

Nueva serie de extensión del hielo marino ártico en septiembre entre 1935 y 2014

Miguel Ángel Cea Pirón¹ y Juan Antonio Cano Pasalodos²

¹ Gipuzkoa, España. <m.cea.piron@kzgunea.net>

² Cantabria, España. <infcpj@humv.es>

(Recibido: 12-Sep-2015. Publicado: 14-Ene-2016)

Resumen

Desde 1979, los satélites equipados con sensores de microondas han proporcionado una completa y consistente serie de observaciones de la extensión del hielo marino ártico, mostrando una significativa tendencia descendente, sobre todo en el mes de septiembre, cuando el hielo marino ártico alcanza su mínimo anual. Existen registros anteriores a 1979, pero no son consistentes con los datos de satélite y tienen una fiabilidad limitada, sobre todo antes de 1953. Presentamos una nueva serie de extensión del hielo marino ártico en el mes de septiembre desde 1935 hasta 2014 que incluye datos para el sector siberiano no utilizados hasta ahora en las series que cubren el conjunto del Ártico. La nueva serie ha sido ajustada para ser consistente con los datos de satélite. La tendencia en el período 1935-2014 es de un -3,5% por década, mientras la tendencia en el período de los satélites 1979-2014 es de un -13,3% por década. Sin embargo, la tendencia desde 1935 hasta principios de los años 80 es positiva de forma estadísticamente significativa. Se torna negativa en los años 90, alcanzando significancia estadística a partir de 2006. El mínimo anual más bajo en el período anterior a los satélites es más alto que el de cualquier año posterior a 2001.

Palabras clave: Ártico, Hielo marino, Extensión, Series, Banquisa.

Abstract

Since 1979 satellite-borne passive microwave sensors have provided a continuous and consistent record of Arctic sea ice extent, showing a significant downward trend, particularly at September, when Arctic sea ice reaches its annual minimum. Records before 1979 exist, but are not consistent with the satellite record and have limited reliability, specially before 1953. We present a new time series of September Arctic sea ice extent from 1935 to 2014 that includes data for the Siberian sector not used previously in the Arctic wide existing time series. The new record has been adjusted to be consistent with satellite data. The trend for 1935-2014 is -3.5% decade, while the trend for the satellite era is -13.3% decade. However, the trends since 1935 until early 1980s are positive and statistically significant. The trends turn negative in the 1990s, reaching statistical significance from 2006 onwards. The lowest annual minimum in the pre- satellite era is higher than any annual minimum after 2001.

Key words: Arctic, Sea ice, Extent, Time-series, Pack ice.

1. Introducción

Desde 1978, los satélites equipados con sensores de microondas han proporcionado una completa y consistente serie de observaciones de la banquisa o hielo marino del Ártico. Estas observaciones muestran una significativa tendencia descendente en la extensión del hielo marino durante todos los meses del año y en la mayor parte de las regiones del Ártico (Meier *et al.* 2007; Cavalieri *et al.* 2012). El mayor descenso se observa en el mes de septiembre, cuando la banquisa ártica alcanza su mínimo anual. En concreto, entre 1979 y 2014 la tendencia en septiembre es de un -13,3% por década. El valor más bajo de toda la serie se alcanzó en septiembre de 2012, con una extensión de tan sólo 3.620.000 km², casi tres millones de km² por debajo de la media 1981-2010 (Fetterer *et al.*, 2002, actualizado diariamente).

Este descenso en la extensión de la banquisa ha venido acompañado por un aumento de las temperaturas en el Ártico, la región del planeta con un mayor calentamiento en las últimas décadas (Jones *et al.*, 2012). El aumento de las temperaturas y la reducción de la banquisa son dos procesos que se realimentan mutuamente, y forman parte del mecanismo de amplificación ártica del calentamiento (Screen y Simmonds, 2010; Serreze y Barry, 2011). Teniendo en cuenta el calentamiento y pérdida de hielo observados en las últimas décadas, así como el continuo aumento en la concentración de gases de efecto invernadero de origen antropogénico, se han realizado distintas proyecciones de que el Ártico podría estar libre de hielo marino en septiembre en algún momento entre la presente década y finales del siglo XXI (Overland y Wang, 2013), entendiéndose libre de hielo como una extensión en septiembre de menos de un millón de km².

No obstante, la evolución de la temperatura en el Ártico durante el siglo XX sugiere la existencia de una posible oscilación multidecadal, en la que destaca un rápido calentamiento observado entre 1920 y 1940. Desde 1940 hasta 1970 aproximadamente se observa un período de enfriamiento, seguido de un nuevo calentamiento desde entonces, acelerado durante la última década (Polyakov *et al.*, 2003a; Johannessen *et al.*, 2004; Jones *et al.* 2012). Se han propuesto distintos mecanismos de variabilidad natural para explicar el calentamiento observado en el Ártico entre 1920 y 1940, en el que la realimentación mutua entre aumento de la temperatura y pérdida de hielo también podría haber sido un factor de importancia (Bengtsson *et al.*, 2004).

Resulta de interés prolongar hacia atrás en el tiempo la serie de observaciones de la banquisa proporcionada por los satélites desde 1979 para poder situarla en un contexto climático más amplio, detectar posibles oscilaciones multidecadales en su comportamiento, o compararla con los resultados de modelos numéricos. Es de particular interés su prolongación hasta el anterior período de calentamiento en el Ártico, entre 1920 y 1940, para poder comparar el comportamiento de la banquisa entonces y en los últimos años, lo que podría proporcionar algunas claves para entender el comportamiento pasado de la banquisa y para proyectar su posible evolución durante las próximas décadas.

Existen distintas fuentes para el período anterior a los satélites, generalmente de carácter regional. Algunas de estas fuentes han sido compiladas en productos que cubren todo el Ártico, como la serie de datos de Walsh (Walsh, 1978; Walsh y Johnson, 1978; Walsh y Chapman, 2001) empleada posteriormente en HadISST (Rayner *et al.*, 2003). Sin embargo, los datos anteriores a 1979 en Walsh y HadISST se obtienen combinando varias fuentes con distinta fiabilidad y metodología, por lo que no son consistentes con los posteriores a 1979 derivados de las observaciones de los sensores de microondas a bordo de satélites.

Es posible emplear distintos métodos para ajustar los datos y hacer más consistentes ambos períodos (Meier *et al.*, 2012; Titchner y Rayner, 2014). No obstante, incluso ajustados, la fiabilidad de los datos de extensión de la banquisa ártica en septiembre anteriores a 1979 sigue siendo limitada. En particular, ninguna de las fuentes utilizadas por Walsh y HadISST para el período anterior a los satélites incluye observaciones en el sector siberiano más al este del mar de Kara (Mahoney *et al.*, 2008).

Sin embargo, a partir de 1933 existen datos para el sector siberiano basados en los mapas operacionales producidos por el Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) de San Petersburgo, derivados principalmente de vuelos de reconocimiento realizados de forma sistemática. Los mapas de AARI se encuentran digitalizados para el período 1933-2006 (AARI, 2007; <http://dx.doi.org/10.7265/N5D21VHJ>). Los mapas de AARI son la fuente de información más completa para el sector siberiano del Ártico antes de los satélites, han sido utilizados para analizar la evolución de la banquisa en el sector siberiano, y ha sido recomendada su integración en HadISST (Mahoney *et al.*, 2008). Sin embargo, la reciente actualización de HadISST presentada por Titchner y Rayner (2014) no ha incorporado dichos datos de AARI.

Mientras el calentamiento de las últimas décadas en el Ártico ha sido acompañado por un descenso en la extensión de la banquisa en septiembre, en los datos de Walsh o HadISST no hay ninguna indicación de que la extensión de la banquisa ártica en septiembre descendiera en el período de calentamiento de la

primera mitad del siglo XX. De hecho, hacia 1940 muestran la extensión de la banquisa en septiembre en torno a los valores más altos de toda la serie, descendiendo de forma continua desde entonces.

No obstante, antes de 1979 la fiabilidad de los datos de Walsh y HadISST es limitada, particularmente en el sector siberiano. Además, antes de 1953 Walsh y HadISST no emplean ninguna observación real para el mes de septiembre, siendo todos sus datos medias climatológicas e interpolaciones, por lo que la falta de respuesta de la banquisa al calentamiento podría ser causada por una deficiencia en los datos de Walsh y HadISST (Johannessen *et al.*, 2004; Semenov y Latif, 2012).

En este trabajo presentamos una nueva serie de extensión del hielo marino ártico en septiembre a partir de 1935 en la que hemos incorporado los datos de AARI. Al incorporar observaciones reales en el sector siberiano, los datos de extensión y mapas de distribución de la banquisa en el Ártico derivados de esta nueva serie serán en conjunto más precisos y fiables que los actualmente existentes.

La nueva serie 1935-1978 está asimismo ajustada para ser consistente y directamente comparable con las observaciones de los satélites entre 1979 y el presente. Así, presentamos una nueva serie consistente a lo largo de ocho décadas que permite situar en un contexto climático más amplio el descenso en la extensión de la banquisa de las últimas décadas. Y permite una comparación más precisa y directa con la parte final del anterior período de calentamiento en el Ártico, producido durante la primera mitad del siglo XX (Polyakov *et al.* 2003).

2. Metodología

2.1. Series de datos empleadas

Para la elaboración de la nueva serie de extensión de la banquisa ártica en el mes de septiembre entre 1935 y 2014, utilizamos cuatro fuentes de datos, descritas brevemente a continuación.

