la formación de agua densa en las regiones polares sobre la circulación oceánica y el clima a nivel mundial. Los dispositivos rompehielos estarán equipados con instrumental a la vanguardia de la tecnología para llevar a cabo estudios del océano y del hielo marino, especialmente aquellos relacionados con

los mecanismos, manifestaciones e impactos de la formación del agua más profunda sobre las plataformas bipolares del Océano Atlántico.

API 70: Vigilancia de la circulación oceánica superior, el transporte y las masas de agua entre África y la región antártica

Contribución del Índico al CASO (véase más adelante)

Los científicos del Índico emplearán las observaciones arrojadas por los batitermógrafos no recuperables y por las sondas no recuperables para la medición de la conductividad, la temperatura y la profundidad (XBT/XCTD) en el sector del Índico del Océano Austral a fin de cartografiar el estado actual y la variabilidad interanual del medio oceánico. Vigilarán la circulación, el transporte zonal y meridiano, el intercambio calorífico entre la superficie y la atmósfera, y la conexión entre los océanos Pacífico e Índico, además de idear una estructura para comprender la variabilidad climática. La variabilidad de un año a otro será controlada mediante la utilización de muestreo repetido procedente de los buques de apoyo logístico a la expedición por la zona antártica del Índico que navegan entre África y Maitri, la estación antártica del Índico. Se llevará a cabo un trabajo hidrográfico adicional en zonas de formación de masas de agua en los mares de Ross y de Weddell, así como en el área subantártica.

nados con el hielo, el océano y la atmósfera;

- flotadores perfiladores desplegados a lo largo del Océano Austral, incluyendo flotadores con registro acústico en zonas cubiertas de hielo;
- boyas fijas para medir la corriente con el fin de proporcionar series temporales de las corrientes oceánicas y de las propiedades de las masas de agua en pasos fundamentales, en centros de acción de los modos dominantes de la variabilidad y en áreas de formación y exportación de agua de fondo;
- sensores medioambientales situados sobre mamíferos marinos;
- medidas directas de las proporciones de mezcla diapícnica e isopícnica en el Océano Austral;
- análisis de núcleos de hielo, núcleos de sedimentos y corales profundos para ampliar las observaciones de la variabilidad del Océano Austral más allá de la era instrumental;
- instrumentos medidores de la presión en el fondo cerca del Paso de Drake, para vigilar las corrientes oceánicas, validar los modelos de mareas y mejorar las correcciones a nivel regional de los productos de los altímetros de satélite;
- estaciones meteorológicas automáticas, medidas del flujo en la capa límite y dispositivos a la deriva para medir la variabilidad atmosférica (presión, vientos, flujo de calor y flujo de agua dulce).

API 153: Exploración de los océanos, con mamíferos marinos, de polo a polo (MEOP)

La recopilación de datos oceanográficos de aguas polares plagadas de hielo resulta costosa y desafiante desde el punto de vista logístico. Más que depender únicamente de los científicos humanos, este proyecto emplea ballenas beluga y cuatro especies de foca

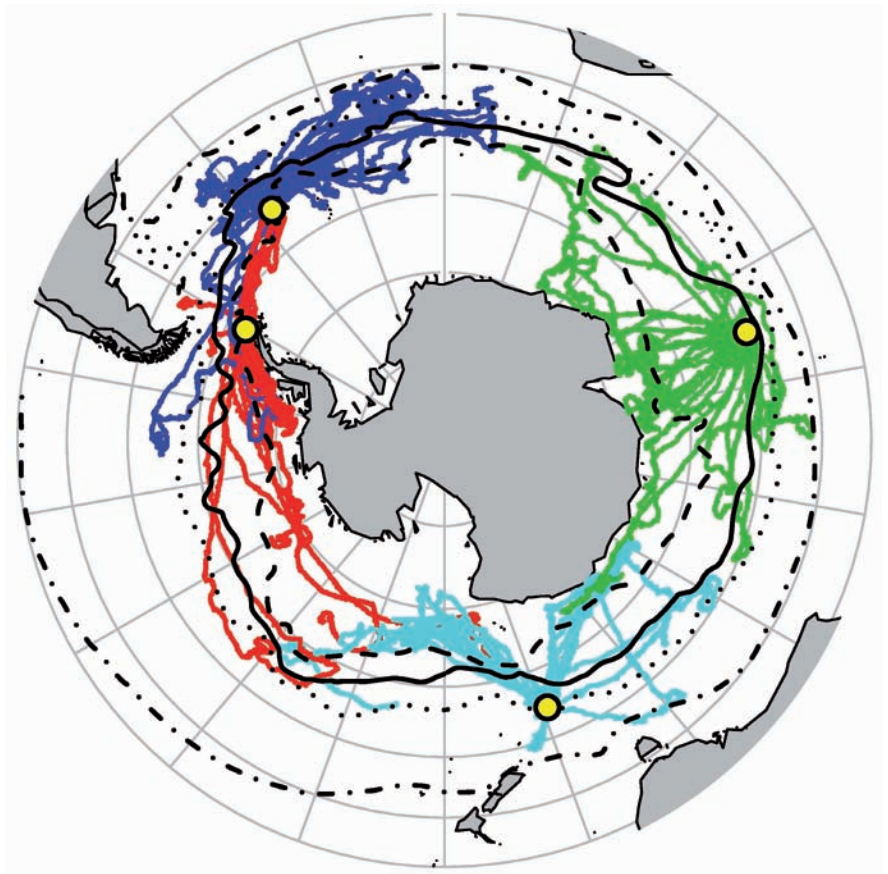


Figura 5 – Rutas de los elefantes marinos portadores de instrumental para registrar los perfiles de temperatura y salinidad en el Océano Austral (de Biuw y otros, 2007)

como exploradores oceánicos encargados de recopilar información acerca de la conductividad (salinidad), la temperatura y la profundidad (CTD) de las aguas árticas y antárticas. Mediante la fijación de etiquetas CTD con la tecnología más avanzada en docenas de estos mamíferos marinos que se desplazan a grandes profundidades, los científicos podrán reunir un jugoso conjunto de datos que ampliará nuestro conocimiento sobre los océanos del mundo, así como sobre el comportamiento de los principales depredadores que habitan en ellos.

El MEOP proporcionará una fuente singular de datos físicos y biológicos fundamentales relativos a los océanos polares. Su enfoque complementará los esfuerzos realizados en muchos otros proyectos del API, y dejará un legado muy útil de datos biológicos y oceánicos, junto con nuevas perspectivas para comprender la interacción de los depredadores marinos y su ecosistema. Un ejemplo del gran potencial de esta tecnología para los sistemas de observación

oceanográfica en las regiones polares lo encontramos en la Figura 5, que muestra la cobertura de datos obtenidos a lo largo del Océano Austral mediante este método durante el período comprendido entre 2004 y 2006.

