

# EL HIELO MARINO DE LATITUDES POLARES: EVOLUCIÓN ANUAL E INTERANUAL (1979-2008)

**M<sup>a</sup> Eugenia Pérez González y M<sup>a</sup> Pilar García Rodríguez\***

Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física  
Universidad Complutense de Madrid

## RESUMEN

En este trabajo se analiza la variabilidad del hielo marino del período 1979-2008 a partir de los datos e imágenes facilitados por el «National Snow and Ice data Center» (NSIDC). Estos datos se relacionan con la temperatura media anual.

La media anual de la superficie de hielo marino (1979-2008) es muy similar en ambos polos, aunque su evolución temporal es opuesta en ambos hemisferios. En el Océano Ártico se produce un descenso brusco de la superficie del hielo durante este período, con una recuperación notable en 2008. Frente a ello, en los mares que circunvalan la Antártida hay un incremento de la extensión del hielo, especialmente en los últimos quince años, con un valor máximo en 2008.

Respecto al total del hielo marino la evolución de 1979-2008 arroja un balance deficitario entre hemisferios, pues es mayor el descenso del hielo en el Ártico que el incremento en la Antártida.

**Palabras clave:** hielo marino, polos, temperatura, tendencias.

## ABSTRACT

In this paper the intra-annual and interannual variability of the marine ice is analysed over the period 1979 to 2008 from the data and images facilitated by the «National Snow and Ice dates Center» (NSIDC). These data are related to the annual average temperature.

The annual average of the marine ice surface area (1979-2008) is very similar in both poles, although its temporary evolution is opposed in both hemispheres.

---

Fecha de recepción: febrero 2009.

Fecha de aceptación: septiembre 2009.

\* Dpto. Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid. C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid. meperez@ghis.ucm.es

In the Arctic Ocean there is an abrupt reduction of the surface area of the ice during this period, with a remarkable recovery in 2008. As opposed to it, the marine seas surrounding the Antarctic show an increase of the extension of the ice, especially in the last fifteen years, with a maximum value in 2008.

With respect to the total of the marine ice over the period 1979 to 2008, there is an overall deficit balance, because the reduction of the Arctic ice is greater than the increase of the Antarctic ice.

**Key words:** marine ice, poles, temperature, tendencies.

## I. INTRODUCCIÓN

Una de las principales consecuencias que prevé la hipótesis del «Cambio Climático» es la disminución de los hielos marinos y continentales como consecuencia de un clima más cálido. Esto, además de modificar drásticamente muchos ecosistemas produciría un ascenso apreciable del nivel de los mares y océanos con nuevos cambios en muchos litorales e islas con escasa altura, muy frecuentes en el Pacífico central y oriental. Esta hipótesis podría cumplirse en la medida en la que el Cambio Climático venga acompañado por un calentamiento global (IPCC, 2007). Sin embargo, frente a la abrumadora corriente a favor del Cambio Climático, abanderado por el propio Panel Intergubernamental para el cambio climático (Jones *et al.*, 1999; NRC, 2000; Santer *et al.*, 1995, Held & Soden, 2006; Sigro *et al.*, 2008, etc.), son muchas las voces que, al menos, tratan de discutir tanta unanimidad en un tema tan complejo como es el clima de la Tierra, su previsión en décadas venideras y, sus repercusiones en el conjunto del Planeta (Lindzen, 1992, 1999 y 2007; Michael & Knappenberger, 1996; Singer, 2001; Singer & Avery, 2007; Pérez González, 2006; Pérez González y García Rodríguez, 2006; Holland, 2007; Singer *et al.*, 2008; Sanz Donaire, 2008, etc).

Cabe destacar estudios previos sobre el hielo marino del Ártico (Parkinson *et al.*, 1999 y Parkinson, 2000), en los que se analizan la extensión, variabilidad y tendencias entre 1978 y 1996. Aquí se completa hasta el 2008 y se incluye, además, la Antártida, que está siendo objeto de numerosos estudios en la actualidad (Comiso, 2000; Vaughan, 2003; Turner *et al.* 2005 y Chapman & Walsh, 2007). Debe recordarse que el hielo marino es agua oceánica congelada, por lo que tendrá una respuesta directa en la temperatura de la superficie del mar (pues no tiene mucho espesor) y la del aire.

La superficie del hielo marino puede diferenciarse de los hielos continentales que llegan al mar en las costas del continente más austral gracias a las múltiples imágenes de satélite. Así, los satélites artificiales han permitido una mejor observación de los hielos polares, ya que permiten un control regular y a distancia de aquellas áreas de difícil acceso.

Las primeras imágenes, captadas en 1978, correspondieron al satélite NIMBUS 7, lanzado en octubre de 1978, con órbita polar heliosíncrona. El sensor utilizado es un radiómetro multicanal de microondas SMMR. Este satélite estuvo activo hasta 1994. A las imágenes de este satélite le sustituyó un sensor de microondas SSM/I, del programa de la NASA, DMSP (programa de satélites meteorológicos de Defensa), con los satélites F08 a F15 que abarcan los años 1991 a 2006.

Junto con estos datos se han utilizado los obtenidos por otro tipo de satélites, algunos oceanográficos, como el americano NOAA (AVHRR) y algunos meteorológicos, como los satélites geoestacionarios METEOSAT que, aunque no estaban fabricados para estudios específicos de masas de hielo, han mostrado su utilidad en este campo.

Junto a ellos, cabe destacar el satélite de Estados Unidos ICESAT (satélite de elevación terrestre y nube de hielo) que se lanzó en 1993 y ha captado los cambios de hielo en ambos polos mediante su altímetro Geociencia. Junto con el RADARSAT (satélite canadiense) ha medido el hielo en la Antártida, en un programa conjunto entre EE.UU. y Canadá. Además el satélite Radarsat se ha utilizado para medir el hielo en Groenlandia (junto con datos de los satélites europeos ERS 1 y 2 y Envisat) durante los años 2000-2005. El satélite de la NASA QuickScat (también con radar) ha medido cambios en los contenidos de hielo y nieve en el hemisferio norte desde 1999 a 2005. En general, todos los sistemas que llevan altímetros de radar (diseñados originalmente para medir la altura de la superficie del mar) son muy útiles para medir cambios en grandes superficies de hielo. La interferometría radar (INSAR) se utiliza para medir exactamente el patrón espacial de los cambios y deducir las causas físicas de estos cambios en la superficie del hielo.

En el siglo XXI destaca la utilización del satélite de la Agencia Espacial Europea Envisat (con el sensor de radar ASAR) que envía imágenes desde el 2002 y que ha permitido constatar la reducción reciente de la masa de hielo en el Polo Norte. También es importante el programa EOS de la NASA que lanzó en 2002 el satélite AQUA con dos aparatos que sirven para analizar el estado de los hielos polares: el sensor MODIS, con un espectroradiómetro que abarca longitudes de onda del visible e infrarrojo y el sensor AMSR-E que es un radiómetro pasivo de microondas.

Además de estos satélites se han empleado también, para ver los cambios en los polos, satélites construidos con el fin de analizar el campo de gravedad terrestre. Así, los dos satélites gemelos GRACE miden la gravedad bajo el hielo polar.

En cuanto al futuro, la Agencia Espacial Europea ha apostado por invertir en satélites que estudien el clima de la tierra y, con especial énfasis, los cambios en las capas de hielo. Dos satélites de la familia «Exploradores de la Tierra» dedicados a estudiar el clima y que forman parte del programa europeo «Planeta vivo», servirán para estudiar los polos: próximamente entrará en funcionamiento el satélite GOCE (Explorador del Campo gravitatorio y circulación oceánica) que permitirá estudiar la dinámica de los casquetes polares y algunos meses después está previsto el lanzamiento (programado en principio para el mes de marzo de 2009) del Cryosat 2 con el objetivo específico de medir el cambio de volumen de las masas de hielo en los dos polos. Llevará un radar altimétrico SIRAL construido para medir el hielo.

El Centro Nacional de Datos sobre Hielo y Nieve de la Universidad de Colorado (NSIDC) ha recopilado información de los satélites polares desde 1979. A partir de ellos se ofrece información numérica y cartográfica sobre la superficie del hielo marino en las regiones polares. A partir de ella se puede conocer la variabilidad intraanual e interanual de los últimos treinta años. Aunque con cautela, por la referencia de datos de un solo periodo climático, son de gran valía, por cuanto muestra la tendencia más reciente de la superficie del hielo polar.