En primer lugar, para el período de observaciones de los satélites de microondas 1979-2014 usamos los datos de extensión del Sea Ice Index (SII) (Fetterer *et al.*, 2002; updated daily). Este producto se basa en una serie de datos finales de alta calidad procesados por el Instituto Goddard de la NASA (Cavalieri *et al.*, 1996; <http://nsidc.org/data/nsidc-0051.html>) empleando el algoritmo NASA Team. Sus actualizaciones se producen en base a un producto elaborado en tiempo real por el NSIDC (National Snow and Ice Data Center) usando también el algoritmo NASA Team (Maslanik y Stroeve, 1999; <http://nsidc.org/data/nsidc-0081.html>) Elegimos usar SII para el período de los satélites por ser una serie ampliamente utilizada y bien conocida tanto por la comunidad científica como por el público general, además de estar homogeneizada para su uso en estudios climáticos.

En segundo lugar, entre 1972 y 1977 existen también observaciones procedentes de satélites de microondas, en concreto del sensor ESMR a bordo del satélite Nimbus 5 (Parkinson *et al.*, 1987a, b, 1999; <http://nsidc.org/data/nsidc-0009.html>). Sin embargo, debido a que se trata de un instrumento con un único canal, sus datos no son directamente homologables a los de los sensores de microondas multicanal operativos desde finales de 1978 (SMMR, SSM/I, SSMIS). Además, existen algunos períodos sin datos durante los años de observaciones del sensor ESMR. No obstante, Cavalieri *et al.* (2003) combinaron las observaciones de los satélites ESMR con las de los satélites SMMR y SSMI, usando como puente mapas operacionales del National Ice Center (NIC), y creando una serie consistente entre 1972 y 2002. Denominaremos Merged a esta serie, que será empleada como puente entre HadISST y los datos de satélite SII.

En tercer lugar, la primera serie que emplearemos para el período anterior a los satélites es HadISST (Rayner *et al.*, 2003; <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>). Esta serie de temperaturas de la superficie oceánica y concentración de hielo marino se inicia en 1870 y su objetivo principal es ser empleada en modelos climáticos. Para el período anterior a 1979 la principal fuente de datos de HadISST es la serie de Walsh, elaborada combinando diversas fuentes con distinta fiabilidad y metodología, por

lo que no es directamente consistente con los datos posteriores a 1979 derivados de las observaciones de los sensores de microondas a bordo de satélites. HadISST ha sido producido en una resolución de $1 \times 1^\circ$.

Recientemente se ha publicado una nueva versión de este producto denominada HadISST2 (Titchner y Rayner, 2014; <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst2/>). Sin embargo, sus datos aún no se encuentran disponibles para su descarga. En todo caso, esta nueva versión sigue dependiendo principalmente de la serie de Walsh para el período anterior a los satélites.

En cuarto y último lugar, la segunda fuente que emplearemos para el período anterior a los satélites es la colección de mapas del Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) de San Petersburgo. Este instituto ha venido produciendo mapas operacionales con la distribución del hielo marino en el Ártico Siberiano desde los años 30 del siglo XX. Los mapas correspondientes al período 1933 a 2006 han sido digitalizados con una resolución de $12,5 \times 12,5$ kms. (AARI, 2007; <http://dx.doi.org/10.7265/N5D21VHJ>). Durante el verano, los mapas eran producidos con una frecuencia de diez días, por lo que típicamente a cada mes le corresponden tres mapas, uno para cada decena. Los datos empleados para realizar estos mapas proceden de observaciones de distinto tipo, destacando entre ellas los reconocimientos desde aeronaves realizados de forma sistemática.

Los mapas de AARI son la fuente de información más completa para el sector siberiano del Ártico antes de los satélites. Los datos de AARI han sido utilizados para analizar la evolución de la banquisa en el sector siberiano, y ha sido recomendada su integración en HadISST (Mahoney *et al.*, 2008). Sin embargo, la reciente actualización de HadISST presentada por Titchner y Rayner (2014) no ha incorporado dichos datos de AARI.

2.2. Ajuste de HadISST (1953-1978)

En primer lugar, ajustaremos la serie de datos de HadISST para hacerla compatible con las observaciones de los satélites (SII). Para ello, usamos como puente la serie combinada de Cavalieri *et al.* (2003) (Merged) siguiendo una metodología similar a la empleada por Meier *et al.* (2012).

Comparamos los datos de extensión de SII y Merged para el mes de septiembre, ajustando el período 1972-78 para hacerlo consistente con SII en base a la diferencia media en el período en el que ambas series se solapan (1979-2002). Añadimos los datos ajustados 1972-1978 a SII (1979-2014). De esta forma, obtenemos una serie consistente para el mes de septiembre en el período 1972-2014, que denominamos M-SII.

A continuación, comparamos los datos de extensión de M-SII con los de HadISST y ajustamos HadISST entre 1953 y 1978 en base a la diferencia media en el período en que ambas series se solapan (1972-1978). El ajuste necesario se concreta en sustraer 833.000 km^2 a los valores de extensión de HadISST entre 1953 y 1978.

La diferencia entre HadISST y los datos de satélite entre 1972 y 1978 podría explicarse en buena medida porque los datos de HadISST derivan de mapas operacionales, más sensibles a las zonas de hielo a baja concentración o hielo fino. Por el contrario, los satélites equipados con sensores de microondas subestiman la concentración del hielo sobre todo en las zonas a baja concentración en la periferia de la banquisa y en verano, cuando se acumulan pozos de agua de deshielo en la superficie de la banquisa (Comiso y Kwok, 1996; Meier *et al.*, 2012). Por tanto, los mapas de HadISST muestran una zona de hielo marginal mayor que la observada en los mapas derivados de las observaciones de los satélites equipados con sensores de microondas.

Así pues, para trasladar el ajuste necesario de las cifras de extensión a los datos raster de HadISST, eliminamos las celdas de menor concentración hasta que su suma alcanza cada año los 833.000 km^2 necesarios para hacer los datos de HadISST consistentes con las observaciones de los satélites (figura 1).

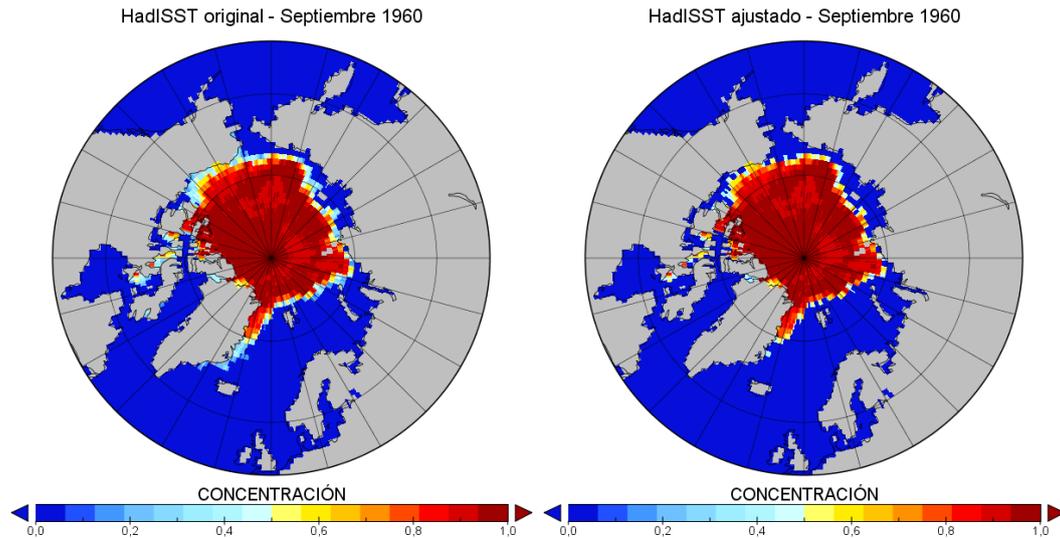


Fig. 1: a la izquierda, mapa original de HadISST para septiembre de 1960. A la derecha, mapa de HadISST ajustado para hacerlo consistente con los datos de los satélites.

De este modo obtenemos una serie muy similar a la de Meier *et al.* (2012) para el mes de septiembre entre 1953 y 2014. Pero, mientras el ajuste de Meier *et al.* (2012) para los datos anteriores a los satélites era sólo numérico, en nuestro caso hemos ajustado también los datos raster.

Naturalmente este método no garantiza una completa consistencia a lo largo de toda la serie. El período de solapamiento relativamente corto empleado para ajustar los valores de HadISST podría no ser representativo del conjunto de la serie desde 1953. Además, la serie ajustada sigue basándose en datos de diferente calidad y presentando lagunas sin observaciones reales en zonas como el sector siberiano.

2.3. Incorporando AARI en HadISST ajustado (1953-1978)

Dado que los mapas de AARI cubren la zona con menor densidad de observaciones reales en Walsh y HadISST, y que constituyen la fuente más completa para dicha zona, entre 1953 y 1978 incorporaremos sus datos en HadISST, previamente ajustado para ser consistente con la serie derivada de las observaciones de los satélites de microondas. Así, obtendremos una nueva serie de extensión de la banquisa ártica desde 1953 hasta el presente.

Para ello, seleccionamos en cada año los mapas de AARI que cubren el período de días más próximo al 16 de septiembre, que es la fecha correspondiente a los datos de HadISST para dicho mes. En primer lugar, hay que tener en cuenta que la resolución empleada en HadISST ($1 \times 1^\circ$) es mucho más baja que la de AARI ($12,5 \times 12,5$ kms.). Por ello, transformamos los datos de AARI para que tengan la misma resolución que HadISST. Lo que hacemos es calcular la concentración media del hielo en los datos de AARI correspondientes a cada celda de $1 \times 1^\circ$.