API 141: Hielo marino (ASPeCt)

El programa relacionado con el hielo marino se encargará de establecer una base cuantitativa para determinar el espesor del hielo circumpolar, con el fin de permitir la comparación entre las distribuciones de espesor del hielo obtenidas por las observaciones efectuadas desde buques y las disponibles a partir de las observaciones validadas de la altimetría del satélite. Se podrá valorar cuantitativamente, entonces, la cubierta de hielo marino antártica para dar respuesta al cambio climático mundial de cara al futuro. Uno de los principales legados será el desarrollo de tecnología satelital validada para observar el espesor de la capa de hielo marino en la Antártida, que podrá emplearse para dilu-

cidar la variabilidad interanual y a más largo plazo de la cubierta de hielo marino de la región antártica tras el API.

Un Sistema integrado de Observación del Océano Ártico (SiOOA)

La naturaleza coordinada del cambio ártico y subártico

Cuando se procede a reconstruir las temperaturas del núcleo de aguas atlánticas a lo largo del Océano Ártico durante la totalidad del siglo pasado, tal y como han hecho Polyakov y otros (2004) (Figura 6), descubrimos, para nuestra sorpresa, que a pesar de una densidad de datos muy variable en el tiempo, aparecen representados cada uno de los principales episodios de la historia hidrográfica del mar de Noruega durante el último siglo (por ejemplo, Dickson y Osterhus, 2007). De esta manera, al igual que en los mares de Noruega y de Barents (véase Helland Hansen y Nansen, 1909), la serie empieza con condiciones de frío extremo en torno al comienzo del siglo pasado, dato recogido por Nansen (1902) durante el largo período a la deriva del *Fram* en la región polar. Este período aparece claramente seguido por otro de calentamiento continuo tras la década de 1920, coherente con “el calentamiento en el norte” que se extendió por el giro del Atlántico Norte (revisado en Dickinson, 2002) y simultáneo al mismo. Después se produjo una brusca reaparición del frío a finales de los años 60 y principios de los 70, acompañando al tránsito de la Gran Anomalía de la Salinidad alrededor del giro norte y el correspondiente desplazamiento extremo hacia el sureste del Frente Polar Oceánico. A partir de entonces, diversos impulsos de calentamiento se expandieron a lo largo del límite oriental, lo que provocó que se dieran las condiciones más cálidas del siglo en la subcapa del Océano Ártico procedente del Atlántico (un incremento de alrededor del 9 por ciento en el contenido calorífico del núcleo de aguas atlánticas entre las décadas de 1970 y 1990, según Polyakov y otros (2004, 2005)).

Las consecuencias de la Figura 6 son: que, en este caso, está implicada la

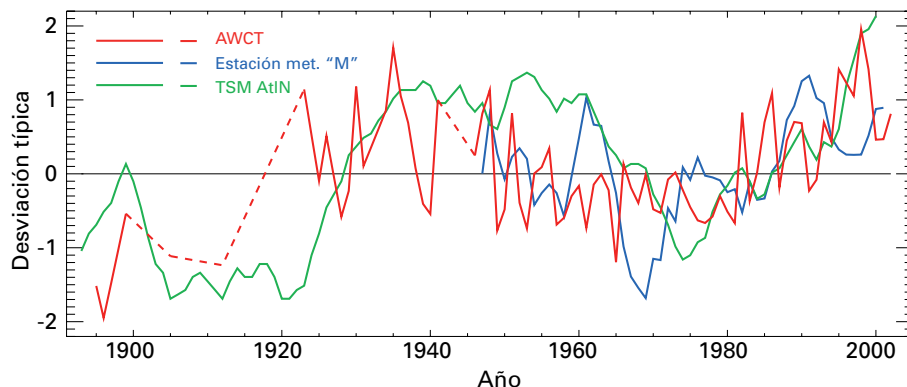


Figura 6 – Comparación, a lo largo de un siglo, entre la temperatura del núcleo de aguas atlánticas (AWCT) a profundidades de subsuperficie del Océano Ártico, la media móvil de 6 años normalizada de la temperatura a 10 m de profundidad en la estación meteorológica oceánica Mike (66°N, 2°E) del mar de Noruega y las anomalías de la temperatura normalizada de la superficie del mar en el Atlántico Norte para la región limitada por las coordenadas 0°-90°N, 70°W-30°E (extraído de Polyakov y otros, 2004, contando con su amable autorización)

totalidad del sistema de cambio ártico/subártico; que los mares del sistema subártico han sido una fuente continua de cambio pluridecenal del Ártico durante el siglo pasado; que el mismo conjunto de motivos que provocaron estos cambios en los mares nórdicos ha contribuido al cambio en la temperatura del núcleo de aguas atlánticas del Ártico; y, que la entrada de calor proveniente del mar de Noruega hacia el Océano Ártico parece seguir produciéndose. El equilibrio de agua dulce en el Ártico, obviamente, también se ve afectado. Hakkinen y Proshutinsky (2004) descubrieron que los “cambios en el flujo de entrada de las aguas atlánticas pueden explicar casi todas las anoma-

lías del agua dulce que se han simulado en la cuenca ártica principal”.

Es comprensible que un punto fundamental del Año Polar Internacional y de gran parte de los programas de investigación que contribuyen a su celebración sea el destino de la cubierta perenne de hielo ártico. La mayor parte de las simulaciones informáticas del sistema oceánico en un clima, con un incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero, predicen un debilitamiento de la circulación termohalina en el Atlántico Norte (la denominada cinta transportadora atlántica) conforme los mares subpolares se vuelvan cada vez menos salinos y más cálidos (los pun-