Frente a las reiteradas y recientes amenazas sobre el deshielo de los mares polares, y sus consiguientes consecuencias negativas sobre el ascenso del nivel del mar y del cambio climático (IPCC 1995, 2001, 2007, etc.) se ha considerado conveniente analizar las bases

de datos disponibles que ponen a disposición de cualquier usuario los datos sobre superficie de hielo marino para tratar de conocer la realidad de los hechos y de los acontecimientos anunciados.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

En este trabajo se analiza la variabilidad intra-anual e interanual del hielo marino a lo largo del período 1979-2008 a partir de los datos e imágenes facilitados por el «National Snow and Ice data Center» (NSIDC). Se hace especial hincapié en los valores extremos anuales, máximas y mínimas superficies de hielo marino, en los que se analiza, tanto la extensión, como la concentración del hielo. Debe matizarse que estos parámetros, obtenidos mediante mosaicos de imágenes de satélite y expresados en millones de km<sup>2</sup>, son sensiblemente diferentes. La extensión se refiere a la superficie máxima ocupada por el hielo marino, aunque en los bordes de la banquisa haya poca cobertura espacial. La concentración, también mostrada en medidas de superficie, pero expresada en primer término en porcentajes, solo incluye la superficie del hielo marino a partir de un 5 % de cobertura sobre el mar, por lo que los valores son ligeramente menores a los de extensión.

De los datos mensuales de superficie de hielo marino durante el período 1979-2008 se obtienen los siguientes datos estadísticos:

- máxima, media aritmética, desviación estándar, mínima y rango
- análisis de tendencia de la superficie de hielo: media, máxima y mínima anual
- estudio de las temperaturas superficial en las estaciones meteorológicas polares con series más largas
- relación de la temperatura y la superficie de hielo en el período coetáneo 1979-2008.

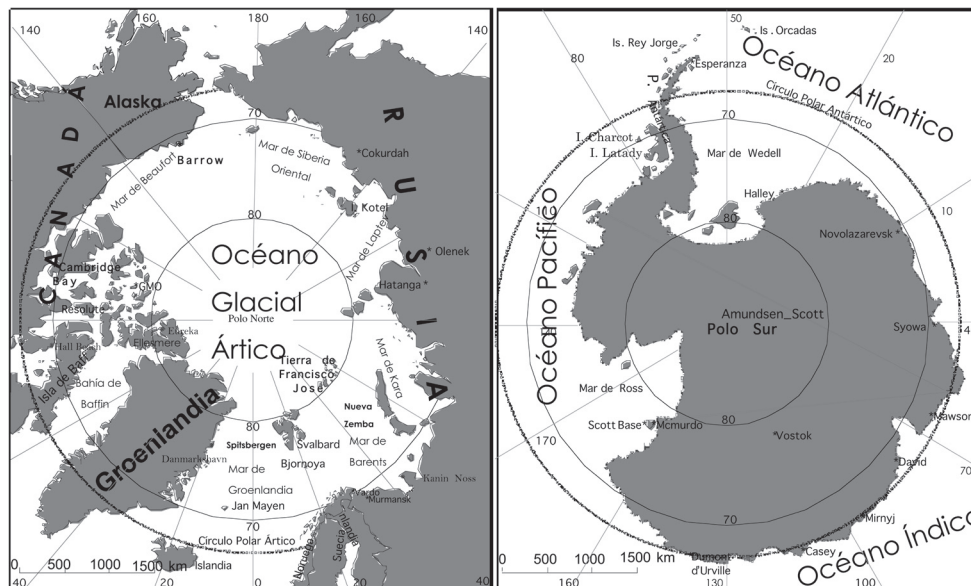
Para el análisis temporal de las temperaturas se han seleccionado las estaciones meteorológicas de las regiones polares que se encuentren emplazadas en áreas rurales, esto es, con una población inferior a los 10.000 habitantes (Cuadro 1). Evidentemente, todas las series temporales de la Antártida se sitúan en bases científicas con muy poca o ninguna presión antrópica, pero sí se han desestimado varias estaciones del Ártico por superar ampliamente esta cifra, como es el caso de Murmansk y Kandalaksa en Rusia o Troms y Bodo Vi en Noruega. A su vez, las series temporales deben cubrir, al menos el período 1979-2008. Se ha optado por analizar la extensión total de cada serie con el objetivo de conocer si el período actual ha tenido precedentes recientes.

Respecto a las series temporales de la Antártida, además, se incluyen las estaciones localizadas en latitudes subpolares (de 60 a 65° S), por estar afectadas por los hielos marinos varios meses al año (Cuadro 2).

Dadas las continuas referencias espaciales de las regiones polares se incluye un mapa de localización (Fig. 1).

Las series de temperatura se han obtenido de Peterson & Vose (1997) y Peterson *et al.* (1998), del Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) y del United States Historical Climatology Network (USHCN).

Figura 1  
REGIONES POLARES. PROYECCIÓN ORTOGRÁFICA POLAR.



Cuadro 1  
ESTACIONES METEOROLÓGICAS RURALES DEL ÁRTICO

Estaciones	Localización	Latitud N	Longitud	Serie Tm anual
Kozebue	Alaska	66° 54'	162° 36' W	1897-2008
Barrow, W. Pos	Alaska	71° 18'	156° 48' W	1901-2008
Cambridge Bay	Canadá	69° 06'	105° 06' W	1929-2008
Resolute, N.W.	Canadá	74° 42'	95° 0' W	1947-2008
Eureka, N.W.T.	Canadá	80° 0'	85° 56' W	1949-2008
Hall Beach	Canadá	68° 48'	81° 12' W	1957-2008
Clyde, N.W.T.	Canadá	70° 30'	68° 30' W	1943-2008
Danmarkshavn	Groenlandia	76° 48'	18° 42' W	1951-2008
Jan Mayen	Noruega	70° 54'	8° 42' W	1921-2008
Svalbard Luft	Islas Svalbard	78° 18'	15° 30' E	1977-2008
Bjornoya	Islas Svalbard	74° 30'	19° 0' E	1949-2008
Vardo	Noruega	70° 4'	31° 06' E	1881-2008
Kanin Nos	Siberia Occ.	68° 42'	43° 18' E	1915-2008
Nar' Jar-Mar	Siberia Occ.	67° 36'	53° 0' E	1926-2008
Isla Vice	Isla N Siberia C.	79° 30'	77° 0' E	1951-2008
Isla Dikson	Isla N Siberia C.	73° 30'	80° 24' E	1918-2008
Hatanga	Siberia Central	72° 0'	102° 30' E	1938-2008
GMO Im E.K.F.	Isla N Siberia C.	77° 42'	104° 18' E	1932-2008
Olenek	Siberia Central	68° 30'	112° 24' E	1935-2008
Dzardzan	Siberia Central	68° 42'	124° 0' E	1938-2008
Isla Kotel	Siberia Oriental	76° 0'	137° 56' E	1938-2008
Cokurdah	Siberia Oriental	70° 36'	147° 56' E	1939-2008

Cuadro 2  
ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA ANTÁRTIDA

Estaciones	Localización	Latitud S	Longitud	Serie T anual
Base Orcadas	Océano Atlántico	60° 48'	44° 42' W	1903-2008
C.Met.A. Marsh	Islas rey Jorge del Sur	62° 24'	58° 54' W	1969-2008
Bellingshause	Islas rey Jorge del Sur	62° 12'	58° 54' W	1968-2008
Base Arturo	Islas rey Jorge del Sur	62° 30'	59° 42' W	1966-2008
Bernardo O'Higgins	Extremo N Penin Ant.	63° 18'	57° 56' W	1963-2008
Base Esperanza	Extremo N Penin Ant.	63° 24'	57° 0' W	1945-2008
C.V.D. Marambio	Extremo N Penin Ant.	64° 12'	56° 42' W	1970-2008
Faraday	Península Ant.	65° 12'	64° 18' W	1944-2008
Rothera Point	Península Ant.	67° 36'	68° 06' W	1946-2008
Base San Martín	Península Ant.	68° 06'	67° 06' W	1976-2008
Halley	Costa N-Mar Weddell	75° 30'	26° 36' W	1956-2008
Novolazarevsk	Costa NE-Atlántico	70° 48'	11° 48' E	1961-2008
Syowa	Costa E Antártida	69° 0'	39° 36' E	1957-2008
Mawson	Costa NE-Índico	67° 36'	62° 54' E	1954-2008
Davis	Costa NE-Índico	68° 36'	78° 0' E	1957-2008
Mirnyj	Costa NE-Índico	66° 30'	93° 0' E	1956-2008
Casey	Costa NE-Índico	63° 18'	110° 30' E	1957-2008
Dumont d'Urville	Costa NW-Índico	66° 42'	140° 0' E	1950-2008
McMurdo	Costa Mar Ross	77° 48'	166° 42' E	1956-2008
Scott Base	Costa Mar Ross	77° 48'	166° 48' E	1957-2008
Vostok	Polo Sur Magnético	78° 30'	106° 54' E	1958-2008
Amundsen Scott	Polo Sur Geográfico	90° 0'	0° 0'	1957-2008

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1. Hielo marino polar

La superficie de hielo polar, del Océano Ártico y de los océanos que circunvalan la Antártida muestran evidentes y notables variaciones anuales conforme al ciclo radiativo y térmico anual, corrientes oceánicas y circulación atmosférica. Resulta llamativa la similitud entre las dos zonas polares al obtener la media anual del período 1979-2008 de la superficie ocupada por los hielos al cabo del año, pues alcanzan superficies casi iguales (11,94 mill km<sup>2</sup> en la Antártida y 11,91 mill km<sup>2</sup> en el Ártico).

