

Transporte de humedad en el Ártico y su influencia en la extensión del hielo marino.

M. VÁZQUEZ, R. NIETO, A. DRUMOND

martavazquez@uvigo.es

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,
Universidade de Vigo,
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

RESUMEN

La extensión del hielo ártico ha sufrido una disminución considerable en los últimos años, registrándose dos mínimos en los años 2007 y 2012. El aumento en los aportes de humedad en esta región es uno de los motivos de este debilitamiento y disminución en la superficie de hielo. En este trabajo analizamos, mediante la herramienta de diagnóstico lagrangina FLEXPART, como han podido afectar las modificaciones en los aportes de humedad a los dos mínimos registrados en la extensión de hielo. Así, las modificaciones se traducen de manera distinta en cada año; mientras para el año 2007 parece ser un aumento en la descarga de los ríos de Eurasia, en el año 2012 el hecho fundamental que parece afectar la cubierta de hielo es el paso de un importante ciclón durante el mes de agosto.

Palabras Clave: Sistema Ártico; mínimo de extensión de hielo; transportes de humedad

1. Introducción

En los últimos años la extensión y espesor del hielo Ártico ha sufrido una reducción dramática. Los registros muestran una disminución de la extensión del hielo en esta zona desde 1979 hasta el presente (Kapsch *et al.*, 2013). Este hecho presenta una gran importancia en las discusiones sobre el cambio climático, ya que además de ser un indicador de éste, los cambios en la cubierta de hielo pueden producir impactos importantes en otros componentes del sistema climático (Parkinson and Comiso, 2013). El mayor decrecimiento en la extensión de hielo se ha observado para los meses de septiembre. Este decrecimiento se ha asociado a diferentes factores como pueden ser cambios en la temperatura del aire en superficie, desplazamiento del hielo debido a la acción del viento,

cambios en las características de los ciclones que atraviesan esa área, o incluso variaciones en la precipitación (Simmond and Keay, 2009; Parkinson and Comiso, 2013).

Dentro de estos últimos años, dos destacan por presentar una extensión especialmente reducida en el hielo marino, el año 2007 y el 2012. En la Figura 1 se muestra esta extensión comparada con la extensión promedio desde 1979 hasta el 2000. A pesar de que los motivos de este descenso en el hielo no estén del todo claros, numerosos estudios como los realizados por Parkinson y Comiso (2013) o por Zhang *et al.* (2012) han tratado de abordar este tema en detalle.

En el caso de lo ocurrido en el año 2012, todo parece indicar que existe una importante relación entre el mínimo en la extensión de hielo y un ciclón de gran

intensidad que atravesó el Ártico en agosto de ese mismo año. Esta tormenta tuvo su origen en Siberia, moviéndose posteriormente hacia el Ártico (Simmond and Rudeva, 2012). Se considera a esta tormenta como la responsable del desprendimiento de una masa de $0.4 \times 10^6 \text{ km}^2$ lo cual resulta de gran interés si consideramos que la diferencia en el área de hielo entre 2007 y 2012 es de $0.7 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Parkinson and Comiso, 2013).

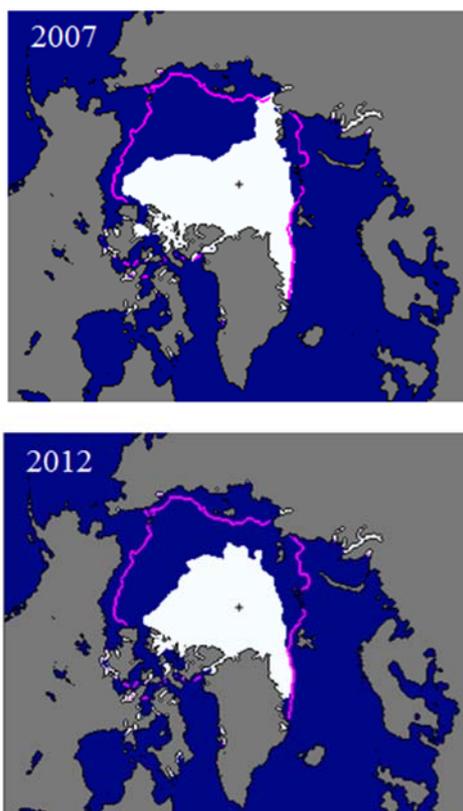


Fig. 1. Extensión de hielo marino para el mes de septiembre en los años 2007 y 2012. La línea rosa representa el promedio para el periodo 1979-2000.

En el caso del 2007, algunos autores relacionan este descenso con un mayor transporte de humedad hacia el norte de Eurasia y el consiguiente aumento del caudal de los ríos de esta zona que desembocan en el océano Ártico (Zhang et al., 2012).

La importancia de los aportes de humedad en la extensión del hielo marino es evidente. La precipitación

afectará directamente debilitando el hielo pero además las nubes y la humedad atrapan la radiación de onda larga, provocando un aumento del efecto invernadero a nivel local, Kapsch et al. (2013) han observado un transporte de humedad aumentado durante la primavera hacia las regiones donde se observa la retirada de hielo.

En este trabajo trataremos de analizar la humedad que llega al Ártico e interpretar como variaciones en ese aporte pueden afectar a la extensión del hielo marino. Centraremos el estudio en los años 2007 y 2012 en concreto, ya que resultan de especial interés al registrar sendos mínimos.

2. Datos y procedimiento

En este trabajo se ha empleado el modelo Lagrangiano de dispersión de partículas FLEXPART para localizar las fuentes y sumideros de humedad de la región del Ártico. Este modelo, desarrollado por Stohl et al. (1998) y adaptado para diagnosticar el flujo de agua dulce en superficie (Stohl and James, 2004, 2005), utiliza datos con resolución de $1^\circ \times 1^\circ$ del European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) para seguir la humedad atmosférica a lo largo de sus trayectorias.