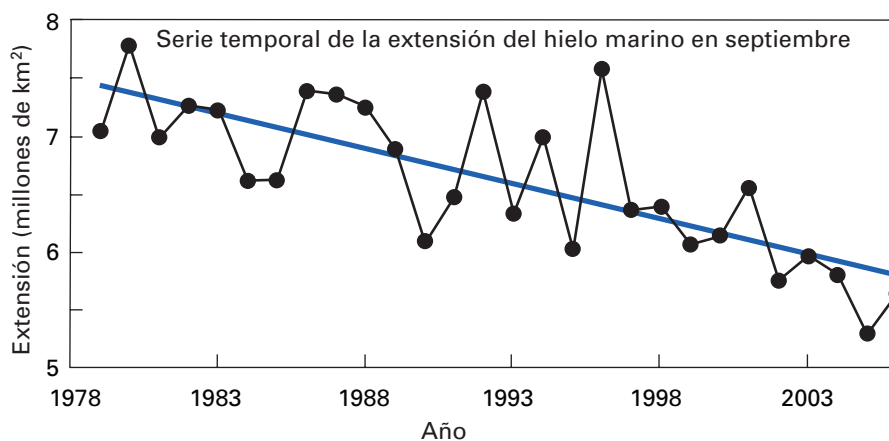


Figura 7 – Extensión del hielo marino en el hemisferio norte en el mes de septiembre, medido de forma remota mediante instrumentos de microondas pasivos, que pone de relieve una reducción a largo plazo hasta alcanzar un mínimo histórico en el año 2005 (fuente: Mark Serreze y Juliene Stroeve, Centro nacional de datos sobre nieve y hielos (NSIDC), Boulder, Colorado, comunicación personal, julio de 2007). Aunque la estimación para septiembre de 2007 aún no ha concluido, la extensión de hielo de 4,42 millones de km² registrada por el NSIDC el 3 de septiembre de 2007 está ya tan por debajo del mínimo anterior (5,32 millones de km² el 20-21 de septiembre de 2005) que es muy probable la consecución de un nuevo mínimo histórico absoluto (véase http://nsidc.org/news/press/2007_seaiceminimum/20070810_index.html).

tos fundamentales para esta previsión podrían extraerse del trabajo pionero de simulación de Bryan (1986), y de Manabe y Stouffer (1988), pasando por la complejidad intermedia de Rahmstorf y Ganopolski (1999), Delworth y Dixon (2000) y Rahmstorf (2003), para llegar finalmente a la complejidad completa de la simulación del sistema terrestre realizada por Mikolajewicz y otros (2007)); y la disminución de la extensión del hielo marino durante las últimas tres décadas (Figura 7) habrá realizado su contribución pertinente al gran flujo de agua dulce desde el Ártico hasta el Atlántico que viene ocurriendo desde mediados de los años 60 (Curry y Mauritzen, 2005). En segundo lugar, podemos prever cambios radicales en el ecosistema de los mares árticos y subárticos tras la reducción, disminución y quizás desaparición del hielo marino perenne. El reciente Informe de evaluación del impacto climático en el Ártico (ACIA) sugiere que el resultado de la supresión de la limitación de luz en zonas que actualmente están cubiertas por hielo perenne podría ser un factor de incremento de 2,5 en la producción principal. En tercer lugar, parece probable que la reducción del albedo del Océano Ártico desde $> 0,8$ hasta $< 0,2$ en un área del tamaño de Europa por la pérdida total prevista de la cubierta de hielo marino a finales de verano tenga algún efecto sobre el clima a una escala comprendida entre el nivel regional y el nivel mundial.

Con semejante variedad de efectos climáticos y ambientales, no resulta sorprendente que los principales esfuerzos investigadores en la región ártica durante el API, como por ejemplo el proyecto a medio plazo de la Comisión Europea (CE) DAMOCLES (que aún a 45 instituciones de investigación de 12 países europeos y está coordinado con Canadá, los EEUU, la Federación Rusa y Japón), el estudio a largo plazo de la Fundación Nacional para la Ciencia de los EEUU sobre el cambio medioambiental en el Ártico (SEARCH) y muchos de los esfuerzos nacionales de investigación, como el programa de oceanografía del Reino Unido a lo ancho de la cuenca sinóptica del Ártico (ASBO) y el programa insignia de Noruega "SiOOA para Noruega" establezcan como objetivo principal el estado actual y el destino futuro del hielo marino perenne de la región ártica. (Deberá advertirse que

el Sistema integrado de Observación del Océano Ártico no es un programa financiado en sí, sino que se trata de un marco panártico diseñado para conseguir una coordinación óptima de los proyectos financiados durante el API. La estructura general se ha configurado para centrarse en el hielo marino de la región ártica; véase Dickson, 2006).

En este artículo contamos con espacio para ofrecer únicamente un breve resumen del estado extremo actual de la afluencia salina y cálida que transcurre en dirección a los polos a lo largo de los límites de los mares nórdicos antes de pasar a describir los planes destinados a comprender los cambios de la cubierta de hielo marino en el seno del Océano Ártico en sí.

La reciente propagación de un calor extremo a lo largo del límite oriental del mar de Noruega y el "sistema" interconectado de procesos responsables

Muy recientemente, la temperatura y la salinidad de las aguas que entran en el mar de Noruega a lo largo de la plataforma y el talud escoceses han alcanzado sus valores más elevados desde hace más de 100 años. En el "otro extremo" del trayecto de entrada, el informe del CIEM sobre el clima oceánico durante 2006 (ICES, en imprenta) mostrará que las temperaturas a lo largo de una sección de la península rusa de Kola, bañada por el mar de Barents ($33^{\circ}33'E$), nunca han sido tan elevadas en más de cien años. La totalidad de otros informes más breves elaborados en ruta y más allá de esta, en la región noruega de Svinoy (Skagseth y otros, en imprenta), en los dispositivos de boyas fijas encargadas de vigilar el estrecho de Fram (Schauer y otros, en imprenta) y en los amarres del sistema de observación de las cuencas de Nansen y Amundsen de Polyakov (NABOS), en el talud del mar de Laptev (Polyakov, 2005; 2007), han puesto de manifiesto el tránsito de este calor; Holliday y otros (2007) han descrito su continuidad a lo largo de la frontera. Esto forma parte de la base lógica de la declaración de Overpeck (2005) relativa a que "cabe la posibilidad de ver, dentro de un siglo, un Océano Ártico sin hielo durante el

verano, algo que nunca ha ocurrido en, al menos, un millón de años".

¿Por qué? ¿Qué es lo que está impulsando este cambio tan extremo en el sistema? Las observaciones de satélite parecen ofrecer una explicación convincente: durante la totalidad de la era TOPEX-POSEIDÓN (desde 1992), según se calentaba el agua del mar del Labrador (Yashayaev y otros, en imprenta), los registros de los altímetros revelaban un leve ascenso de la altura de la superficie del mar en el centro del giro subpolar atlántico, apuntando hacia un debilitamiento constante de la circulación asociada al giro (Hakkinen y Rhines, 2004, en imprenta). Este debilitamiento viene acompañado de un retroceso en dirección oeste del borde del giro, que parece haber funcionado como una especie de "mecanismo de distribución" que controla la temperatura y la salinidad del flujo de entrada en los mares nórdicos (Hatun y otros, 2005). A través de ese mecanismo, cuando el giro era fuerte y se extendía hacia el este (a principios de la década de 1990), los flujos entrantes reclutaban agua más fría y más dulce que provenía directamente del giro subpolar, pero cuando el giro se debilitaba y se desplazaba hacia el oeste (como ocurrió en la década de 2000), las entradas a los mares nórdicos eran capaces de extraer agua más cálida y salina del giro subtropical, explicando así el reciente calentamiento y la salinidad de las entradas de aguas atlánticas en el mar de Noruega. De este modo, aunque los aspectos locales y a corto plazo, ciertamente, han desempeñado su papel al oeste de Noruega –la velocidad de la corriente atlántica se ve forzada a nivel local por los temporales (Skagseth y otros, en imprenta)–, la fuente principal de los cambios observados en el Océano Ártico parece encontrarse en un sistema completo de interacciones de las cuencas polares y subpolares. En la tarea de proporcionar a la cuenca polar un suministro constante de agua cada vez más cálida a través de los mares subárticos se han visto implicados los controles in situ o remotos, tanto a corto como a largo plazo.