Al contrastar las variaciones intranuales del hielo marino en ambos polos, se advierte mayor extensión durante los seis meses invernales (de junio a noviembre en el Polo Sur y de diciembre a mayo en el Polo Norte), en torno a la Antártida, con cifras claramente superiores al hielo del Océano Ártico, (Fig. 2); este mayor desarrollo del hielo marino austral se produce gracias al frío aportado por el gran continente helado. Así, en los Océanos que circunvalan la Antártida, durante cinco meses al año el hielo marino ocupa una extensión superior a 16 mill km<sup>2</sup>, cifra que no se alcanza en el Océano Ártico desde 1988 y, sólo se ha producido durante el máximo anual de marzo y/o febrero, nunca durante más de dos meses consecutivos.

A su vez, la máxima extensión mensual del hielo marino se produce en el Polo Sur, con un valor medio en septiembre de 18,75 mill km<sup>2</sup>, frente a los 15,58 mill km<sup>2</sup> del mes de marzo en el Océano Ártico (período 1979-2008). La supremacía austral en cuanto a la extensión del hielo marino sólo se mantiene durante el largo invierno polar y cede la mayor

superficie al hemisferio norte durante la estación estival polar (de junio a noviembre en el HN y de diciembre a mayo en el HS), (Fig. 2). Debe recordarse que los hielos marinos de la Antártida se encuentran a menor latitud, sobre todo en la fachada más próxima a Australia, pues la masa continental (y los correspondientes glaciares) se extiende hasta el Círculo Polar Antártico, mientras que la ausencia continental del Polo Norte circunscribe los hielos estivales a latitudes muy elevadas, por encima de los 70° N. La menor extensión del continente antártico en su mitad occidental y la prolongación de la Península del mismo nombre hasta latitudes subpolares (unos 64° S), da lugar a una mayor variabilidad anual e interanual de los hielos marinos en estos lugares (Mares de Wedell y Bellingshousen, Plataforma de Ross, etc.), que son objeto de numerosas noticias sensacionalistas de escaso rigor científico, pues no contemplan la evolución conjunta de la Antártida, ni las variaciones durante el máximo período de datos disponibles (30 años). Otra posible explicación de la mayor actividad de los hielos en las plataformas litorales de la Antártida Occidental es la tendencia positiva de las temperaturas en esta región, frente al enfriamiento del interior del continente, hecho que favorece la evaporación del mar y el incremento de las precipitaciones nivales (Vaughan, 2003). Aunque, vuelve a hacerse hincapié en lo reducido del período de muestreo (un solo período climático), sin que ello tenga que conllevar la continuidad temporal de la tendencia central.

La extensión promedio del hielo marino Ártico en su mínimo anual (en septiembre) duplica la superficie correspondiente en el hemisferio austral (en febrero), con 6,67 frente a 3,03 mill km<sup>2</sup> respectivamente (Cuadros 3 y 4). Asimismo, debe destacarse que los meses de transición entre las dos estaciones polares (junio-noviembre en el hemisferio norte y diciembre-mayo en el hemisferio sur), muestran cifras de superficie de hielo marino similares en ambos polos (alrededor de 11 mill km<sup>2</sup>).

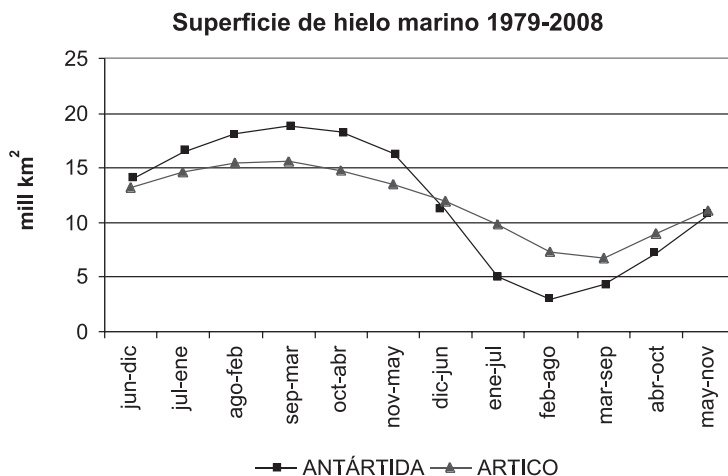
## **2. Variabilidad temporal y espacial del hielo marino Ártico**

Al analizar la evolución de las medias anuales en la treintena 1979-2008 resulta sorprendente el brusco y progresivo descenso de la extensión del hielo en el Océano Ártico, (Fig.3). Así, el año con más hielo se produce en los inicios de la serie, 1982, con 12,69 mill km<sup>2</sup> y el más bajo en 2007. El descenso es claro desde 1994, fecha desde la que no se registran superficies medias superiores a 12 mill km<sup>2</sup> y, más acelerada, desde el año 2003, con una pérdida de 1,4 mill km<sup>2</sup> en el treintenio analizado.

El mínimo anual en extensión media anual se produce en 2007, con 10,70 mill km<sup>2</sup>; no obstante, aunque el año 2008 todavía ha tenido valores de superficie anual inferior a la media treintenial, sí supone un incremento considerable respecto a los dos años precedentes (con valores más altos en todos los meses del año, excepto en junio), con lo que la tendencia descendente ininterrumpida desde 2003 se ha invertido por primera vez. El año 2008 registra un incremento de 0,5 mill km<sup>2</sup> de hielo marino respecto al año anterior y supera claramente a la superficie de los tres años precedentes (Fig.3).

Aunque las cifras anuales muestren un claro descenso del hielo Ártico, este hecho no resulta tan evidente cuando se quiere conocer la tendencia mensual. Así, conforme al ciclo radiativo anual, inercia térmica del océano y corrientes marinas dominantes, el polo norte muestra superficies crecientes de hielo marino entre octubre y marzo (máximo

Figura 2  
 SUPERFICIE DE HIELO MARINO EN LOS POLOS, MEDIAS MENSUALES DE 1979-2008. EN LA ABCISA LOS MESES EXTERIORES (JUN-MAY) CORRESPONDEN A LA ANTÁRTIDA Y LOS INTERIORES (DIC-NOV) AL ÁRTICO



anual) y decrecientes de abril a septiembre (mínimo anual). Excepcionalmente el mínimo anual puede producirse en agosto, sobre todo debido al brusco descenso estival del mar de Barents (Parkinson & Cavalieri, 2002).

Durante el treintenio 1979-2008 el hielo marino Ártico muestra la máxima variabilidad intermensual entre los meses de junio y septiembre, con un retroceso medio de 2,2 mill de km<sup>2</sup> de junio a julio y de 2,5 de éste a agosto. El mínimo anual del treintenio, en 2007, viene en parte condicionado por la mayor pérdida de hielo registrada en el centro del estío (3,4 mill km<sup>2</sup> en julio), hecho que se suma a superficies anuales bajas desde el inicio del siglo XXI.

De los treinta años analizados el centro del verano de 2007 supone también el valor mensual más bajo del hielo marino Ártico con un brusco descenso respecto a los años precedentes. Sin embargo, los mínimos mensuales durante los seis meses invernales y del resto del verano polar se produjeron en 2006, por lo que los dos años posteriores han experimentado aumentos de la superficie de hielo mensual entre 0,2 y 1,7 mill km<sup>2</sup>, respecto a los valores mensuales de 2007. Así, un total de ocho meses al año muestran incrementos progresivos en los años 2007 y 2008 (Fig.3). Este último año, además, advierte el máximo ascenso de hielo de la serie durante los meses de febrero y octubre, aunque también, la mayor pérdida entre agosto y septiembre, si bien las superficies de finales del verano son considerablemente menores.

Del invierno polar boreal es el mes de octubre el que registra los incrementos mensuales más acusados del año, con medias de 2,4 mill km<sup>2</sup> y una amplia variabilidad interanual (de 3,7 mill km<sup>2</sup> en 2008 a 1,5 en 1996) (Fig.4). En general, los meses de mayor incremento de hielo del invierno se producen entre octubre y diciembre, con valores medios superiores a 2 mill de km<sup>2</sup>.