Dado que vamos a combinar concentraciones procedentes de distintas fuentes y probablemente no consistentes entre sí, igualaremos todas las celdas con hielo a un valor fijo, tanto en los datos de AARI como en los de HadISST ajustado. De esta forma, nuestra serie diferenciará entre zonas de agua y zonas de hielo, sin especificar la concentración de estas últimas. Así, presentará únicamente datos de extensión, y no de concentración o área, por haber una mayor incertidumbre y falta de consistencia en los mismos.

A continuación comparamos los datos de AARI con los de HadISST ajustado y sustituimos estos últimos por los de AARI en las celdas donde ambas fuentes presentan datos (figura 2).

De este modo, obtenemos una nueva serie de datos de extensión para el período 1953-1978, consistente con las observaciones de los satélites (SII) iniciadas en 1979.

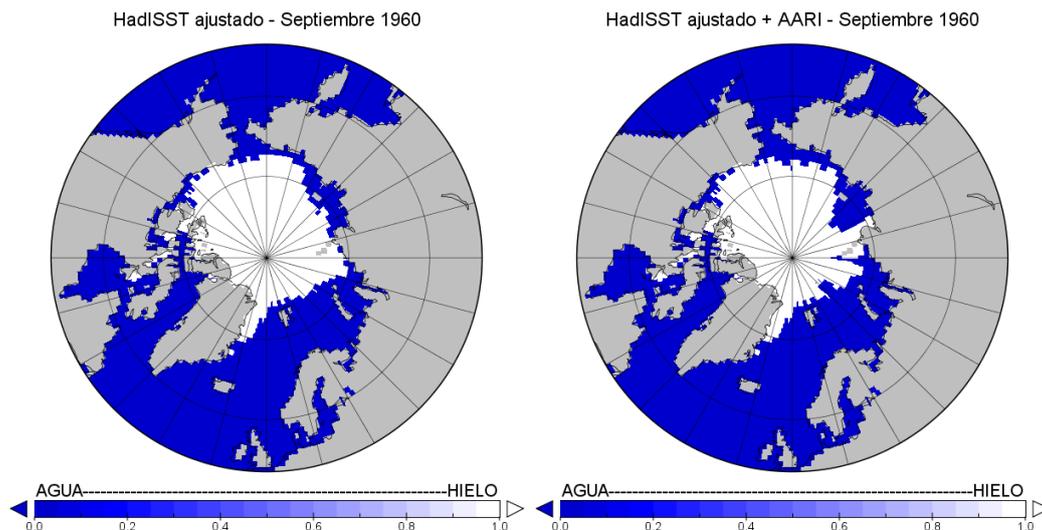


Fig. 2: a la izquierda, mapa de HadISST ajustado para septiembre de 1960. A la derecha, el resultado tras incorporar los datos de AARI para dicho mes.

2.4. Ampliando la serie hasta 1935

Dado que los datos de AARI se extienden hasta 1933, es posible prolongar nuestra serie hasta mediados de los años 30. Para ello, combinaremos los datos de los mapas de AARI en el período 1935-1952 con una nueva climatología base para este período. Descartamos los dos primeros años de los mapas de AARI, por tener una cobertura geográfica notablemente más reducida que en los años posteriores.

Antes de 1953, todos los datos de HadISST para septiembre se basan en climatologías e interpolaciones, sin incorporar ningún dato procedente de observaciones reales realizadas en dicho mes. En concreto, entre 1935 y 1938, los datos de HadISST para septiembre se componen de una combinación de distintas climatologías e interpolaciones de los datos de agosto de la serie de Walsh. Entre 1939 y 1952 HadISST emplea para septiembre una climatología plana derivada de la serie de Walsh. Esta climatología aparece en los datos de HadISST como una meseta separada por sendos saltos al inicio y fin del período de más de dos desviaciones estándar respecto a la variación media interanual en el mes de septiembre. Además, esta climatología presenta un valor más alto que el correspondiente a cualquier año en el período 1953-2014 en los propios datos de HadISST. Incluso en el período 1900-1938 los datos de HadISST sólo presentan seis años con una extensión ligeramente superior a la de esta climatología. Todo esto nos sugiere que dicha climatología probablemente sea poco realista.

Por todo ello, preferimos usar una nueva climatología como base para todo el período 1935-1952. Para decidir qué climatología emplear, tenemos en cuenta la correlación entre la temperatura en el Ártico y la extensión de la banquisa en septiembre. Tomamos los datos de temperatura de CRUTEM4 (Jones *et al.*, 2012), BEST (Rohde *et al.*, 2013) y GISS (Hansen *et al.*, 2010) y calculamos la media de temperatura para distintas bandas de latitud y distintos períodos de meses, obteniendo casi 20.000 series de temperatura. Calculamos la correlación de cada una de estas series con nuestros datos de extensión del hielo marino ártico en septiembre entre 1953 y 2014. La mejor correlación se da con la temperatura media del semestre abril- septiembre entre 70 y 90°N en los datos de CRUTEM4. El coeficiente de correlación negativa entre las dos variables es muy alto, de -0,88. Comparando ambas series suavizadas con una media de 18 años, la correlación es aún mayor, alcanzando valores muy cercanos a -1.

Entre 1953 y 2014, el período de 18 años que presenta una anomalía de temperatura más similar a la de 1935-1952 es 1985-2002 con +0,59°C respecto a la media 1951-1980, una desviación de temperatura casi igual a la observada en el período 1935-1952, que es de +0,58°C. Teniendo en cuenta la correlación

entre temperatura y banquisa, cabe esperar que en 1935-1952 la extensión del hielo marino ártico en septiembre fuera similar a la del período 1985-2002.

Así, calculamos la mediana de la extensión del hielo en septiembre en 1985-2002. Si una celda tiene hielo el 50 % de los años o más del período citado, la consideramos como hielo en nuestra climatología. Si es agua más del 50 % de los años, la consideramos como agua. La extensión para el período 1985-2002 calculada de este modo es de 6.994.000 km², algo mayor a la media aritmética de los meses de septiembre de dicho período, que es de 6.838.000 km². Dicha mediana será la nueva climatología que emplearemos como base para incorporar los datos de AARI en el período 1935-1952.

A continuación, comparamos los datos de AARI de cada año entre 1935 y 1952 con los de la nueva climatología, y sustituimos estos últimos por los de AARI en las celdas donde ambas fuentes presentan datos (ver figura 3).

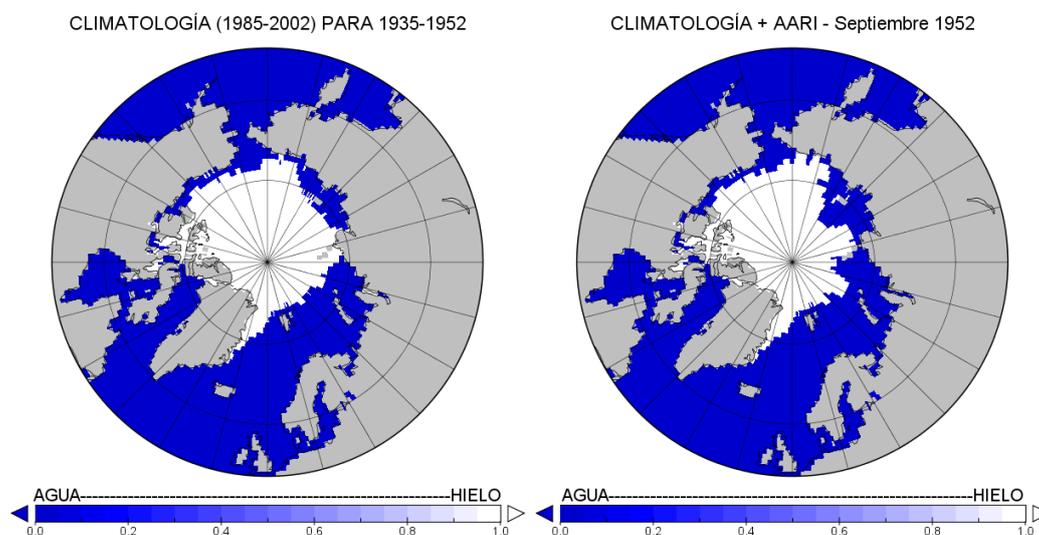


Fig. 3: A la izquierda, climatología usada como base en el período 1935-1952. A la derecha, dicha climatología tras incorporar los datos de AARI correspondientes a 1952.

De este modo, obtenemos una nueva serie de mapas y datos de extensión para el período 1935-1952. Unida a la serie elaborada para 1953-1978 y a los datos de satélite 1979-2014 (SII), se constituye una serie completa y consistente de la extensión de la banquisa ártica en septiembre durante todo el período de ocho décadas 1935-2014.

3. Resultados y discusión

3.1. Analizando la incorporación de los datos de AARI

En cuanto a la incorporación de los datos de AARI, un modo de valorar su fiabilidad y consistencia es comprobar el efecto de su inclusión entre 1972 y 1978. Este período es en el que se solapan los datos de HadISST y los de M-SII, y en base al cual hemos realizado el ajuste de HadISST para ser consistente con las observaciones de los satélites. Si tras la inclusión de los datos de AARI la media del período 1972-1978 sigue siendo similar a la calculada, esto indicaría que incluir los datos de AARI no afecta a la consistencia de la serie con las observaciones de los satélites. Por el contrario, si la incorporación de los datos de AARI desajustase significativamente el período 1972-1978, sería más dudosa la consistencia de su inclusión en dichos años y en los anteriores.