Tan solo hemos comenzado a vislumbrar los indicios de este "sistema" en nuestras observaciones. No obstante, los resultados de los modelos también parecen reivindicar el punto de vista de

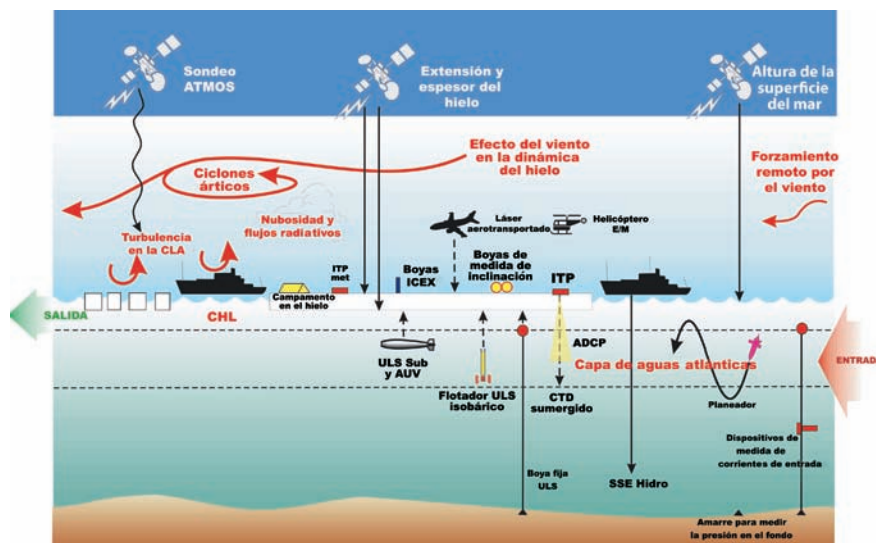


Figura 8 – Esquema de la pila vertical de observaciones desde los satélites hasta el lecho marino, considerada necesaria para dotar de información a un estudio del SiOOA centrado en el estado actual y en el destino futuro del hielo marino perenne de las regiones árticas (para más información, véase Dickson, 2006).

que es el sistema de intercambio global a todas las latitudes entre el Océano Ártico y el Atlántico –y no solo “ejemplos” puntuales del mismo– el que tiene que ser abordado de forma simultánea si pretendemos comprender íntegramente la sutileza del papel que desempeñan nuestros mares septentrionales en el clima. Tal y como concluyeron Jungclaus y otros (2005) a partir de sus experimentos empleando los modelos de Hamburgo ECHAM5 y MPI-OM, aunque “la intensidad de la circulación de retorno [atlántica] está relacionada con la actividad convectiva en las regiones de formación de aguas profundas, y de forma más notable en el mar del Labrador [...], la variabilidad se sostiene a través de una interacción entre el almacenamiento y la liberación de agua dulce desde el Ártico central y los cambios de circulación en los mares nórdicos que vienen causados por las variaciones en el transporte de calor y sal del Atlántico”.

La “pila vertical” de observaciones del SiOOA en el Océano Ártico: desde los satélites hasta el lecho marino

Un componente fundamental del SiOOA y de los programas que lo componen radica en las observaciones directas

del hielo marino y sus controles en el Océano Ártico. Recientemente, como muestra la Figura 7, hemos visto fuertes indicadores de cambios radicales en la extensión y el espesor del hielo marino en la región ártica (por ejemplo, Comiso, 2002; Rothrock y otros, 2003; Serreze, 2003), pero los procesos que gobiernan estos cambios en abso-

luto están claros. En el propio Océano Ártico, bajo la iniciativa del SiOOA, los sondeos de la atmósfera, el hielo marino, la superficie del océano y la capa de nieve terrestre realizados por medio de satélites, buques de superficie, campamentos asistidos en las zonas heladas, plataformas autónomas cautivas en el hielo (ITP) y boas IABP/ICEX (Figura 8) ofrecerán una forma nueva y coordinada de estudiar la situación actual y el futuro del hielo ártico, así como su papel en el clima europeo y mundial.

Los objetivos “atmosféricos” del proyecto DAMOCLES nos permitirán detectar los ciclones árticos con una mayor precisión y cuantificar su contribución al transporte de calor y humedad; nos ayudarán a comprender y simular los procesos de capa límite y los flujos turbulentos en la capa límite atmosférica (CLA) sobre el Océano Ártico; y contribuirán a comprender y a simular la formación y el ciclo de vida de las nubes árticas, las transferencias radiativas a través de la atmósfera ártica y su interacción con el albedo de la superficie de nieve o hielo. La altimetría a partir del radar y del láser satelital seguirá proporcionando estimaciones del espesor del hielo a partir de mediciones directas de francobordo (Laxon y otros, 2003). Por encima del hielo, el láser aerotranspor-