El análisis temporal de los hielos marinos durante los meses extremos (marzo y septiembre) refleja grandes oscilaciones interanuales, especialmente en los valores mínimos de finales del verano. La extensión mínima del hielo Ártico alcanza un elevado rango (3,6 mill



Figura 3  
EXTENSIÓN MEDIA ANUAL DEL HIELO MARINO EN EL OCÉANO ÁRTICO, 1979-2008

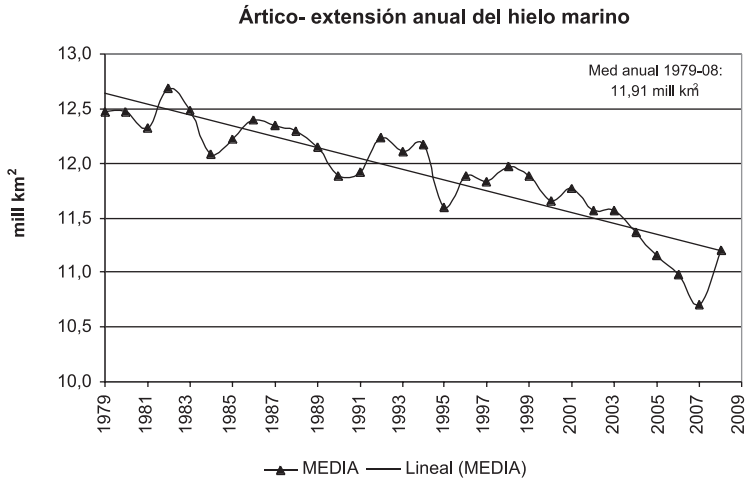
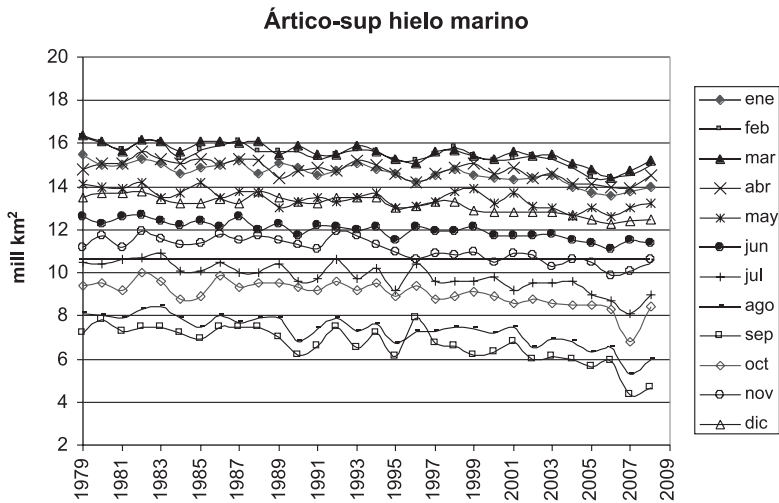


Figura 4  
SUPERFICIE MENSUAL DEL HIELO EN EL OCÉANO ÁRTICO, 1979-2008



km<sup>2</sup>), entre el mínimo treintenal de septiembre de 2007, con 4,3 mill km<sup>2</sup>, y el máximo de 1996, con 7,9 mill km<sup>2</sup>. Excepcionalmente, la fecha en la que se produce la menor extensión anual del hielo marino puede adelantarse algún año al mes de agosto, como ocurrió en 1996 que, además, resultó ser el más frío de los últimos treinta años. Durante dicho verano el hielo

marino estuvo presente en las costas de Siberia central y oriental, tapizando gran parte del mar de Láptev y el sector más oriental del mar de Barents. De igual modo, los hielos alcanzaron en el estío, de manera excepcional, las costas norte de Alaska y del noroeste de Canadá, en el mar de Beaufort, hecho poco frecuente incluso en los veranos en los que el hielo adquirió una mayor superficie, como fue septiembre de 1987 (<http://nsidc.org/>).

A lo largo de los últimos treinta años de registro el hielo marino sólo se ha retirado totalmente de las costas de Siberia, pudiendo resultar navegable, durante tres veranos, en 1995, 2005 y 2008, con cifras totales de extensión de hielo dispares (6,1; 5,6 y 4,7 mill de km<sup>2</sup> respectivamente).

En cuanto a la mayor extensión anual de los hielos, aunque suele producirse en el mes de marzo, también, ocasionalmente puede adelantarse al mes de febrero, hecho que ha ocurrido el 16,6 % de los años observados. Los valores medios de los treinta años en extensión y concentración del hielo marino (15,58 y 13,09 mill de km<sup>2</sup> respectivamente), muestran menor rango que los mínimos estivales; 2 mill de km<sup>2</sup>, entre marzo de 2006 con 14,4 mill de km<sup>2</sup> de extensión y de 1979, con 16,4 (Cuadro 3).

Respecto a la evolución temporal de los últimos 30 años la máxima extensión anual del hielo marino en el Océano Ártico, se mantuvo bastante estable de 1979 a 1988, en torno a 16 millones de km<sup>2</sup>, para descender a unos 15,5 millones de km<sup>2</sup> hasta 2003. Respecto a los valores mínimos del verano el descenso se hace evidente a partir de 1996 (máximo treintenal), y resulta más brusco y sin precedentes en los treinta años de registro, sobre todo desde el año 2001. Se alcanza el mínimo histórico en septiembre de 2007, recuperándose levemente en el año 2008, mes que supone el segundo mínimo treintenal. En estos dos últimos años, durante el mínimo estival, especialmente el hielo marino se ha retirado sobre todo de las costas de Alaska, del NW de Canadá (mar de Beaufort) y, de Siberia central y oriental (<http://nsidc.org/>).

Las tendencias lineales de la superficie de hielo Ártico de los cinco parámetros analizados, anual, máximos y mínimos, resultan claramente significativas y negativas las correspondientes a extensión y a concentración de verano. Aun conscientes de lo reducido del período de muestreo para un estudio de tendencias (30 años), puede afirmarse que hay una tendencia clara a la reducción de la superficie helada del Ártico y de su concentración en verano, pero no es significativa la tendencia de la concentración del hielo marino en el máximo invernal.

Cuadro 3  
ESTADÍSTICOS DE LA SUPERFICIE DE HIELO DEL ÁRTICO, 1979-2008

Estadísticos	Máx-Marzo (mill de km <sup>2</sup> )		Mín-Septiembre (mill de km <sup>2</sup> )	
	Extensión	Concentración	Extensión	Concentración
Nº datos	30	30	30	30
Promedio	15,58	13,09	6,67	4,45
Desviación est.	0,47	0,39	0,87	0,63
Mínima y fecha	14,40 (2006)	12,40 (2006)	4,30 (2007)	2,80 (2007)
Máxima y fecha	16,40 (1979)	13,80 (1988)	7,90 (1996)	5,60 (1996)
Rango	2,00	1,40	3,6	2,80

Así, la evolución de este parámetro parece no estar cambiando recientemente, como sí ocurre con la extensión media anual y la mínima estival. Además, las dos rectas de regresión de la concentración del hielo (máxima y mínima anual) muestran menores pendientes que las correspondientes a la extensión, que siempre suponen el alcance máximo de los hielos, independientemente del grado de cobertura espacial. Por tanto, la tendencia de la concentración del mínimo estival, aun siendo significativa, sólo explica la cuarta parte de la variabilidad temporal ( $R^2$  de 25,87 %, Cuadro, 4).

Por tanto, de la evolución temporal de las dos épocas más extremas resulta evidente que hay mayor pérdida de hielo Ártico en verano que en invierno, época en la que la concentración del hielo muestra cifras actuales superiores a la de los primeros años ochenta. Esto no parece influir en los valores medios anuales, que sí reflejan un notable detrimento, con tendencia significativa que explica el 81 % de la variabilidad de la treintena.