La incorporación de los datos de AARI en HadISST ajustado en 1972-1978 ocasiona un cambio de tan solo 15.000 km² en la extensión media del período, que pasa de 7.417.000 km² sin AARI, a 7.405.000

km² tras incorporar los datos de AARI (tabla 1). No es una diferencia significativa, lo que permite confiar en la consistencia de la inclusión de los datos de AARI en el período citado y en los años anteriores.

Tabla 1: Extensión de la banquisa ártica en septiembre entre 1972 y 1978 según los datos de HadISST ajustado, de HadISST ajustado tras incorporar los datos de AARI, y diferencia entre ambas series.

Año	HadISST ajustado (km ²)	HadISST ajustado + AARI (km ²)	Diferencia (km ²)
1972	8.003.248	7.677.929	-325.319
1973	7.240.238	7.416.327	176.089
1974	7.329.726	7.281.479	-48.247
1975	7.467.491	7.577.953	110.462
1976	7.318.814	7.190.226	-128.588
1977	6.901.490	6.799.861	-101.629
1978	7.664.315	7.875.194	210.879
Media	7.417.903	7.402.710	-15.193

En el período 1952-1971, el efecto de incorporar los datos de AARI se traduce en sustraer de media 157.000 km² a los datos de extensión de HadISST ajustado. No obstante, hay una importante variabilidad interanual en el sentido del ajuste, que resulta positivo en 10 de los años del período, sumando un máximo de unos 500.000 km² en 1958, y negativo en los 16 años restantes, sustrayendo un máximo de unos 800.000 km² en 1959, tal como se observa en la tabla 2.

Tabla 2: Extensión de la banquisa ártica en septiembre entre 1953 y 1971 según los datos de HadISST ajustado, de HadISST ajustado tras incorporar los datos de AARI, y diferencia entre ambas series.

Año	HadISST ajustado (km ²)	HadISST ajustado + AARI (km ²)	Diferencia (km ²)
1953	7.879.358	7.206.324	-673.034
1954	7.473.099	7.337.117	-135.982
1955	7.655.061	7.163.210	-491.851
1956	7.943.573	7.752.339	-191.234
1957	7.443.437	7.725.181	281.744
1958	7.372.084	7.873.258	501.174
1959	7.646.898	6.817.606	-829.292
1960	7.069.934	6.652.935	-416.999
1961	7.238.768	6.831.479	-407.289
1962	7.980.923	8.197.133	216.210
1963	8.318.280	8.479.050	160.770
1964	8.284.205	7.977.073	-307.132
1965	8.310.531	7.838.678	-471.853
1966	7.822.139	7.745.385	-76.754
1967	8.406.894	8.191.847	-215.047
1968	7.020.638	7.063.225	42.587
1969	8.435.735	8.460.903	25.168
1970	8.049.202	7.912.012	-137.190
1971	7.059.662	7.200.143	140.481
Media	7.758.443	7.601.310	-157.133

En cuanto al período 1935-1952, el efecto de incluir los datos de AARI en la climatología seleccionada supone de media sumarle 45.000 km². Es una diferencia pequeña, que apoya la confianza en la climatología seleccionada. En este período también se observa una importante variabilidad en el sentido del ajuste. En diez de los años resulta positivo, sumando un máximo de 756.000 km² en 1949, mientras que en los ocho restantes resulta negativo, restando un máximo de 499.000 km² en 1952, tal como se observa en la tabla 3.

Tabla 3: Extensión de la banquisa ártica en septiembre entre 1935 y 1952 según los datos de la climatología empleada para el período, de dicha climatología tras incorporar los datos de AARI, y diferencia entre ambas series.

Año	Climatología (km ²)	Climatología + AARI (km ²)	Diferencia (km ²)
1935	6.993.912	6.813.583	-180.329
1936	6.993.912	7.325.553	331.641
1937	6.993.912	6.812.061	-181.851
1938	6.993.912	6.933.001	-60.911
1939	6.993.912	6.949.812	-44.100
1940	6.993.912	7.008.576	14.664
1941	6.993.912	7.009.754	15.842
1942	6.993.912	7.155.402	161.490
1943	6.993.912	6.614.280	-379.632
1944	6.993.912	7.093.722	99.810
1945	6.993.912	6.572.460	-421.452
1946	6.993.912	7.424.830	430.918
1947	6.993.912	7.122.338	128.426
1948	6.993.912	7.384.915	391.003
1949	6.993.912	7.750.020	756.108
1950	6.993.912	7.136.345	142.433
1951	6.993.912	7.096.024	102.112
1952	6.993.912	6.494.754	-499.158
Media	6.993.912	7.038.746	44.834

3.2. Analizando la climatología empleada para 1935-1952

Teniendo en cuenta la correlación entre la extensión de la banquisa y la temperatura observada en las estaciones meteorológicas del Ártico, hemos seleccionado la mediana del período 1985-2002 (6.994.000 km²) como la climatología más apropiada para ser usada como base en la que incorporar los datos de AARI en el período 1935-1952. Ambos períodos presentan prácticamente la misma anomalía de temperatura respecto a la media 1951-1980: +0,58 y +0,59°C.

No obstante, comprobamos también el efecto de emplear climatologías distintas. Entre 1953 y 2014 el período de 18 años más frío es 1963-1980, con una desviación de temperatura de -0,13°C respecto a la media 1951-1980, lo que supone -0,71°C respecto a la media 1935-1952. Calculamos la mediana de extensión del hielo marino en el período 1963-1980, obteniendo un resultado de 7.707.000 km², algo superior a la media aritmética de dicho período, que es de 7.584.000 km². Si empleamos la climatología 1963-1980 como base para 1935-2012, el ajuste medio que ocasiona la incorporación de los datos de AARI es restar unos 340.000 km², mientras que usando como base la media 1985-2002 sumaba tan solo 40.000 km². Esto apoyaría la idoneidad de la elección de la climatología 1985-2002, al resultar mucho más próxima a lo que indican los datos de AARI durante los años 1935-1952.

Si 1955-1972 es $0,71^{\circ}\text{C}$ más frío que 1935-1952, ahora buscaremos un período de 18 años que sea aproximadamente $0,71^{\circ}\text{C}$ más cálido. El que más se aproxima es 1995-2012, $0,72^{\circ}\text{C}$ más cálido que 1935-1952. Calculamos la mediana de extensión del hielo marino en el período 1995-2012, obteniendo un resultado de $5.967.000\text{ km}^2$, algo superior a la media aritmética de dicho período, que es de $5.771.000\text{ km}^2$. Si empleamos la climatología 1995-2012 como base para 1935-1952, el ajuste medio que ocasiona la incorporación de los datos de AARI es sumar 430.000 km^2 , mientras que usando como base la media 1985-2002 sumaba tan solo 40.000 km^2 . Esto respalda nuevamente la idoneidad de la elección de la climatología 1985-2002.

3.3. Nueva serie 1935-2014

Obtenemos una nueva serie completa y consistente recogiendo la extensión de la banquisa ártica en el mes de septiembre durante el período de ocho décadas desde 1935 hasta 2014 (figura 4).

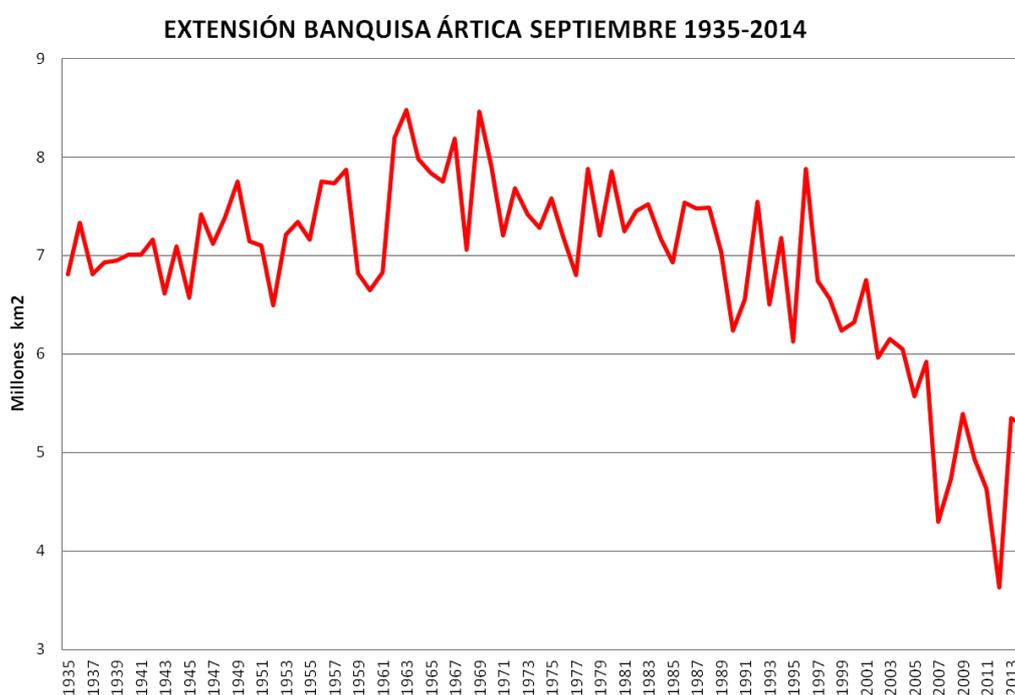


Fig. 4: extensión de la banquisa ártica en el mes de septiembre entre 1935 y 2014 según los datos de este trabajo, expresada en millones de km^2 .