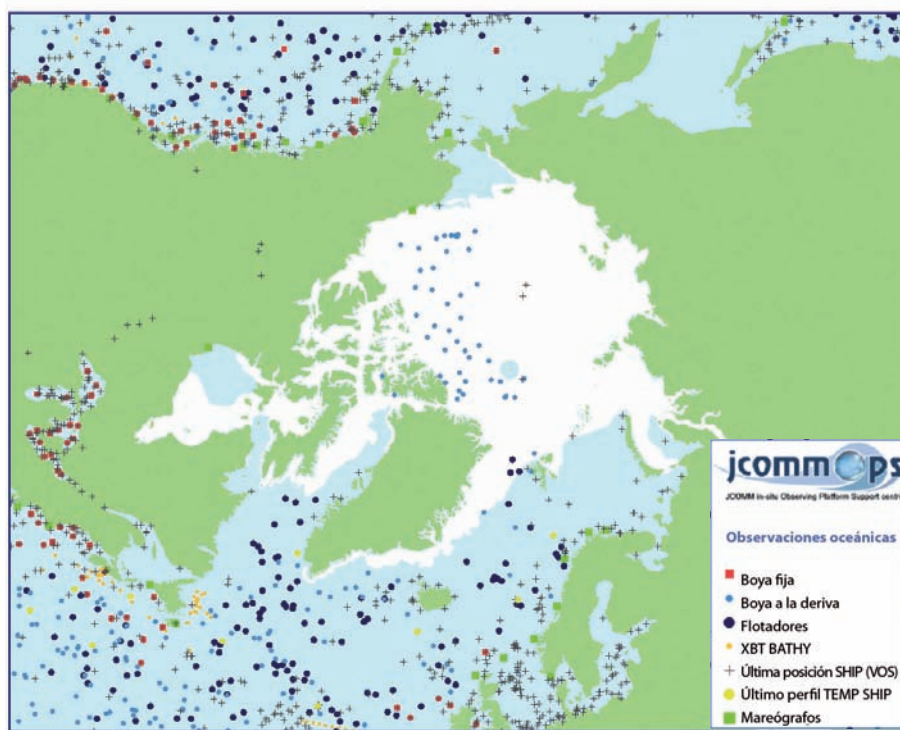


Figura 9 – Disponibilidad de datos existentes en tiempo casi real en las regiones árticas y subárticas el 23 de julio de 2007

tado y los sensores electromagnéticos de helicóptero proporcionarán una calibración y una validación puntual precisa de las mediciones de francobordo de hielo obtenidas vía satélite. A través de la superficie helada, una red de alrededor de una docena de boyas dotadas con medidores de inclinación, y desarrolladas por Wadhams y sus colaboradores, se encargará de medir el espectro energético de las ondas de flexión de gravedad que se propagan a través del hielo, a fin de ofrecer sus propias mediciones, nuevas e independientes, del grosor del hielo, con un procesamiento a bordo y una transmisión de espectros o datos sin procesar por parte de un satélite de órbita baja (Iridium). Bajo el hielo, vehículos subacuáticos autónomos y flotadores, funcionando de forma precisa a presión constante, llevarán consigo un sónar de observación ascendente para validar en mayor grado las estimaciones del satélite relativas al grosor del hielo, mientras que una pequeña serie de dispositivos de medición de la presión de fondo amarrados a lo largo de las cuencas profundas del Ártico (Figura 8) proporcionará los datos reales en tierra necesarios para obtener estimaciones de la circulación del Océano Ártico a partir de mediciones por teledetección de la altura de la superficie del mar.

Aunque se trata de sistemas nuevos en su totalidad, todos ellos existen o estarán disponibles en un futuro inmediato, y con su utilización, por primera vez se podrán realizar mediciones directas o estimaciones validadas de la circulación, la estratificación y el volumen de hielo del Océano Ártico, con una resolución entre mensual y estacional.

Hacia la puesta en marcha

En abril de 2007 comenzó el API. En aquel momento, pasamos de la fase de planificación inicial a la fase de ensamblar las técnicas y las colaboraciones que convertirían una estructura "potencial" SiOOA en un programa real y financiado. La utilización de estos estudios novedosos a una escala panártica constituye un emocionante desafío (Figura 9). Dos ejemplos, actualmente en proceso, lo pondrán de manifiesto.

Bajo los auspicios del componente CE-DAMOCLES del SiOOA, una amplia serie integrada de flotadores y planeadores (Figura 10) elaborará los perfiles subsu-

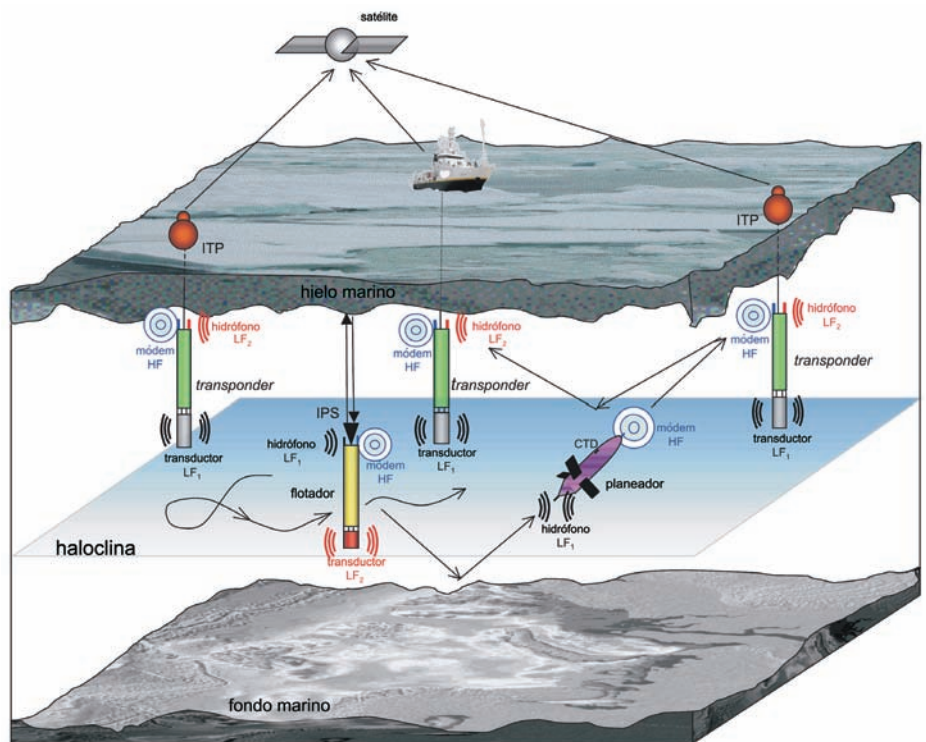


Figura 10 – El esquema de observación oceánica para el caso del Océano Ártico que se está empleando actualmente en el proyecto integrado DAMOCLES de la CE-EP6. Un amplio sistema de flotadores y planeadores se encargará de explorar la parte superior del océano, y procederá a comunicar sus datos a los satélites y a recibir la información relativa a la navegación y al control de las mediciones a través de una red de plataformas cautivas en el hielo.