Cuadro 4  
TENDENCIA LINEAL DE LA SUPERFICIE DE HIELO ÁRTICO, 1979-2008

Recta Regres.	Ext anual	Ext. mín.	Ext. máx.	Conc. mín.	Conc. Máx.
Significación	Sí al 99%	Sí al 99%	Sí al 99%	Sí al 99%	NO
Pendiente	-0,050	-0,078	-0,0438	-0,036	0,005
Coef. Corr.	-0,90	-0,79	-0,82	-0,51	0,12
$R^2$	81,88	62,99 %	67,17 %	25,87 %	1,63 %

### 3. Variabilidad del hielo marino en torno a la Antártida

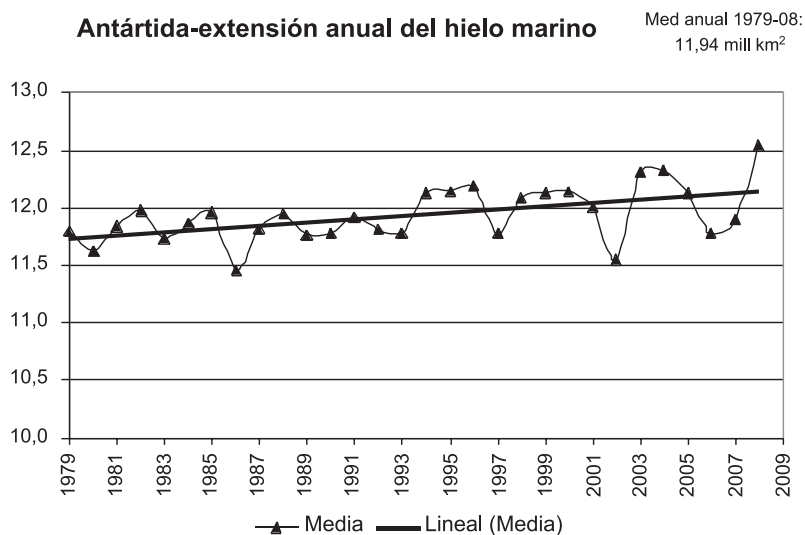
El conjunto del hielo polar austral, continental y marino, ocupa una extensión media de 22 millones de  $\text{km}^2$ , con variaciones anuales muy notables entre los máximos del invierno austral a los mínimos estivales (de 30 a unos 14 mill  $\text{km}^2$ , respectivamente). De estas cifras el continente helado con 13,5 mill  $\text{km}^2$  de superficie proporciona un porcentaje de hielo austral muy importante en el cómputo anual. Por ello, esta gran superficie de hielo continental (volumen realmente), debería sumarse al formado sobre el mar. Al no disponer de la evolución espacial y temporal del hielo de la Antártida para el treintenio 1979-2008, aquí se analiza sólo el hielo marino, pero considerando que la banquisa a lo largo del año siempre tiene menor superficie y volumen, lo que le confiere a la atmósfera menor aporte térmico que el inlandsis.

A lo largo del año y conforme transcurren las estaciones polares del hemisferio austral el hielo marino aumenta de marzo a septiembre (máximo anual) y decrece de octubre a febrero (mínimo anual). El incremento es muy acusado y superior al del polo norte entre abril y julio, con valores medios mayores a 2,5 mill  $\text{km}^2$  al mes, siendo mayo el que presenta mayor crecimiento mensual de la banquisa, con 3,5 mill  $\text{km}^2$  de media. Por el contrario, los meses con mayores pérdidas de superficie marina helada son enero y diciembre, con una media treintenial de 6 y 5,1 mill  $\text{km}^2$  al mes respectivamente.

Al analizar los valores anuales de la extensión del hielo marino durante los últimos 30 años destaca el considerable y progresivo aumento de la superficie media (Fig. 5). Así, el año con menor superficie de hielo es 1986, con 11,47 mill km<sup>2</sup>, debido a que la mayoría de los meses del invierno austral registran las mínimas extensiones del treintenio. También, se producen grandes oscilaciones interanuales, incluso en años casi contiguos, con valores muy bajos en el año 2002 (11,55 mill km<sup>2</sup>) y un acusado ascenso en 2004 (12,33 mill km<sup>2</sup>). Además, se advierte menor variabilidad interanual durante la primera mitad del período analizado y un incremento considerable de la misma desde 1994.

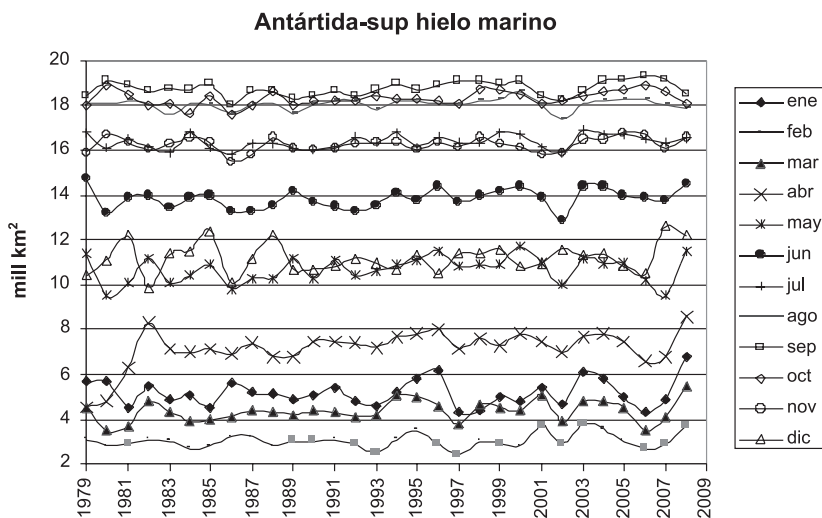
La evolución creciente del hielo austral da lugar a que los valores máximos mensuales y anuales de extensión del hielo marino se produzcan a partir del año 2000, dándose el máximo anual del treintenio en 2008. El valor de este año alcanza por primera vez en la treintena los 12,5 mill km<sup>2</sup>, cifra que sólo se supera el año 1982 en el Océano Ártico. Llama la atención que frente a las innumerables referencias en los medios de comunicación del alarmante descenso del hielo Ártico, apenas tenga eco la máxima superficie actual del hielo marino de la Antártida, pues también alcanza un record sin precedentes registrados en la Antártida. ¿Habrá un equilibrio en la dinámica del hielo entre ambos polos?

Figura 5  
EXTENSIÓN MEDIA ANUAL DEL HIELO MARINO EN LA ANTÁRTIDA, 1979-2008



Debe destacarse que durante los cinco meses de invierno, con superficies de 15 a 18 mill km<sup>2</sup>, las variaciones interanuales son mucho menores que en los meses de verano, de 13 a 3 mill de km<sup>2</sup> (Fig. 6). En esta figura también se observa el ascenso reciente de la superficie del hielo durante el verano austral, aunque durante el último año los meses centrales del invierno han experimentado un leve descenso.

Figura 6  
SUPERFICIE MENSUAL DEL HIELO EN LA ANTÁRTIDA, 1979-2008



Al analizar los meses con valores extremos (febrero y septiembre) se advierte que los mínimos estivales tienen una media de 3,03 mill km<sup>2</sup>, con un rango que supone casi la mitad de la superficie de hielo promedio (1,4) y, por tanto, muy variable temporal y espacialmente (Cuadro 5). Sorprende la gran variabilidad interanual de los valores extremos, que además se aproximan en el tiempo, pues en los treinta años de registro el mínimo estival se produce en 1997 y el máximo en 2003. Este año también supone el valor máximo para la concentración del hielo, aunque destaca un valor promedio bastante más reducido que para la extensión. Esto significa que un porcentaje elevado de la superficie del hielo marino austral tiene poca concentración (por la escasa cobertura del mismo dentro del píxel o nivel mínimo de representación en las imágenes de satélite) y quedan fuera de la concentración total.

Cuadro 5  
ESTADÍSTICOS DE LA SUPERFICIE DE HIELO MARINO EN LA ANTÁRTIDA, 1979-2008

Estadísticos	Mín-Febrero (mill de km <sup>2</sup> )		Máx-Septiembre (mill de km <sup>2</sup> )	
	Extensión	Concentración	Extensión	Concentración
Nº datos	30	30	30	30
Promedio	3,03	1,90	18,75	14,46
Desviación est.	0,34	0,27	0,34	0,33
Mínima y fecha	2,40 (1997)	1,30 (1993)	18,00 (1986)	13,80 (1986)
Máxima y fecha	3,80 (2003)	2,60 (2003)	19,30(2006)	15,20 (2007)
Rango	1,40	1,30	1,30	1,40

Entre las diferencias espaciales de la superficie del hielo marino en los últimos treinta años en los dos meses extremos del año, se advierte que a finales del invierno polar austral hay muy pocas diferencias interanuales. Sin embargo, cabe reseñar que las fluctuaciones respecto a la mediana parecen compensarse en cada año, de forma que cuando el hielo crece hacia el Océano Atlántico decrece hacia el Pacífico (<http://nsidc.org/>). Asimismo, la costa oriental de la Antártida, en el Océano Indico, muestra menos fluctuaciones interanuales. En la fachada occidental, el extremo de la Península Antártica (Tierra de Graham) se ha visto exento de hielo en los últimos años, aunque, con menos frecuencia, el acceso marítimo al continente también fue posible en los primeros años ochenta.