Antes de los satélites, la serie presenta una mayor precisión y fiabilidad en el sector siberiano que las disponibles hasta ahora (Walsh, HadISST). En las cifras totales, lo más destacable es el cambio en el período 1935-1952, que en Walsh y HadISST dependía completamente de climatologías e interpolaciones. Según los datos de esta nueva serie, la banquisa ártica en septiembre durante el período 1935-1952 presenta unas extensiones notablemente más bajas que las mostradas por las series disponibles hasta ahora (HadISST) tal como se observa en la figura 5.

En el período 1953-1978 la nueva serie es bastante similar a los resultados obtenidos por Meier *et al.* (2012). En concreto, nuestros datos en este período presentan una extensión media 110.000 km^2 menor que los de Meier *et al.* (2012), con una extensión de $7.550.000\text{ km}^2$ frente a $7.660.000\text{ km}^2$. A partir de 1979 usamos los datos de SII, por lo que nuestra serie es idéntica a la de Meier *et al.* (2012) a partir de dicho año, y puede actualizarse anualmente usando las actualizaciones publicadas por el NSIDC.

Naturalmente, nuestra serie no garantiza una fiabilidad absoluta. Por un lado, el período de solapamiento relativamente corto (1972-1978) empleado para ajustar los valores de HadISST desde 1953 podría no

ser representativo del conjunto de la serie desde dicho año. Por otro lado, tanto los datos de AARI en el sector siberiano como los de HadISST en el sector americano podrían tener faltas de consistencia interna derivadas del uso de diferentes fuentes y métodos de observación en distintos períodos. Además, el uso en nuestra serie de una climatología como base para el período 1935-1952 suprime la variabilidad interanual en las zonas no cubiertas por AARI. No obstante, dado que los datos de Walsh y HadISST en la mayoría de esos años son una climatología plana para todo el Ártico, esta nueva serie supone un avance hacia una representación más realista de la variabilidad en el período 1935-1952, al haber sustituido la climatología plana por observaciones reales en el sector siberiano.

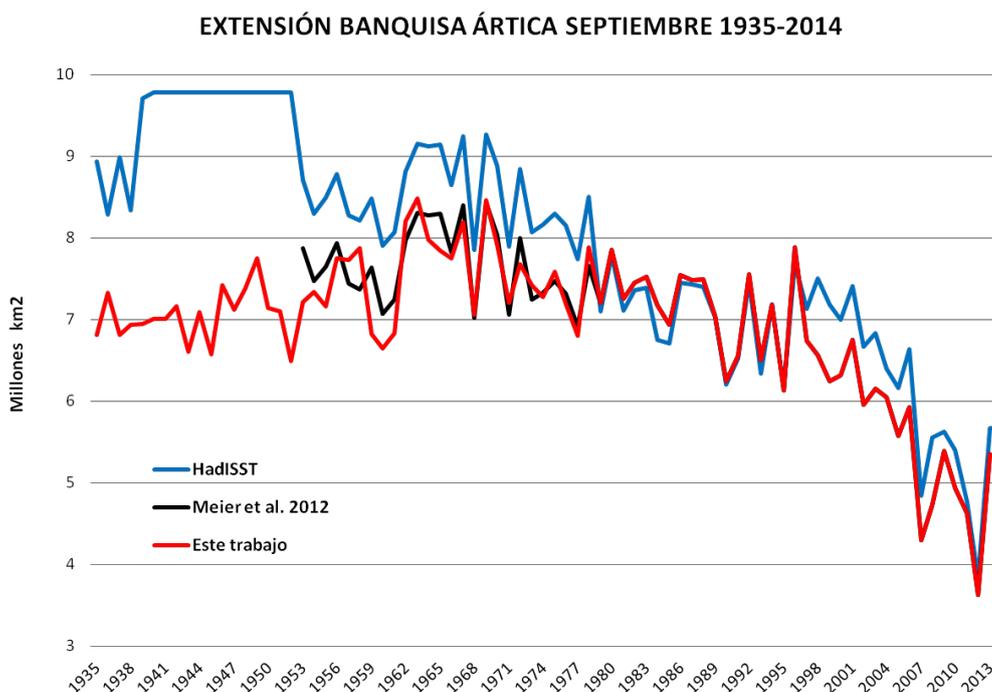


Fig. 5: extensión del hielo marino ártico en septiembre entre 1935 y 2014 según los datos de este trabajo (línea roja), los de HadISST (línea azul), y los de Meier *et al.* (línea negra), estos últimos desde 1953.

Esta serie permite comparar mapas consistentes de la extensión de la banquisa en el mes de septiembre entre 1935 y 2014. Los mínimos más bajos de la era anterior a los satélites, registrados en 1943, 1945, 1952 ó 1960, se mueven en torno a unos 6,5 millones de km^2 , siendo superiores al mínimo de cualquier año posterior a 2001. En la figura 6 se muestra la media de los septiembrés en la primera década de la serie (1935-1944), la de menor extensión en la era anterior a los satélites, comparada con la media de la última década de la serie (2005-2014), la de menor extensión en la serie de observaciones de los satélites de microondas.

3.4. Análisis de tendencias en la serie 1935-2014

Empleamos los resultados para calcular estimaciones de tendencias lineales según el método de mínimos cuadrados, y las comparamos con las observadas en el período de los satélites y con las presentadas para antes de los satélites por HadISST y Meier *et al.* (2012). Presentamos las tendencias como porcentaje por década, siguiendo uno de los procedimientos habituales en el análisis de series de extensión de hielo marino (Wohlleben *et al.*, 2013). Los resultados se muestran en la tabla 4.

Según los datos de este trabajo, entre 1935 y 2014 la tendencia lineal de la extensión de la banquisa ártica en el mes de septiembre es de un $-3,5\%$ /década respecto a la media 1981-2010. Esta tendencia es claramente inferior al -8% /década derivado de los datos de HadISST original. La diferencia se debe sobre todo al distinto comportamiento en el período anterior a los satélites (1935-1978). Mientras según

HadISST la tendencia en dicho período es negativa, con un $-4,6\%/d\acute{e}cada$, según este trabajo la tendencia es positiva, con un $+2,8\%/d\acute{e}cada$. La tendencia negativa de HadISST parece depender de la climatología plana empleada en 1939-1952, climatología que presenta una extensión claramente mayor que cualquier valor de toda la serie 1953-2014 en los propios datos de HadISST.

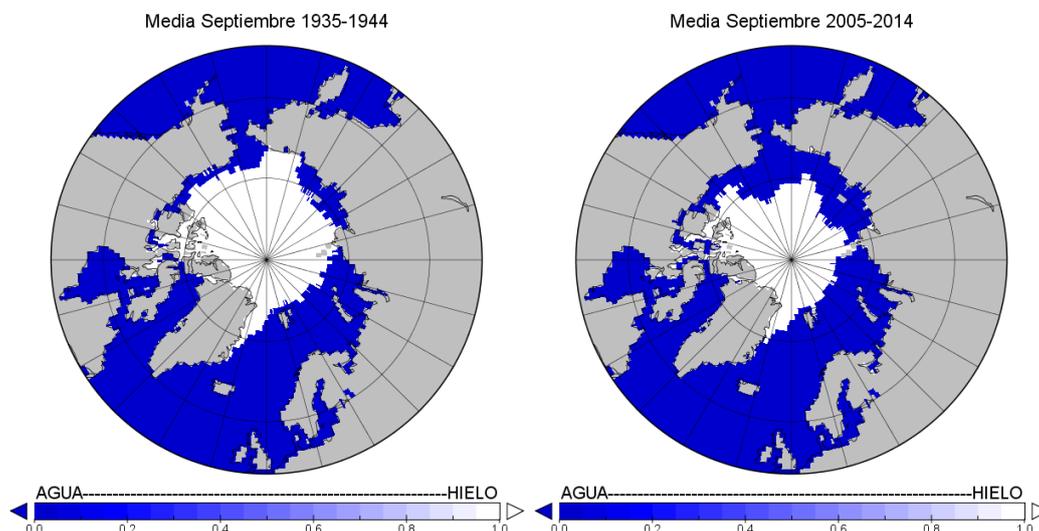


Fig. 6. Extensión media del hielo marino ártico en el mes de septiembre según los datos de este trabajo. A la izquierda, media 1935-1944 ($7.021.000 \text{ km}^2$). A la derecha, media 2005-2014 ($5.182.000 \text{ km}^2$)

Tabla 4: tendencias lineales por década de las anomalías respecto a la media 1981-2010 de la extensión de la banquisa ártica en septiembre para diferentes períodos según los datos de este trabajo, de HadISST y de Meier *et al.* 2012.

	1935-2014	1935-1952	1935-1978	1953-2014	1953-1978
Este trabajo	$-3,5\%$	$+1,5\%$	$+2,8\%$	$-6,8\%$	$+0,5\%$
HadISST	-8%	$+9,7\%$	$-4,6\%$	$-8,6\%$	$-1,5\%$
Meier <i>et al.</i>	ND	ND	ND	$-7,3\%$	$-1,5\%$

La tendencia lineal para el mes de septiembre entre 1953 y 2014 en la serie de extensión de la banquisa ártica presentada por Meier *et al.* (2012) actualizada hasta 2014 es de un $-7,3\%$ por década. Nuestra serie, que incorpora los datos de AARI en el período anterior a los satélites, muestra para ese período una tendencia negativa ligeramente menor, de un $-6,8\%$ por década.