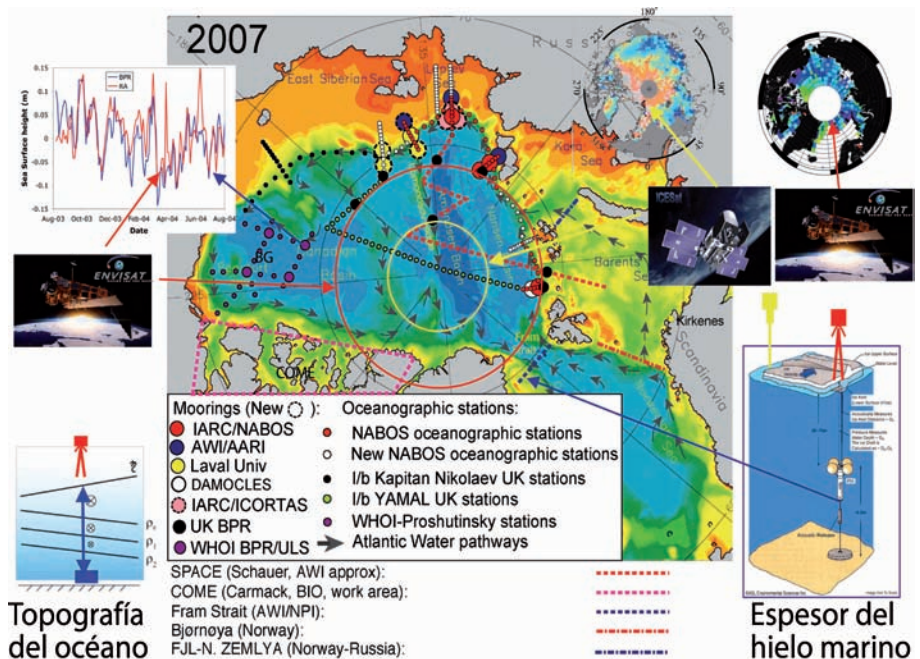


Figura 11 – Planes del programa oceanográfico de colaboración SiOOA a través del Océano Ártico en el verano de 2007

perficiales a lo largo de toda la columna superior de agua del Océano Ártico (haciendo hincapié en los 800 m superiores, aunque con incursiones hasta los

2 km de profundidad), explorando y describiendo de esta manera tanto la capa haloclina fría variable (véase la Figura 8) como la subcapa variable proveniente

del Atlántico, comunicando los datos a los satélites y recibiendo la información de la navegación y del control de las mediciones a través de una red de plataformas cautivas en el hielo. Puesto que se han propuesto diversos diseños de ITP (por parte de US-SEARCH, NOAA y la *Woods Hole Oceanographic Institution*, así como de CE-DAMOCLES), sus operaciones, despliegue, comunicaciones y sistemas de datos requerirán una coordinación. Algunas ITP emplearán el perfilado de dispositivos CTD a través de la columna superior de agua, y vigilarán la estructura vertical de las corrientes del océano empleando perfiladores acústicos de corrientes por efecto Doppler, a la par que procederán a cumplir su papel tradicional de recopilación de datos meteorológicos en la superficie de hielo.

Como segundo ejemplo, la Figura 11 ilustra la colaboración recientemente establecida y con un funcionamiento eficaz entre el programa bandera ASBO, perteneciente al NERC del Reino Unido, el estudio NABOS (IARC Fairbanks) de Igor Polyakov, el Proyecto de exploración del giro Beaufort (WHOI) de Andrey Proshutinsky, y el programa SPACE de Ursula Schauer (Departamento de medio ambiente y clima panártico sinóptico; Instituto Alfred Wegener de investigación polar y marina (AWI), Bremerhaven), entre otros programas que se relacionan.

A través de esta colaboración, estos proyectos afrontan la tarea fundamental de cuantificar el contenido de hielo y de agua dulce existente en el Océano Ártico. Los paneles que aparecen a la derecha de la Figura 11 muestran mapas de elevación empleando el altímetro del radar del Envista (hasta 81,5°N) y el sistema láser del ICESat (hasta 86°N); como el láser mide hasta la parte superior de la nieve y el radar hasta la parte superior del hielo, su diferencia debería reflejar la profundidad de la nieve, así como el grosor del hielo. El tramo transártico Reino Unido-Estados Unidos del pesado buque rompehielos ruso *Yamal* (mapa principal) aporta la conexión necesaria entre el margen siberiano oriental y el lado euroasiático (el proyecto AWI SPACE), indispensable para encerrar el Ártico en las "casillas" que se requieren con el fin de elaborar los cálculos de flujo conservativo para la totalidad del Océano Ártico. Los paneles de la

izquierda de esta figura dan a conocer las emocionantes noticias (Seymour Laxon, Andy Ridout y Andrey Proshutinsky; comunicación personal) de que la primera comparación de la altura de la superficie marina, deducida de los datos del registrador de la presión de fondo en el mar de Beaufort y los medidos por el altímetro del radar del Envista, muestra que es posible, ahora, recuperar la topografía dinámica del océano a nivel de centímetros (y, por tanto, las mediciones de la circulación del Océano Ártico), incluso en la presencia de hielo.

El espacio no nos permite una descripción más completa de los nuevos sistemas que se emplearán a través de los mares del norte durante el API, y son muchos. No obstante, estos dos ejemplos ponen de relieve los considerables beneficios científicos que deberán obtenerse cuando los recursos disponibles de mano de obra, equipamiento y plazos de transporte se centren por un tiempo en el problema de los mares septentrionales y sus cambios, de la manera en que solo podrían llevarse a cabo en un Año Polar Internacional y como se realizará en el programa SiOOA.

Planificación del legado

El 15 de julio de 2006 tuvo lugar un seminario en Hobart (Australia), patrocinado por el CCIA, la Asociación para la observación de los océanos mundiales (POGO) y el Censo de vida marina antártica (CAML), con la intención de analizar el interés en marcha de un SOOS como parte del legado del API. Los participantes estuvieron de acuerdo en que era muy deseable disponer de un SOOS, y procedieron a constituir un comité de planificación para llevarlo hacia delante. En Bremen (Alemania), del 1 al 3 de octubre de 2007, se celebrará un seminario para elaborar un borrador de plan de SOOS a grandes rasgos. Este plan preliminar se hará circular ampliamente para que pueda consultarse antes de ser refinado en un seminario a celebrar en San Petersburgo (Federación de Rusia), en julio de 2008 (en asociación con la trigésima reunión del CCIA); se prevé publicarlo a finales de 2008. El documento informará sobre el plan científico del SOOS y estará disponible para las naciones individuales con intereses en el Océano Austral y para organizaciones como la COI y la OMM, con el fin

de decidir cuál es la mejor manera de aplicar el plan.

Al mismo tiempo, las naciones han dado pasos importantes hacia la creación de un Sistema de observación del Ártico (Lyons y otros, 2006), con contribuciones que van desde las alianzas regionales del SMOO existentes, como el EuroSMOO, los grupos internacionales como el Comité científico internacional del Ártico y el Consejo de las ciencias del Océano Ártico, además de, obviamente, agencias nacionales en los Estados Miembros interesados. En su XXIV Asamblea, celebrada en 2007, la COI aprobó una resolución titulada "Programa de acción para el SMOO", en la que se incluía la decisión de "desarrollar planes y compromisos para construir y conservar las redes de observación oceánica en las regiones polares como un legado de las actividades relacionadas con el Año Polar Internacional". Con seguridad, los nuevos resultados y sorpresas que se deriven de semejante esfuerzo concentrado de observación a través de ambos mares polares serán los que proporcionarán el estímulo principal para hacer que se cumpla esa resolución.