Las variaciones espaciales al final de verano polar son muy acusadas. El mayor desarrollo de los hielos estivales en los mares de Wedell y de Ross da lugar a cambios notables en estas plataformas. Frente a las noticias alarmistas de numerosos medios de comunicación sobre los hielos desarrollados en el mar de Wedell (Gore, 2006), el análisis treintenial permite contradecir esta teoría catastrofista, pues en conjunto, hay un evidente incremento del hielo entre las plataformas de Larsen y de Ruser-Larsen. Asimismo, el deshielo reciente de la Placa de Wilkins, junto a las islas Charcot y Latady al oeste del continente, también se había producido entre los veranos de 1989 y 1991. Aunque la extensión del hielo marino en los últimos meses de 2008 muestre un claro retroceso en la placa Wilkins, en otros sectores del litoral hay un notable incremento, por lo que los datos deben analizarse en conjunto y, no extrapolar las variaciones temporales de una placa concreta sin informar sobre lo acaecido en el resto del hielo marino.

La tendencia lineal de la superficie media anual del hielo marino del período 1979-2008 resulta positiva y significativa al 99% de confianza, aunque la recta de regresión sólo explique el 30% de la variabilidad anual. Por el contrario, la tendencia lineal de los meses extremos, no resulta estadísticamente significativa, pues aunque sus rectas tienen pendientes positivas, los valores de las mismas son muy pequeños (Cuadro 6).

Cuadro 6  
TENDENCIA LINEAL DE LA SUPERFICIE DE HIELO MARINO AUSTRAL, 1979-2008

Recta Regres.	Ext anual	Ext mín	Ext máx	Conc mín	Conc. máx
Significación	Sí al 99%	NO	NO	NO	NO
Pendiente	0,014	+ 0,011	+ 0,010	+0,010	+ 0,008
Coef. Correl.	0,55	0,28	0,30	0,27	0,28
R <sup>2</sup>	30,51	7,90	9,09	7,58	7,72

Desde el inicio del muestreo, 1979, hasta los primeros años noventa las variaciones en extensión y en concentración del hielo marino mínimo anual mantuvieron una variación interanual inferior a 0,5 mill de km<sup>2</sup> (una superficie similar a la de España). Sin embargo, durante la quincena más reciente (1993-2008) dichas diferencias parecen haberse incrementado, pues en la mitad de los años las variaciones ascienden a 0,6-0,9 mill de km<sup>2</sup> entre años consecutivos. Posiblemente, este incremento reciente en la variabilidad interanual explique los notables cambios espaciales de los hielos marinos al final del período estival.

Respecto a los valores máximos anuales de septiembre, 2008 ha tenido casi la misma superficie que 1979 (18,5 y 18,4 mill de km<sup>2</sup> respectivamente en extensión y, 14,2 de concentración en ambas fechas). Además, del 27% de años que superan este mes los 19 mill de km<sup>2</sup>, se producen casi todos en el siglo XXI, hecho que contribuye al incremento anual del hielo marino antártico.

#### **4. Comparación de los hielos marinos en ambos polos de 1979 a 2008**

Al comparar la evolución temporal de la superficie media del hielo marino en los dos polos se advierte una amplia variabilidad interanual y diferencias notables entre hemisferios, aun cuando el valor medio de la treintena analizada sea prácticamente igual en el Océano Ártico que en la Antártida. El primer aspecto dispar entre las dos zonas polares se refleja en el rango de la media anual, con un valor mucho más bajo en los océanos que rodean la Antártida que en el Océano Ártico (10,3 y 23,9 mill de km<sup>2</sup> respectivamente). Este hecho pone de manifiesto que frente a la mayor variabilidad intraanual de los hielos en torno a la Antártida, el Ártico muestra variaciones interanuales que duplican ampliamente a las del hemisferio austral.

Otra diferencia evidente entre los dos polos se produce en las fechas en las que se desarrollan los valores máximos y mínimos; mientras que la Antártida tiene una máxima superficie en el año 2008 y la mínima en 1986, el Océano Ártico tiene el máximo en los inicios de la serie y el mínimo casi al final de la misma. Además, estadísticamente existe una correlación negativa y significativa entre ambos polos, de tal modo que al incrementarse el hielo en un hemisferio disminuye en el contrario. Este hecho se produce tanto en los valores medios anuales, como en algunos mensuales. Puntualmente sirva de ejemplo el año 2008, durante el cual, se registra un incremento notable de la superficie del hielo marino en el polo norte y un leve descenso en los mares del hemisferio sur; hecho que se produce durante los meses centrales del invierno polar y, que tienen gran peso en el cómputo anual, pues son los de mayor superficie marina helada.

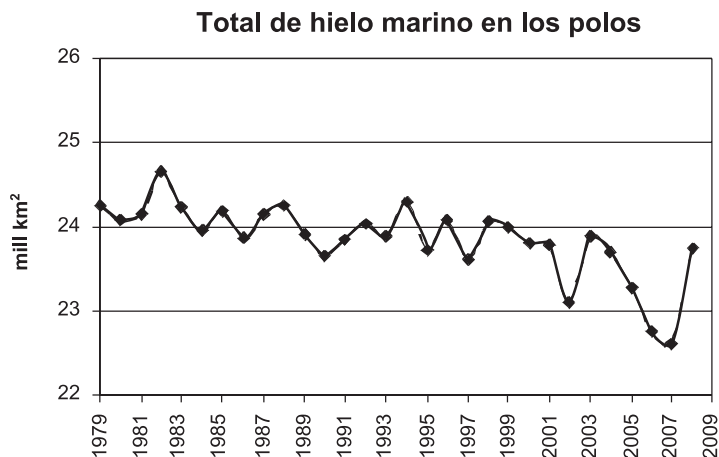
Cabe preguntarse si la evolución opuesta de los hielos marinos en ambos polos se mantiene en equilibrio, de tal modo que el volumen total de hielo en la Tierra no variase sustancialmente durante, al menos, cortos períodos de tiempo. Existe el gran inconveniente de no disponer de información sobre la evolución del hielo continental de la Antártida, con superficie y volumen clave para un balance completo de la superficie helada, al menos en latitudes polares.

En lo concerniente al hielo marino puede afirmarse que la evolución durante la treintena 1979-2008 arroja un balance claramente deficitario entre hemisferios, pues es mayor el descenso del hielo del Ártico (-1,4 mill km<sup>2</sup>) que el incremento de la Antártida (+0,50 mill km<sup>2</sup>), por lo que no ha habido compensación entre hemisferios. Seguramente los datos aportados por los nuevos satélites de órbita polar (Cryosat, Icesat, etc.), dotados de sensores específicos para medir el hielo continental, permitan en un futuro conocer mejor la Antártida, que dada su dimensión y volumen de agua dulce almacenada, debe representar una pieza clave en el sistema climático global.

La figura 7 muestra la evolución de la superficie del hielo marino de los dos hemisferios. En conjunto y dado que el Ártico pierde mayor superficie de hielo que el incremento registrado en la Antártida se produce una pérdida del cómputo de hielo. Además, la recta de regresión del hielo marino planetario en el período analizado es negativa y significativa al 99

% de confianza, señalando una pérdida secular de 3,5 mill km<sup>2</sup>. También debe destacarse la gran variabilidad del conjunto del hielo marino desde los inicios del siglo XXI, muy superior a la registrada en las dos décadas anteriores. Esto condiciona que frente a la pérdida evidente del hielo total en los primeros años del siglo XXI, la superficie en 2008 se ha incrementado considerablemente, acercándose a los valores medios del treintenio.

Figura 7  
SUPERFICIE TOTAL ANUAL DEL HIELO MARINO POLAR: ÁRTICO Y ANTÁRTICO, 1979-08



## 5. Relación con la temperatura

De las veintitrés estaciones meteorológicas localizadas al norte del Círculo Polar Ártico cabe destacar los siguientes aspectos de la evolución temporal de la temperatura media anual (Cuadro 1).