La serie consistente 1935-2014 también nos permite analizar los cambios en el comportamiento de las tendencias durante las ocho décadas cubiertas por la misma. La figura 7 muestra la evolución de la tendencia según se añaden años al final de la serie iniciada en 1935. El primer valor de tendencia en la figura 8 es 1944, correspondiendo a la tendencia de un período de diez años (1935-1944). Los puntos siguientes van ampliando la serie de año en año, hasta mostrar en 2014 la tendencia para el período completo de 80 años 1935-2014.

La significancia estadística de estas tendencias ha sido analizada empleando una metodología similar a la utilizada por Cavalieri y Parkinson (2012) y Meier *et al.* (2012), basada en la relación entre la tendencia y la desviación estándar de la tendencia, con un valor de 2,75 para el 99% de confianza. Los intervalos de confianza según este método son representados por la línea verde de la figura 7.

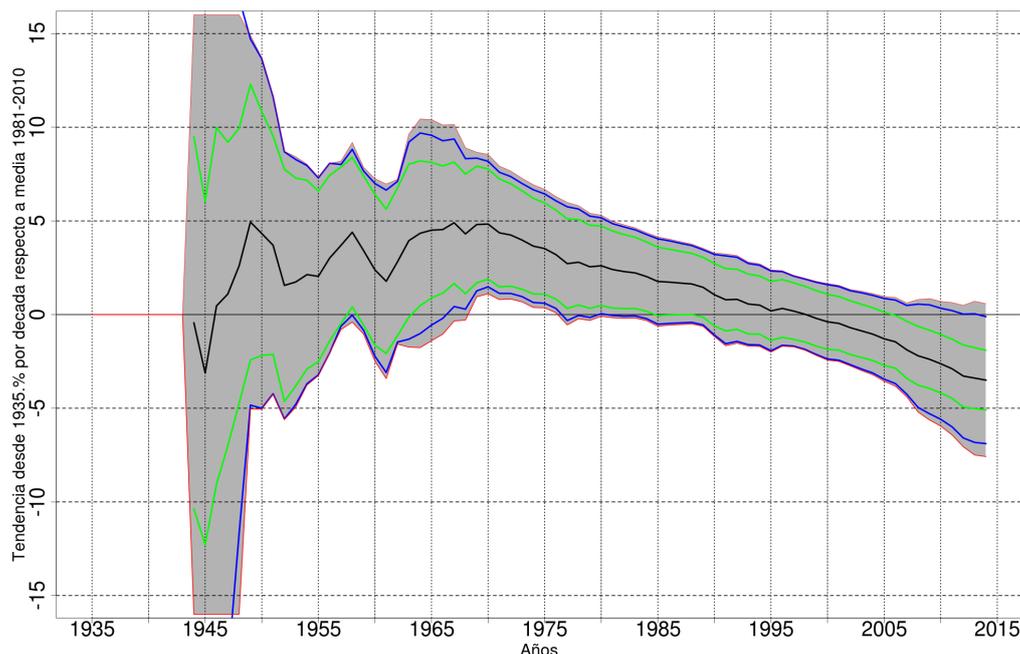


Fig. 7: Tendencias desde 1935 (línea negra) expresadas en % por década respecto a la media 1981-2010 con intervalos de confianza al 99 % según tres métodos de exigencia creciente (líneas verde, azul y roja).

Así, durante las primeras décadas de la serie las tendencias son positivas, alcanzando significancia estadística entre 1964 y 1984. Las tendencias siguen siendo positivas hasta finales de los años 90, aunque ya sin significancia estadística. Desde 1999 las tendencias se convierten en negativas, alcanzando significancia estadística a partir de 2006.

No obstante, este método supone implícitamente que los errores se distribuyen de forma normal y los valores de la serie son independientes entre sí. Sin embargo, en las series climáticas suele haber cierto grado de auto-correlación. Por ello, siguiendo las indicaciones de Santer *et al.* (2000) analizamos también la significancia estadística con un segundo método más exigente, que incluye una corrección en el cálculo de la desviación estándar. Así, en lugar de utilizar el número de medidas reales, se calcula un número efectivo que depende del coeficiente de auto-correlación de los errores. Los intervalos de confianza según este segundo método los representa la línea azul de la figura 7.

Añadimos también un tercer test de significancia estadística más exigente aún que los anteriores, y propuesto también por Santer *et al.* (2000) utilizando el número efectivo de medidas para indexar el valor a calcular en la distribución t de student con la que calcular el intervalo de confianza. Los intervalos de confianza según este tercer método corresponden a la línea roja de la figura 7.

Con el método más exigente, la tendencia descendente del $-3,5\%/década$ en 1935-2014 no alcanza a ser estadísticamente significativa al 99 %, aunque sí que lo es al 89 % de confianza. También continúan siendo estadísticamente significativas al 99 % las tendencias positivas desde 1935 hasta el período entre 1969 y 1976.

Finalmente, calculamos la significancia estadística de las tendencias aplicando el método de mínimas diferencias absolutas, propuesto también por Santer *et al.* (2000). En general, este método es menos sensible a valores que se apartan mucho del conjunto. Con este método, la tendencia descendente 1935-2014 continúa siendo estadísticamente significativa, al 99 % según el criterio menos exigente y al 86 % con el más exigente de los descritos anteriormente.

Para estudiar si la serie de datos se ajusta más adecuadamente por varias rectas que por una sola, aplicamos los cálculos de Lund y Reeves (2002) a través del valor F max. Cuando este valor Fmax es sufi-

cientemente alto, se considera que hay un punto de cambio estadísticamente significativo en el punto c para el que se produce el máximo, y estaría justificado realizar un ajuste mediante dos rectas, una para la primera sección de los datos entre los puntos 1 y c , y otra recta distinta para la segunda sección entre los puntos $c+1$ y n . La distribución estadística de F_{\max} para estimar si el punto de cambio es estadísticamente significativo no es fácil de deducir, pero se puede obtener un valor aproximado a partir de simulación. Para ello se pueden utilizar las indicaciones de Lund *et al.* (2007) para generar series aleatorias teniendo en cuenta la longitud de la serie que estudiamos ($n=80$) y el grado de auto correlación (0,742).

El valor F_{\max} calculado en la serie de extensión de hielo es de 56,31 para el año 1985, es decir, hay una confianza del 99% de que hay un punto de cambio en ese año. No hay ningún otro punto que alcance valores significativos. Por tanto, se podría concluir que la serie puede ajustarse mediante dos líneas rectas, una entre 1953 y 1985, y otra entre 1986 y 2014.

Es posible también abordar el problema de una forma distinta, utilizando el método y software proporcionado por Tomé y Miranda (2004). Puesto que este método no proporciona intervalos de confianza, el número de puntos de cambio significativos debe establecerse previamente. Utilizando el resultado previo y exigiendo un solo punto de cambio, este se sitúa en 1986.

Para evaluar los distintos ajustes se ha seguido el procedimiento de Seidel y Lanzante, 2004. El método de ajuste que ofrezca un menor valor de $S(q)$ es el que se considera más adecuado. La mejor solución corresponde al método de Tomé-Miranda (2004) con un sólo punto de ruptura, y la siguiente mejor solución sería la de Lund y Reeves (2002) también con un solo punto de ruptura. Tanto la solución de una sola recta, como las que presentan dos o más puntos de ruptura (ya sea usando el método de Lund y Reeves 2002 o el de Tomé y Miranda 2004) proporcionan valores de $S(q)$ más grandes.

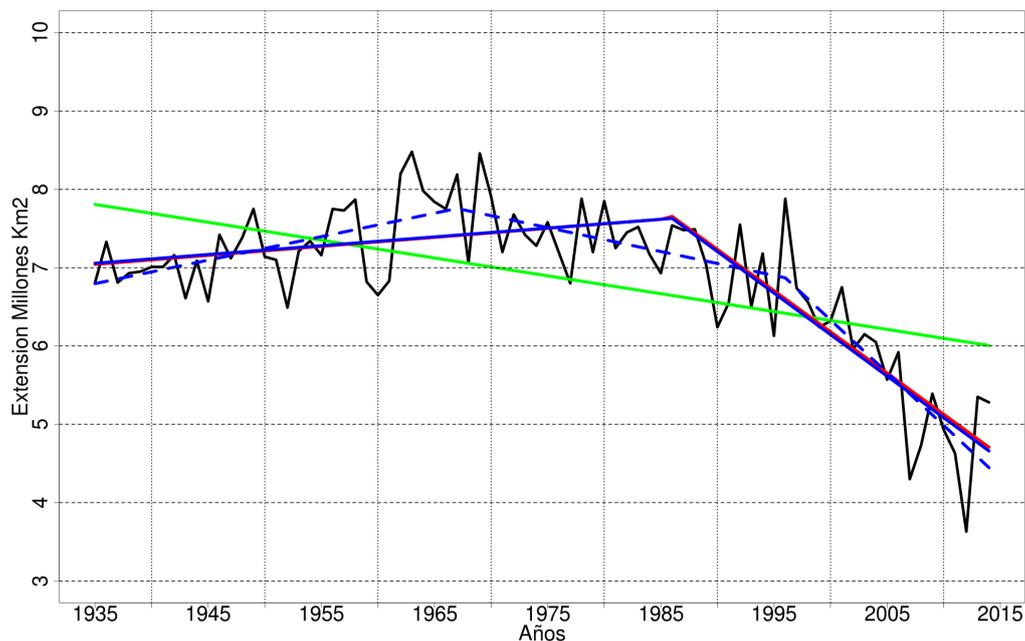


Fig. 8: La línea verde es la tendencia lineal en todo el período. La línea roja es el ajuste de Lund-Reeves con punto de ruptura en 1985, y la azul la de Tomé-Miranda con punto de ruptura en 1986. La línea azul a trazos es la solución de Tomé-Miranda con dos puntos de ruptura.