Conclusiones

Los océanos polares se encuentran extremadamente poco muestreados. Los programas SMOO y SMOC nunca funcionarán al cien por cien a menos que podamos encontrar una manera de recoger muestras de los océanos polares de manera rutinaria y económica, con un nivel adecuado de cobertura para dilucidar los principales procesos oceanográficos y meteorológicos marinos que tienen lugar en dichos océanos y que influyen en la variabilidad climática. Los océanos polares son también las partes de los océanos que están cambiando a un ritmo más elevado como reacción al calentamiento global. Es imprescindible que vigilemos este rápido cambio hoy en día, puesto que es probable que sea el precursor de cambios en otros lugares, y puede alertarnos sobre las posibilidades. Dado que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ha emprendido una línea de actuación muy conservadora a la hora de apuntar el índice de cambio del nivel del mar durante los próximos 100 años, y debido al hecho de que el hielo derretido por

el calentamiento de los océanos podría provocar un cambio mucho más rápido y pronunciado (hasta 5 m; Hansen, 2007) en el mismo período, nos corresponde a nosotros la tarea de prestar una atención mucho mayor al comportamiento de los océanos polares.

Agradecimientos

Queremos manifestar nuestro agradecimiento, por los comentarios, sugerencias y aportaciones que han efectuado, a Karen Heywood y Kevin Speer, quienes han conseguido mejorar sobremanera el artículo.

Referencias

ALLISON, I., M. BÉLAND y otros, 2007: The scope of science for the International Polar Year 2007-2008, WMO/TD-No.1364.

ALVERSON, K. y D. J. BAKER, 2006: Taking the Pulse of the Oceans, *Science*, 314, 1657.

AOKI, S., 2002: Coherent sea level response to the Antarctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (20), 10.1029/2002GL015733, 2002.

BIJW, M., L. BOEHME, C. GUINET, M. HINDELL, D. COSTA, J.-B. CHARRASSIN, F. ROQUET, F. BAILLEUL, M. MEREDITH, S. THORPE, Y. TREMBLAY, B. McDONALD, Y.-H. PARK, S. R. RINTOUL, N. BINDOFF, M. GOEBEL, D. CROCKER, P. LOVELL, J. NICHOLSON, F. MONKS y M. A. FEDAK, 2007: Variations in behaviour and condition of a Southern Ocean top predator in relation to in situ oceanographic conditions. Proceedings of the National Academy of Sciences, en imprenta.

BOYER, T. P., S. LEVITUS, J. I. ANTONOV, R. A. LOCARNINI y H. E. GARCÍA, 2005: Linear trends in salinity for the World Ocean, 1955-1998. *Geophys. Res. Lett.* 32, L01604.

BRACEGIRDLE, T. J., W. M. CONNOLLEY y J. TURNER, 2007: Antarctic climate change over the Twenty First Century. *J. Geophys. Res.*, en imprenta.

BRYAN, F., 1986: High latitude salinity effects and inter-hemispheric thermohaline circulations. *Nature*, 323, 301-304.

COMISO, J. C., 2002: A rapidly declining Arctic perennial ice cover, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (20), 1956, doi: 10.1029/2002GL015650.

CURRY, R. y C. MAURITZEN, 2005: Dilution of the Northern North Atlantic Ocean in Recent Decades. *Science*, 308 (5729): 1772-1774.

DELWORTH, T. L. y K. W. DIXON, 2000: Implications of the recent trend in the Arctic/North Atlantic Oscillation for the North Atlantic thermohaline circulation. *J. Climate.*, 13, 3721-3727.

DICKSON, R. R., 2002: Variability at all scales and its effect on the ecosystem—an overview. *Proc. ICES Hist. Symp. Helsinki*, August 2000. ICES Mar. Sci. Symp. Ser., 215, 219-232.

DICKSON, R. R., 2006: The integrated Arctic Ocean Observing System (iAOS): an AOSB-CLIC Observing Plan for the International Polar Year. *Oceanologia*, 48 (1) 5-21.

DICKSON, R. R. y S. ØSTERHUS, 2007: One hundred years in the Norwegian Sea. *Norsk Geografisk Tidsskrift.*, 61:2, 56-75. doi:1080/00291950701409256.

FYFE, J. C. y O. A. SAENKO, 2005: Human-induced change in the Antarctic Circumpolar Current. *J. Climate*, 18, 3068-3073.

FYFE, J. C., 2006: Southern Ocean Warming Due to Human Influence, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L19701, doi:10.1029/2006GL027247.

GILLE, S. T., 2002: Warming of the Southern Ocean since the 1950s. *Science*, 295, 1275-1277.

GILLE, S. T., 2003; Float observations of the Southern Ocean: Part 1, Estimating Mean Fields, Bottom Velocities and Topographic Steering. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1167-1181.

GILLE, S. T., 2007: Decadal-scale temperature trends in the Southern Hemisphere ocean. Submitted to *J. Climate*.

GLOERSEN, P., W. J. CAMPBELL, D. J. CAVALIERI, J. C. COMISO, C. L. PARKINSON y H. J. ZWALLY, 1992: *Arctic and Antarctic Sea Ice, 1978-1987: Satellite Passive-*

Microwave Observations and Analysis. NASA Pub. SP-511, NASA Scientific and Technical Information Program, Washington DC.

HAKKINEN, S. y P. B. RHINES, 2004: Decline of subpolar North Atlantic circulation during the 1990s. *Science*, 304, 555-559.

HAKKINEN, S. y A. PROSHUTINSKY, 2004: Freshwater content variability in the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 109, C03051. doi:10.1029/2003JC001940.

HAKKINEN, S., H. HATUN y P. RHINES, 2008: Satellite evidence of change in the Northern Gyre. En: Arctic-subarctic Ocean Fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate. Springer, en imprenta.

HANSEN, J., 2007: Scientific reticence and sea level rise. *Environ. Res. Lett.* 2 (2007) 024002 (<http://stacks.iop.org/1748-9326/2/024002>).

HATUN, H., A. B. SANDØ, H. DRANGE, B. HANSEN y H. VALDIMARSSON, 2005: Influence of the Atlantic Subpolar Gyre on the thermohaline circulation. *Science*, 309, 1841-1844.

HELLAND-HANSEN, B. y F. NANSEN, 1909: *The Norwegian Sea. Its physical oceanography based upon the Norwegian researches 1900-1904*. Report on Norwegian Fishery and Marine Investigations, Volume II, Part I, Chapter 2.