- El período treintenial de temperatura media anual, coincidente con los datos de superficie de hielo marino, viene determinado por un notable ascenso de la tendencia central entre 1979 y 2008, alrededor de 0,75° C/década.
- Casi la mitad de las series temporales registran la máxima temperatura anual en 2006 y/o 2007 (<http://www.giss.nasa.gov>), años en los que se alcanza la mínima superficie de hielo en el Ártico.
- Casi todas las series temporales árticas presentan un notable descenso térmico en 2008, acorde con la tendencia creciente del hielo durante el mismo. Sólo una estación, localizada cerca de la costa del Mar de Láptev (Olenek en Siberia Central), tiene la máxima temperatura en 2008.
- De las series temporales con registros desde los inicios de los años treinta o anteriores, la mitad tienen máximos térmicos actuales y, la otra mitad, en los años 1937 y 1943. De estas la mayor parte se localizan en la costa siberiana. Al no existir imá-

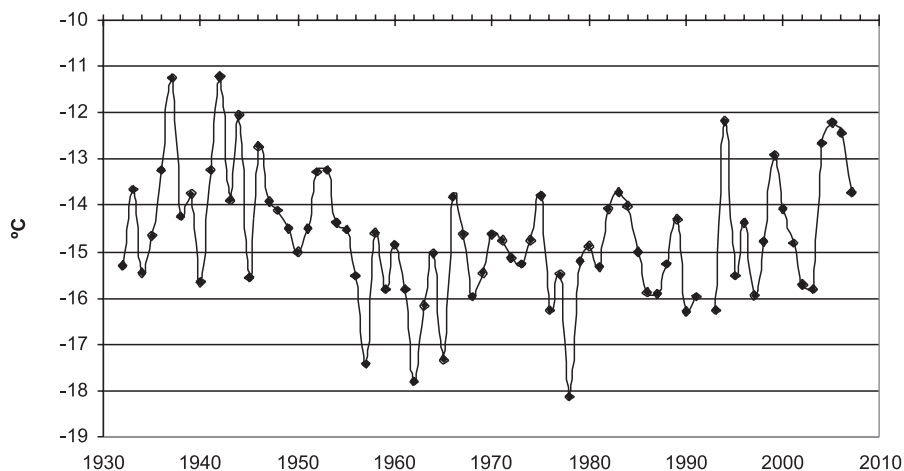


genes de satélite durante esas décadas, ni documentación cartográfica del conjunto del hielo del Océano Ártico, queda la enorme duda de cómo influyeron entonces los años excepcionalmente cálidos, sobre todo de la década de los cuarenta del pasado siglo.

- La figura 8 muestra la temperatura media anual de 1932 a 2008 de una de las estaciones meteorológicas más septentrionales y longevas del Ártico, sin apenas presión antrópica. En ella se advierte que, aunque hay un claro ascenso térmico desde finales de los años setenta hasta la actualidad, el período completo de datos no muestra cambios significativos, pues las temperaturas de las primeras décadas son muy similares a las actuales. Temperaturas más cálidas en las primeras décadas del siglo XX, muy similares a las actuales, también han sido registradas en numerosas series del Ártico (Przybylak, 2000), Groenlandia e Islandia (Chylek *et al.*, 2006; Pérez González y García Rodríguez, 2006; Pérez González, 2006). Chylek *et al.* (2007), ya comentaron los límites de la sensibilidad del clima derivados de los recientes datos de satélite y de las observaciones terrestres.

Figura 8  
TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN UNA ESTACIÓN DEL OCÉANO ÁRTICO

**Polo Norte - GMO (77°42'N; 104°18'E)**



- Todas las series temporales registran una gran variabilidad térmica interanual, con extremos que varían alrededor de 7° C, y oscilaciones en años consecutivos de 5° C en la media anual. Estas grandes oscilaciones térmicas interanuales, relacionadas en gran medida con la dinámica oceánica, dificultan las extrapolaciones a un futuro inmediato, cuanto más a períodos seculares.

- La estación térmica más antigua, Vardo al norte de Noruega con datos desde 1880, tiene el máximo anual en 1937, 2005 y 2007, con valores casi idénticos. Muestra las últimas décadas del siglo XIX claramente más frías que las acaecidas posteriormente, con un incremento de unos 2° C/siglo. El final del siglo XIX ya ha sido denominada como «anomalía fría decimonónica» (Sanz Donaire, 1999). Sin embargo, cabe preguntarse por qué el resto del siglo XX y primeros años del XXI no han recogido ascensos progresivos de la temperatura conforme se incrementaban los aportes de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Los años en los que se registran las temperaturas anuales mínimas son más variables que los años de las máximas; aun así, algunas regiones son más homogéneas: en Canadá casi la totalidad de series tienen mínimos en 1972 y, en Siberia Central, en 1979. Esto explicaría los valores tan elevados de superficie de hielo marino del inicio de la serie con imágenes de satélite, sin que tengan que entenderse como las extensiones habituales del hielo del Ártico, sino más bien características de momentos más fríos.

En la Antártida se han seleccionado veintidós estaciones meteorológicas, situadas en islas y en la costa continental y dos en el interior (Vostok y Amundsen). La distribución espacial de las mismas es irregular, ya que muchas estaciones se sitúan en la Península Antártica o próxima a ella (Cuadro 2).

- Lo primero que destaca de las series temporales antárticas son las grandes variaciones de la temperatura media anual entre todas ellas (Serrano Cañadas, 2003; Kejna, 1999, etc.) hecho evidente dado la amplia zona a analizar.
- Durante el período 1979-2008 se observan tendencias contrastadas entre las series situadas en la Península antártica y el resto de estaciones continentales (litorales y del interior). En las primeras hay un claro ascenso de la tendencia central (Fig. 9), mientras que en las segundas o no hay tendencia o ésta es negativa (Fig.10). Esto explicaría el reciente deshielo de la Placa Wilkins y el incremento de las Plataformas Larsen y Ruser-Larsen. No obstante, otros autores si apuntan un claro calentamiento en el continente (Steig *et al.*, 2008).
- Si se contempla la máxima extensión temporal de la temperatura media de todas las estaciones se mantienen las tendencias positivas en la Península antártica y estables o negativas en la mayor parte del continente.
- El año 2008, con la máxima extensión de hielo marino en la Antártida, se corresponde con la temperatura media anual en general más alta que el año anterior. Esto se produce en todas las series de la Península y en parte de las continentales, aunque en ninguna estación meteorológica supone el máximo de la serie.
- Las series temporales del extremo de la Península Antártica muestran una gran variabilidad en la temperatura media interanual, entre 4-5° C. Casi todas tienen el máximo en 1989, aunque en dos de ellas, estos valores se superan levemente en los años 1999 y 2000. Sin embargo, los años en los que se producen las temperaturas anuales más bajas son más variables, aunque destaca 1980 con valores mínimos en la mayoría de las series temporales. La superficie del hielo marino alrededor de la Península tiene

durante este año mayor extensión que la mediana la mayor parte del año (<http://www.nsidc.org>), por lo que hay una correlación negativa entre ambos parámetros.

- En el litoral del continente y en el interior los años en los que se producen los valores máximos y mínimos de cada serie son muy dispares. Apenas hay similitud entre estaciones próximas, por lo que resulta complejo definir un patrón espacial. Así, las relaciones entre la evolución temporal de la temperatura y de la extensión del hielo marino son difíciles de establecer, cuanto más de extrapolar.

Figura 9  
TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Faraday (65° 12' S; 64° 18' W)

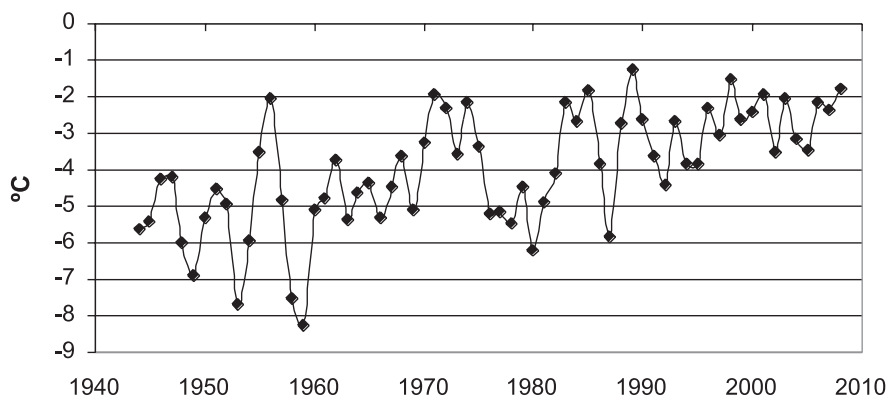
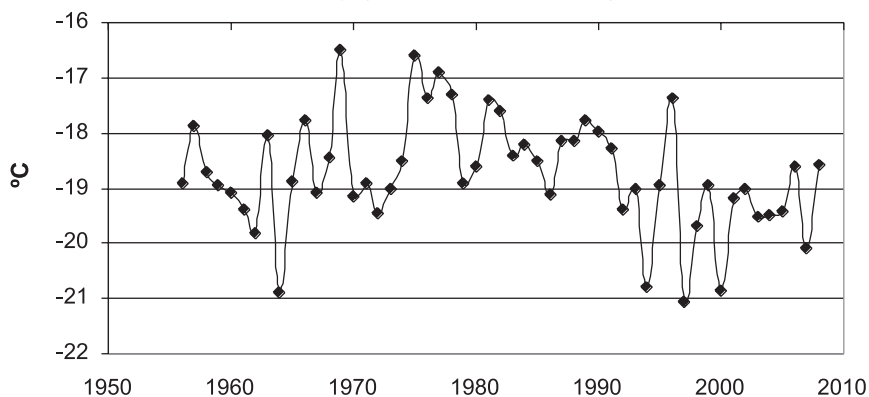


Figura 10  
TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN LA COSTA NOROESTE DE LA ANTÁRTIDA

Halley (75° 30' S; 26° 36' W)"



#### IV. CONCLUSIONES

Los valores medios anuales de la superficie de hielo marino en el período 1979-2008 son muy similares en ambos polos, con 11,9 mill km<sup>2</sup>. No obstante, la evolución treintenaria del hielo marino es opuesta en ambos hemisferios.