3.5. Correlación con temperaturas.

Por obvias razones físicas, cabe esperar una correlación negativa entre la temperatura en el Ártico y la extensión del hielo marino en dicha zona. Así, entre 1935 y 2014 la correlación de la nueva serie de extensión de la banquisa con la temperatura media del semestre abril-septiembre entre 70 y 90°N en los

datos de CRUTEM4 (Jones *et al.*, 2012) es de -0,84. Es una correlación claramente superior a la existente entre dichos datos de temperatura y los de extensión del hielo marino ártico según HadISST, que se sitúa en -0,56.

En el período 1953-2014 la correlación de la serie derivada de este trabajo con la temperatura es de -0,88, muy similar a la de Meier *et al.* (2012) y algo superior a la de HadISST (-0,78) tal como se observa en la tabla 5.

Tabla 5: Correlación (Pearson) en distintos períodos entre la temperatura media del semestre abril-septiembre en estaciones meteorológicas del Ártico (70-90°N) según los datos de CRUTEM4 (Jones *et al.*, 2012) y la extensión de la banquisa ártica en septiembre según los datos de este trabajo, de HadISST, y de Meier *et al.* (2012). Entre paréntesis el p value de Kendall.

	1935-2014	1935-1952	1935-1978	1953-2014	1953-1978
Este trabajo	-0,84 (0,0001)	-0,54 (0,0444)	-0,65 (0,0000)	-0,88 (0,0000)	-0,57 (0,0006)
HadISST	-0,56 (0,0000)	-0,40 (0,3586)	+0,05 (0,7428)	-0,78 (0,0000)	-0,42 (0,0260)
Meier <i>et al.</i>	ND	ND	ND	-0,86 (0,0000)	-0,42 (0,0231)

La correlación de los datos de este estudio con la temperatura en los años anteriores a 1979 es mayor y más significativa que la de HadISST. En concreto, entre 1935 y 1978 la nueva serie presenta una correlación de -0,65 con la temperatura en el Ártico. Por el contrario, en este período HadISST presenta una correlación de +0,05. Esta correlación positiva es lo contrario de lo esperable, y posiblemente sea debida a la climatología exageradamente alta empleada por HadISST en el período 1939-1952.

No obstante, para asegurarnos de que la mejor correlación no depende únicamente de la tendencia de las series, calculamos también las correlaciones entre ellas mediante tres métodos que eliminan el efecto de las tendencias. En primer lugar, calculamos la correlación entre las variaciones interanuales, utilizando series construidas como diferencia entre un valor y el anterior. En segundo lugar, calculamos la correlación entre los residuos de las series tras eliminar la tendencia lineal de cada una de ellas para el período 1935-2014. En tercer lugar, calculamos la correlación entre los residuos de las series tras eliminar la tendencia del ajuste de cada una de ellas mediante un polinomio de segundo grado. Los resultados se observan en la tabla 6.

Usando estos tres métodos, la correlación de los datos de este estudio con la temperatura una vez eliminado el efecto de las tendencias sigue siendo mejor que la de HadISST en todos los períodos.

La mejor correlación entre la temperatura en el Ártico y nuestra serie es visualmente apreciable en la figura 8. En ella se incluyen los datos de banquisa entre 1935 y 2014 derivados de este trabajo y de HadISST, así como la extensión estimada del hielo con intervalos de confianza a partir de una regresión de la temperatura en el Ártico en función de su correlación con la extensión de la banquisa en septiembre en el período de observaciones de los satélites 1979-2014.

4. Conclusiones

Hemos obtenido una nueva y consistente serie de datos raster de extensión de la banquisa ártica en el mes de septiembre entre 1935 y 2014. Al haber incorporado los datos de los mapas operacionales de AARI en el período anterior a los satélites (1935-1978), la nueva serie ofrece en dicho período una mayor precisión y fiabilidad en el sector siberiano que las series con cobertura para todo el Ártico disponibles hasta ahora. Lo más destacable es la mejora en la consistencia del período 1935-1952, que hasta ahora dependía completamente de climatologías e interpolaciones. Según los datos de esta nueva serie, la banquisa ártica

en septiembre durante el período 1935-1952 presenta unas extensiones notablemente más bajas que las mostradas por las series disponibles hasta ahora (Walsh, HadISST), lo que corresponde mejor con las temperaturas observadas en el Ártico en esos años.

Tabla 6: Correlación (Pearson) en distintos períodos entre la temperatura media del semestre abril-septiembre en estaciones meteorológicas del Ártico (70-90°N) según los datos de CRUTEM4 (Jones *et al.*, 2012), y la extensión de la banquisa ártica en septiembre según los datos de este trabajo, de HadISST y de Meier *et al.* (2012) usando las diferencias interanuales (a), los residuos tras eliminar la tendencia lineal de todo el período (b) y los residuos tras eliminar la tendencia del ajuste mediante un polinomio de segundo grado (c). (Entre paréntesis el p-value de Kendall).

		1935-2014	1935-1952	1935-1978	1953-2014	1953-1978
a)	Este trabajo	-0,54 (0,0000)	-0,50 (0,0476)	-0,30 (0,0272)	-0,59 (0,0000)	-0,29 (0,0006)
	HadISST	-0,50 (0,0000)	-0,40 (0,3028)	-0,31 (0,0553)	-0,53 (0,0000)	-0,22 (0,0260)
	Meier <i>et al.</i>	ND	ND	ND	-0,58 (0,0000)	-0,22 (0,0231)
b)	Este trabajo	-0,82 (0,0000)	-0,52 (0,1849)	-0,54 (0,0002)	-0,78 (0,0000)	-0,59 (0,0012)
	HadISST	-0,53 (0,0000)	-0,20 (0,3065)	-0,35 (0,0627)	-0,59 (0,0000)	-0,50 (0,0144)
	Meier <i>et al.</i>	ND	ND	ND	-0,75 (0,0000)	-0,50 (0,0144)
c)	Este trabajo	-0,61 (0,0000)	-0,56 (0,1611)	-0,52 (0,0002)	-0,62 (0,0000)	-0,51 (0,0113)
	HadISST	-0,40 (0,0019)	-0,40 (0,1204)	-0,33 (0,1013)	-0,49 (0,0004)	-0,40 (0,0404)
	Meier <i>et al.</i>	ND	ND	ND	-0,58 (0,0000)	-0,40 (0,0449)

La nueva serie, que presenta datos consistentes a lo largo de ocho décadas, ayuda a situar en un contexto climático más amplio el significativo descenso en la extensión del hielo marino ártico en septiembre en el período de observaciones de los satélites, permitiendo una comparación directa con el final del anterior período de calentamiento en el Ártico observado durante la primera mitad del siglo XX y que alcanzó su máximo en torno a 1940 (Polyakov *et al.*, 2003a; Jones *et al.*, 2012).

Los últimos treinta años (1985-2014) destacan como un período de persistente descenso en la extensión de la banquisa ártica en el mes de septiembre, situándose a partir de 2002 en los valores más bajos desde el inicio de la serie. Así, los mínimos anuales más bajos en el período anterior a los satélites, que se registran en las primeras décadas de la serie (1943, 1945, 1952, 1960) se mueven en torno a unos 6,5 millones de km², y son más altos que el mínimo de cualquier año posterior a 2001.

Según los datos de este trabajo, entre 1935 y 2014 la tendencia lineal de la extensión de la banquisa ártica en el mes de septiembre es negativa y estadísticamente significativa, con un valor de -3,5 % por década. Sin embargo, hasta mediados de los años 80 la tendencia es ligeramente positiva de forma también estadísticamente significativa. Este hecho podría sugerir la existencia de una oscilación multidecadal superpuesta a una tendencia de fondo descendente en la extensión del hielo marino ártico. Esta posible oscilación multidecadal no es observable en Walsh o HadISST, pero sí en la temperatura y otros parámetros climáticos del Ártico (Polyakov *et al.* 2003a, 2004 y 2008) y ha sido apuntada también para la banquisa por otros estudios (Polyakov *et al.* 2003b; Miles *et al.*, 2014).