HOGG, A. MCC., M. P. MEREDITH, J. R. BLUNDELL y C. WILSON, 2007: Eddy heat flux in the Southern Ocean: response to variable wind forcing. *J. Climate*, en imprenta.

HOLLIDAY, N. P., S. L. HUGHES, A. LAVIN, K. A. MORK, G. NOLAN, W. WALCOWSKI y A. BRESZCZYNSKA-MOLLER, 2007: The end of a trend? The progression of unusually warm and saline water from the eastern North Atlantic into the Arctic Ocean. *CLIVAR Exchanges* 12, (1) pp. 19-20 + figs.

HUGHES, C. W., P. L. WOODWORTH, M. P. MEREDITH, V. STEPANOV, T. WHITWORTH III y A. PYNE, 2003: Coherence of Antarctic sea levels, Southern Hemisphere Annular Mode, and flow through Drake

- Passage, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (9), 10.1029/2003GL017240.
- ICES [CIEM], 2007: *CIEM Report on Ocean Climate 2006*. ICES Cooperative Research Report.
- JACOBS, S. S., 2006: Observations of change in the Southern Ocean. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 364, 1657-1681.
- JUNGCLAUS, J. H., H. HAAK, M. LATIF y U. MIKOLAJEWICZ, 2005: Arctic-North Atlantic interactions and multidecadal variability of the meridional overturning circulation. *J. Climate*, 18, 4013-4031.
- LAXON S., N. PEACOCK y D. SMITH, 2003: High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region, *Nature*, 425 (6961), 947-950.
- LYONS, W. B. y otros, 2006: *Toward an Integrated Arctic Observing Network*, Polar Research Board, National Research Council, National Academies Press.
- MANABE, S. y R. J. STOUFFER, 1988: Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 1, 841-866.
- MARSHALL, G. J., A. ORR, N. P. M. VAN LIPZIG y J. C. KING, 2006: The impact of a changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula summer temperatures. *J. Climate*, 19, 5388-5404.
- MEREDITH, M. P., P. L. WOODWORTH, C. W. HUGHES y V. STEPANOV, 2004: Changes in the ocean transport through Drake Passage during the 1980s and 1990s, forced by changes in the Southern Annular Mode. *Geophys. Res. Lett.*, 31(21), L21305, 10.1029/2004GL021169.
- MEREDITH, M. P. y J. C. KING, 2005: Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19604, 10.1029/2005GL024042.
- MEREDITH, M. P. y A. McC. HOGG, 2006: Circumpolar response of Southern Ocean eddy activity to changes in the Southern Annular Mode. *Geophys. Res. Lett.*, 33(16), L16608, 10.1029/2006GL026499.
- MIKOLAJEWICZ, U., M. GROGER, E. MAIER-REIMER, G. SCHURGERS, M. VIZCAINO y A. M. E. WINGUTH, 2007: Long-term effects of anthropogenic CO₂ emissions simulated with a complex earth system model. *Clim. Dyn.* doi 10.1007/s00382-006-0204-y.
- OVERPECK, J. y coautores, 2005: Arctic system on trajectory to new seasonally ice-free state. *EOS*, 86, 34, 312, 313.
- POLYAKOV, I.V. y colaboradores, 2004: Variability of the intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the last 100 years. *J. Climate*, 17, 4485-4497.
- POLYAKOV, I. V., A. BESZCZYNSKA, E. CARMACK, I. DMITRENKO, E. FAHRBACH, I. FROLOV, R. GERDERS, E. HANSEN, J. HOLFORT, V. IVANOV, M. JOHNSON, M. KARCHER, F. KAUKER, J. MORRISON, K. ORVIK, U. SCHAUER, H. SIMMONS, Ø. S. KAGSETH, V. SOKOLOV, M. STEELE, L. TIMKHOV, D. WALSH y J. WALSH, 2005: One more step toward a warmer Arctic, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17605, doi:10.1029/2005GL023740.
- POLYAKOV, I., L. TIMOKHOV, I. DMITRENKO, V. IVANOV, H. SIMMONS, F. McLAUGHLIN, R. DICKSON, E. FAHRBACH, J.-C. GASCARD, P. HOLLIDAY, L. FORTIER, E. HANSEN, C. MAURITZEN, J. PIECHURA, U. SCHAUER y M. STEELE, 2007: The International Polar Year under the banner of Arctic Ocean warming. *EOS*, en imprenta.
- RAHMSTORF, S. y A. GANOPOLSKI, 1999: Long term global warming scenarios, computed with an efficient climate model. *Clim. Change*, 43, 353-367.
- RAHMSTORF, S., 2003: Thermohaline Circulation: the current climate. *Nature*, 421, 699.
- ROBERTSON, R., M. VISBECK, A. L. GORDON y E. FAHRBACH, 2002: Long-term temperature trends in the deep waters of the Weddell Sea. *Deep-Sea Res. II*, 49, 4791-4806.
- RINTOUL, S. R., 2007: Rapid freshening of Antarctic Bottom Water formed in the Indian and Pacific oceans. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06606, doi:10.1029/2006GL028550.
- ROTHROCK, D. A., J. ZHANG y Y. Yu, 2003: The arctic ice thickness anomaly of the 1990s: A consistent view from observations and models, *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), 3083, doi: 10.1029/2001JC001208.
- SCHAUER, U., A. BESZCZYNSKA-MÖLLER, W. WALCZOWSKI, E. FAHRBACH, J. PIECHURA y E. HANSEN, 2008: Variation of measured heat flow through the Fram Strait between 1997 and 2006. En: *Arctic-subarctic Ocean Fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate*. Springer, en imprenta.
- SKAGSETH O., T. FUREVIK, R. INGVALDSEN, H. LOENG, K. A. MORK, K.-A. ORVIK y V. OZHIGIN, 2008: Volume and heat transports to the Arctic Ocean via the Norwegian and Barents Sea. En: *Arctic-subarctic Ocean Fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate*. Springer, en imprenta.
- SERREZE, M. C., J. A. MASLANIK, T. A. SCAMBOS, F. FETTERER, J. STROEVE, K. KNOWLES, C. FOWLER, S. DROBOT, R. G. BARRY y T. M. HARAN, 2003: A record minimum in arctic sea ice extent and area in 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (3), 1110, doi: 10.1029/2002GL016406.
- THOMPSON, D. W. J. y S. SOLOMON, 2002: Interpretation of recent southern hemisphere climate change. *Science*, 296, 895-899.
- WEYPRECHT, K., 1875: *Principes fondamentaux de l'exploration arctique*. Vienna, W. Stein.
- YASHAYAEV, I., N. P. HOLLIDAY, M. BERSCH y H. VAN AKEN, 2008: The history of Labrador Sea Water: production, spreading, transformation and loss. En: *Arctic-subarctic Ocean Fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate*. Springer, en imprenta.