En el Océano Ártico se produce un descenso brusco de la superficie del hielo durante este período, especialmente en el verano polar e inicios del invierno, con una recuperación notable en el año 2008. Hay una clara relación entre el incremento de temperatura y el descenso de la superficie del hielo, entre 1979 y 2008. Sin embargo, debe destacarse que incrementos similares de temperatura se produjeron durante la primera mitad del siglo XX, sin que podamos conocer cuáles fueron entonces las variaciones espaciales en el hielo del Ártico, dado que no había imágenes de satélite.

En los mares que circunvalan la Antártida hay un incremento de la extensión del hielo, especialmente en los últimos quince años. Llama la atención que el valor máximo anual se ha producido en el año 2008, sin apenas eco en los medios de comunicación. La evolución de la temperatura anual en la Antártida es muy dispar espacialmente, con un claro aumento en la Península Antártica durante el período analizado, frente a tendencias estables o negativas en las distintas costas continentales y el interior, por lo que resulta complejo definir un patrón espacial.

Respecto al total del hielo marino la evolución durante la treintena 1979-2008 arroja un balance claramente deficitario entre hemisferios, pues es mayor el descenso en el Ártico que el incremento en la Antártida, por lo que no ha habido compensación entre hemisferios. Hay que tener en cuenta que en este balance no se considera el hielo continental. Seguramente los datos aportados por los nuevos satélites de órbita polar (Cryosat, Icesat, etc.), dotados de sensores específicos para medir el hielo continental, permitan en un futuro conocer mejor la Antártida, que dada su dimensión y volumen de agua dulce almacenada, debe representar una pieza clave en el sistema climático global.

#### BIBLIOGRAFÍA

- CHAPMAN, W. L. & WALSH, J. E. (2007). A synthesis of Antarctic temperatures. *J. Clim.* 20, 4096-4117.
- CHYLEK, P. M. K. DUBEY, and G. LESINS, (2006). Greenland warming of 1920–1930 and 1995–2005, *Geophys. Res. Ltrs.* 33, L11707, doi:10.1029/2006GL026510.
- CHYLEK, P., U.; LOHMANN, M.; DUBEY, M.; MISHCHENKO, R.; KAHN, and OHMURA, A. (2007). Limits on climate sensitivity derived from recent satellite and surface observations, *J. Geophys. Res.*, 112, D24S04, doi:10.1029/2007JD008740.
- COMISO, J. C. (2000). Variability and trends in Antarctic surface temperatures from *in situ* and satellite infrared measurements. *J. Clim.* 13, 1674-1696.
- GORE, A.A. (2006). Una verdad Incómoda. Paramount Home Entertainment.
- HELD, I.M. and B.J. SODEN (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming, *Journal of Climate*, 19, 5686-5699.
- HOLLAND, D. (2007). Bias And Concealment in the IPCC Process: The «Hockey-Stick» Affair and its Implications, *Energy & Environment*, 18, 951-983.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). *Climate Change: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S, *et al.*, (eds). Cambridge University Press: Cambridge, New York, 881 pp.
- JONES, P.D.; HORTON, E.B.; FOLLAND, C.K.; HULME, M.; PARKER, D.E. & BASNETT, T.A. (1999). «The Use of Indices to Identify Changes in Climatic Extremes», *Climatic Changes*, 42: 131-149.
- KEJNA, M. (1999). *Air temperature in the Admiralty Bay region (King George Island, Antarctica) in the period 1977-1996 according to meteorological data from the Arctowski station*. (1999). Uniwersytet Mikołaja Kopernika. Torún. 128 pp.
- LINDZEN, R.S. (1992). Global warming: the origin and nature of the alleged scientific consensus. *Regulation*, Spring 1992 issue, 87-98.
- LINDZEN, R.S. (1999). *The Greenhouse Effect and its problems*. Chapter 8 in *Climate Policy After Kyoto* (T.R. Gerholm, editor), Multi-Science Publishing Co., Brentwood, UK, 170 pp.
- LINDZEN, R.S. (2007). Taking greenhouse warming seriously. *Energy & Environment*, 18, 937-950.
- MICHAELS, P.J.; and KNAPPENBERGER, P.C (1996). Human Influence on Global Climate? *Nature*, 384, 522-523.
- NRC (National Research Council) (2000). *Reconciling Observations of Global Temperature Change*. National Academy Press: Washington, DC, 3.
- PARKINSON, C. L. (2000). Variability of arctic sea ice: The view from space, an 18-year record. *Arctic* 53 (4): 341-358.
- PARKINSON, C. L.; CAVALIERI, D. J.; GLOERSEN, P.; ZWALLY, H. J. and COMISO, J. C. (1999). Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996. *Journal of Geophysical Research* 104 (C9): 20, 837-20, 856.
- PARKINSON, C.L. and CAVALIERI, D. J. (2002). A 21 year record of Arctic sea-ice extents and their regional, seasonal and monthly variability and trends. *Annals of Glaciology*, 34, 1:441-446.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M<sup>a</sup> E. (2006). El cambio climático y las temperaturas. Mitos y Realidades del Cambio Climático. *Rev. del Instituto de Estudios Económicos*, n° 3-4: 177-208.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M<sup>a</sup> E. y GARCÍA RODRÍGUEZ, M<sup>a</sup> P. (2006). Críticas al cambio climático a partir de la evolución de la temperatura en el Atlántico Norte. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid*, 26:95-116.
- PETERSON, T.C. and VOSE, R.S. (1997). An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78 (12), 2837-2849.
- PETERSON, T.C., R. VOSE, R.S. SCHMOYER, and RAZUVAEV, V. 1998: Global Historical Climatology Network (GHCN) quality control of monthly temperature data. *International Journal of Climatology*, 18 (11), 1169-1179.
- PRZYBYLAK, R. (2000). «Temporal and Spatial Variation of Surface Air Temperature over the Period of Instrumental Observation in the Arctic,» *International Journal of Climatology* 20.

- SANTER, B.D.; TAYLOR K.E.; WIGLEY, T.M.L.; PENNER, J.E.; JONES, P.D.; CUBASH, U. (1995). Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate. *Climate Dynamics* 12: 77-100.
- SANZ DONAIRE, J.J. (1999): Escepticismo al «cambio climático»: el ejemplo de las temperaturas. *Nimbus*, n<sup>o</sup> 4, Almería, págs 173-198.
- SANZ DONAIRE, J. J. (2008): Comentario crítico al Avance para políticos del Grupo de Trabajo n<sup>o</sup> 1 del 4<sup>o</sup> Informe del IPCC dado a la publicidad en Febrero de 2007. *Homenaje a Joaquín Bosque Maurel, Real Sociedad Geográfica*, Madrid, págs 503-536.
- SERRANO CAÑADAS, E. (2003). Paisaje natural y pisos geocológicos en las áreas libres de hielo de la Antártida marítima (Islas Shetland del Sur). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 35: 5-32.
- SIGRO RODRÍGUEZ, J.; BRUNET INDIA, M. y AGUILAR ANFRONS, E. (Edits.) (2008). *Cambio Climático Regional y sus Impactos*. AEC, Serie A, n<sup>a</sup> 6, Tarragona, 823 págs.
- SINGER, S.F. (2001). Global warming: An insignificant trend? *Science* 292:1063–1064.
- SINGER, S.F. and AVERY, D.T. (2007). *Unstoppable Global Warming – Every 1500 Years*. Rowman & Littlefield. Lanham, MD.
- SINGER SF. *et al.* (2008). Nature, Not Human Activity, Rules the Climate: Summary for Policymakers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change, Singer S.F. (ed.). The Heartland Institute: Chicago, IL.
- STEIG, E.J. *et al.* (2008). Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, 457: 459-462, Doi: 10.1038/nature07669.
- TURNER, J. *et al.* (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.* 25, 279–294.
- VAUGHAN, D. G. *et al.* (2003). Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Clim. Change* 60, 243–274.

### **Páginas de Internet**

<http://www.giss.nasa.gov>

<http://www.ipcc.ch/> Informes de 1995, 2001 y 2007

<http://www.nsidc.org/>