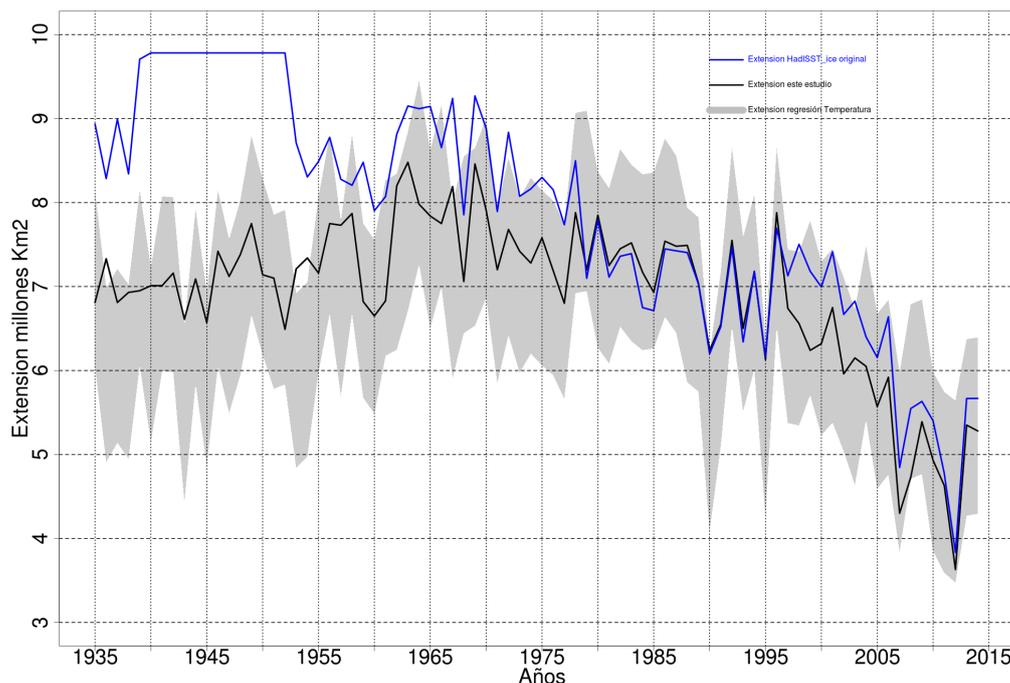


Fig. 9: Extensión de la banquisa ártica en septiembre. Línea azul, datos de HadISST. Línea negra, datos de este trabajo. Las bandas grises corresponden a la estimación de extensión de la banquisa a partir de una regresión de la temperatura en el Ártico en función de su correlación con la extensión de la banquisa en septiembre en el período de observaciones de los satélites 1979-2014.

La nueva serie de extensión del hielo marino ártico en septiembre entre 1935 y 2014 presenta una mejor correlación con las temperaturas observadas en el Ártico que las series disponibles hasta ahora para el mismo período. La serie puede también servir para ser comparada con los resultados de modelos numéricos. Consideramos que sería interesante ampliar la serie a todos los meses del año, siguiendo una metodología similar a la empleada aquí para el mes de septiembre. Una nueva serie cubriendo todos los meses del año quizá podría ayudar a reconciliar algunas diferencias entre temperaturas, hielo y modelos en la primera mitad del siglo XX (Semenov y Latif, 2012; Semenov, 2014).

5. Agradecimientos

Queremos dar las gracias a toda la comunidad de <http://foro.tiempo.com/>, punto de origen de este trabajo. También agradecer a Walt Meier y a todo el NSIDC su exquisita atención a nuestras consultas.

6. Bibliografía

Arctic and Antarctic Research Institute (2007): Sea ice charts of the Russian Arctic in gridded format, 1933-2006. Edited and compiled by V. Smolyanitsky, V. Borodachev, A. Mahoney, F. Fetterer, and R. Barry. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center.

Bengtsson L, Semenov VA, Johannessen OM (2004): The early twentieth-century warming in the Arctic – A possible mechanism. *Journal of Climate*, 17:4045-4057.

Cavalieri DJ, Parkinson CL, Gloersen P, Zwally H (1996, updated yearly): Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. <http://nsidc.org/data/nsidc-0051.html>

Cavalieri DJ, Parkinson CL, Vinnikov KY (2003): 30-Year Satellite Record Reveals Contrasting Arctic and Antarctic Decadal Sea Ice Variability. *Geophysical Research Letters*, 30(18).

- Cavaliere DJ, Parkinson CL (2012): Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010. *The Cryosphere*, 6:881-889, doi:10.5194/tc-6-881-2012.
- Comiso JC, R Kwok (1996): Surface and radiative characteristics of the summer Arctic sea ice cover from multisensor satellite observations. *J. Geophys. Res.*, 101:28397-28416, doi:10.1029/96JC02816.
- Fetterer F, Knowles K, Meier W, Savoie M (2002, updated daily): Sea Ice Index. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. <http://dx.doi.org/10.7265/N5QJ7F7W>
- Hansen J, Ruedy R, Sato M, Lo K (2010): Global surface temperature change, *Rev. Geophys.*, 48, RG4004, doi:10.1029/2010RG000345.
- Johannessen OM, Bengtsson L, Miles MW, Kuzmina SI, Semenov VA, Alekseev GV, *et al.* (2004): Arctic climate change: Observed and modelled temperature and sea ice variability. *Tellus A*, 56:328-341. doi:10.1111/j.1600-0870.2004.00060.x
- Jones PD, Lister DH, Osborn TJ, Harpham C, Salmon M, Morice CP (2012): Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. *J. Geophys. Res.*, 117, D05127, doi:10.1029/2011JD017139.
- Lund R, Reeves J (2002): Detection of undocumented changepoints: a revision of the two-phase regression model. *Journal of Climate*, 15:2547-2554.
- Lund R, Wang XL, Lu QQ, Reeves J, Gallagher C, Feng Y (2007): Changepoint detection in periodic and autocorrelated time series. *Journal of Climate*, 20:5178-5190.
- Mahoney AR, Barry RG, Smolyanitsky V, Fetterer F (2008): Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933-2006. *J. Geophys. Res.*, 113, C11005, doi:10.1029/2008JC004830.
- Maslanik J, Stroeve J (1999, updated daily): Near-Real-Time DMSP SSM/I-SSMIS Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. <http://nsidc.org/data/nsidc-0081.html>
- Meier WN, Stroeve J, Fetterer F (2007): Whither Arctic sea ice? A clear signal of decline regionally, seasonally and extending beyond the satellite record, *Ann. Glaciol.*, 46:428-434.
- Meier WN, Stroeve J, Barrett A, Fetterer F (2012): A simple approach to providing a more consistent Arctic sea ice extent time series from the 1950s to present. *The Cryosphere*, 6:1359-1368, doi:10.5194/tc-6-1359-2012.
- Miles MW, Divine DV, Furevik T, Jansen E, Moros M, Ogilvie AEJ (2014): A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice, *Geophysical Research Letters*, 41:463-469.
- Overland JE, Wang M (2013): When will the summer Arctic be nearly sea ice free?. *Geophysical Research Letters*, 40:2097-2101, doi:10.1002/grl.50316.
- Polyakov IV, Bekryaev RV, Alekseev GV, Bhatt US, Colony RL, Johnson MA, *et al.* (2003a): Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875-2000. *Journal of Climate*, 16:2067-2077.
- Polyakov IV, Bekryaev RV, Alekseev GV, Bhatt US, Colony RL, Johnson MA, *et al.* (2003b): Long-term ice variability in Arctic marginal seas. *Journal of Climate*, 16:2078-2085.
- Polyakov IV, Alekseev GV, Timokhov LA, Bhatt US, Colony RL, Simmons HL, Walsh D, Walsh JE, Zakharov VF (2004): Variability of the intermediate Atlantic water of the Arctic Ocean over the last 100 years. *Journal of Climate*, 17:4485-4497,
- Polyakov IV, Alexeev VA, Belchansky GI, Dmitrenko IA, Ivanov VV, Kirillov SA, Korablev AA, Steele M, Timokhov LA, Yashayaev I (2008): Arctic ocean freshwater changes over the past 100 years and their causes. *Journal of Climate*, 21:364-384, doi:10.1175/2007jcli1748.1.

- Rayner NA, Parker DE, Horton EB, Folland CK, Alexander LV, Rowell DP, Kent EC, Kaplan A (2003): Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 108, No. D14, 4407, doi:10.1029/2002JD002670
- Rohde R, Muller RA, Jacobsen R, Muller E, Perlmutter S, *et al.* (2013): A New Estimate of the Average Earth Surface Land Temperature Spanning 1753 to 2011. *Geoinfor. Geostat.: An Overview* 1:1, doi:10.4172/2327-4581.1000101.
- Santer BD, Wigley TML, Boyle JS, Gaffen DJ, Hnilo JJ, Nychka D, Parker DE, Taylor KE (2000): Statistical significance of trends and trend differences in layer-average atmospheric temperature time series. *J. Geophys. Res.*, 105:7337-7356, doi:10.1029/1999JD901105.
- Screen JA, Simmonds I (2010): The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 464:1334-1337, doi:10.1038/nature09051.
- Seidel DJ, Lanzante JR (2004): An assessment of three alternatives to linear trends for characterizing global atmospheric temperature changes. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 109 (D14).
- Semenov VA (2014): Role of sea ice in formation of wintertime arctic temperature anomalies. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 50:343-349.
- Semenov V, Latif M (2012): The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice. *The Cryosphere*, 6:1231-1237, doi 10.5194/tc-6-1231-2012.
- Serreze MC, Barry RG (2011): Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, 77:85-96.
- Titchner HA, Rayner NA (2014): The Met Office Hadley Centre sea ice and sea surface temperature data set, version 2: 1. Sea ice concentrations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119:2864-2889.
- Tomé AR, Miranda PMA (2004): Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters. *Geophysical Research Letters*, 31:2-5, doi:10.1029/2003GL019100.
- Walsh JE (1978): A data set on Northern Hemisphere sea ice extent, 1953-76. *Glaciol. Data Rep. GD-2, Arctic Sea Ice, Part 1*, pp. 49-51.
- Walsh JE, Johnson CM (1978): Analysis of Arctic sea ice fluctuations 1953-1977. *J. Phys. Oceanogr.*, 9:580-591.
- Walsh JE, Chapman WL (2001): Twentieth-century sea ice variations from observational data. *Ann. Glaciol.*, 33:444-448.
- Wohlleben T, Tivy A, Stroeve J, Meier W, Fetterer F, Wang J, Assel R (2013): Computing and representing sea ice trends: toward a community consensus. *Eos Trans. AGU*, 94(40), 352.