La atmósfera se divide en un gran número de partículas (no necesariamente representadas por partículas reales sino por parcelas de aire infinitesimalmente pequeñas) que se distribuyen homogéneamente en la atmósfera. Estas partículas son advectadas por el modelo utilizando los datos de viento del ECMWF, manteniéndose su masa constante. A partir de los datos del ECMWF se sigue la posición y humedad específica q de cada partícula. Estos valores se registran cada 6 horas.

A través de los cambios de q con el tiempo se pueden registrar aumentos y disminuciones de la humedad en la

partícula a lo largo de su trayectoria a través de la ecuación

$$e - p = m \frac{dq}{dt}$$

donde m es la masa de la partícula, y e y p representan el aumento y disminución de humedad en la partícula respectivamente. Para diagnosticar el flujo de agua dulce en superficie para un área determinada A se suman $e - p$ para todas las partículas en la columna atmosférica sobre dicha área. Así, obtenemos $E - P$, donde E representa la evaporación y P la precipitación.

A partir de este método se calcula $E - P$, no E o P individualmente. Sin embargo, asumiendo que E y P no pueden coexistir en la misma localización al mismo tiempo, se pueden diagnosticar la tasa instantánea de evaporación $E_i = E - P$ cuando $E - P > 0$ y la tasa instantánea de precipitación $P_i = P - E$ cuando $E - P < 0$. Sumando E_i y P_i sobre un periodo de tiempo largo podemos estimar \bar{E} y \bar{P} donde la barra indica promedio temporal (Stohl and James, 2004).

Este método también se puede desarrollar hacia atrás en el tiempo, que será lo que se empleará en este trabajo. Lo que se hace es escoger aquellas partículas que llegan a la zona objetivo en el instante de tiempo determinado para ver donde han ganado o perdido humedad. Los valores de $E - P$ pueden calcularse para un momento concreto hacia atrás en el tiempo o pueden integrarse sobre un cierto periodo hacia atrás.

2.1. Región ártica

La región objeto de estudio en este trabajo será el sistema Ártico. Éste ha sido definido por Robert *et al.* (2010) como la geosfera y la biosfera situada al norte de la media decadal de la isoterma de la superficie del mar de 10°C, el

contorno del aire superficial a 0°C que rodea el Polo Norte, y el límite sur de los terrenos que desaguan en el Alto Ártico. Aparece representado en la Figura 2.

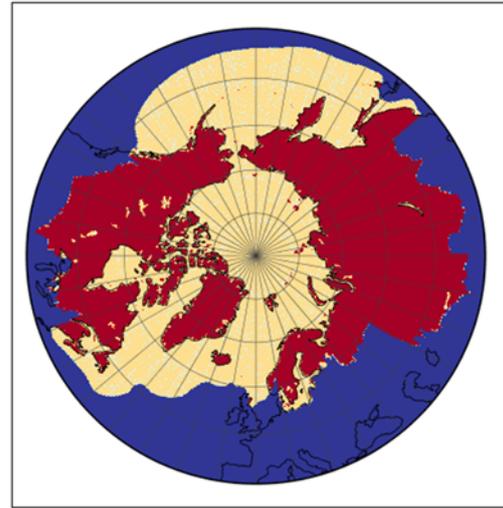


Fig. 2. El sistema Ártico. Superficie continental (rojo) y oceánica (amarillo) pertenecientes al sistema Ártico definido por Robert *et al.* (2010)

Sobre esta región se consideran las partículas que llegan en un mes en concreto y se sigue su trayectoria hacia atrás en el tiempo. En total se han considerado 1.997.651 partículas y seguido su trayectoria con un tiempo de transporte limitado a 10 días, ya que éste es el tiempo promedio que el vapor de agua reside en la atmósfera (Numaguti, 1999). Los mapas que se presentan corresponderán al valor de $E - P$ promediado mensual, anual o estacionalmente.

Para realizar la climatología de las fuentes y sumideros de humedad del Ártico se ha tomado un periodo de 10 años desde 1997 a 2006, en el cual no se incluye ningún extremo de deshielo. Además se han analizado los años 2007 y 2012 de modo individualizado al resultar de interés debido a que en estos dos años se registra la extensión de hielo mínima desde 1979.

3. Resultados

3.1. Climatología

En la Figura 3a se muestra los valores de $E - P$ correspondientes al sistema Ártico promediado anualmente para el periodo de 10 años comprendidos entre 1997 y 2006. El análisis de E-P en esta figura permite analizar las fuentes y sumideros de humedad para este sistema. En aquellas zonas dónde se presentan valores $E - P > 0$ (tonos rojizos) la evaporación domina a la precipitación, por lo tanto, representará aquellos lugares donde las partículas que llegan al sistema ártico han ganado humedad. Se trata, por lo tanto, de las fuentes de humedad. Por el contrario los sumideros estarán representados por aquellas zonas con valores de $E - P < 0$ (tonos azules). Aquí la precipitación domina sobre la evaporación y serán zonas donde las partículas que llegan al sistema pierden humedad.

Teniendo esto en cuenta y analizando la Figura 3a, el océano Ártico se presenta como un claro sumidero de humedad. Esta humedad que precipita sobre el océano proviene principalmente de los océanos Pacífico y Atlántico, en concreto de las fronteras oeste, del mar mediterráneo, y existiendo también aportes continentales de humedad menos importantes procedentes de Norteamérica y de Asia.

El hecho de que el océano Ártico sea un sumidero de precipitación hace que este sistema sea susceptible a posibles cambios en los aportes de humedad. Nos interesa analizar cómo la variación en el aporte de humedad al sistema Ártico afecta a la extensión y volumen de hielo.

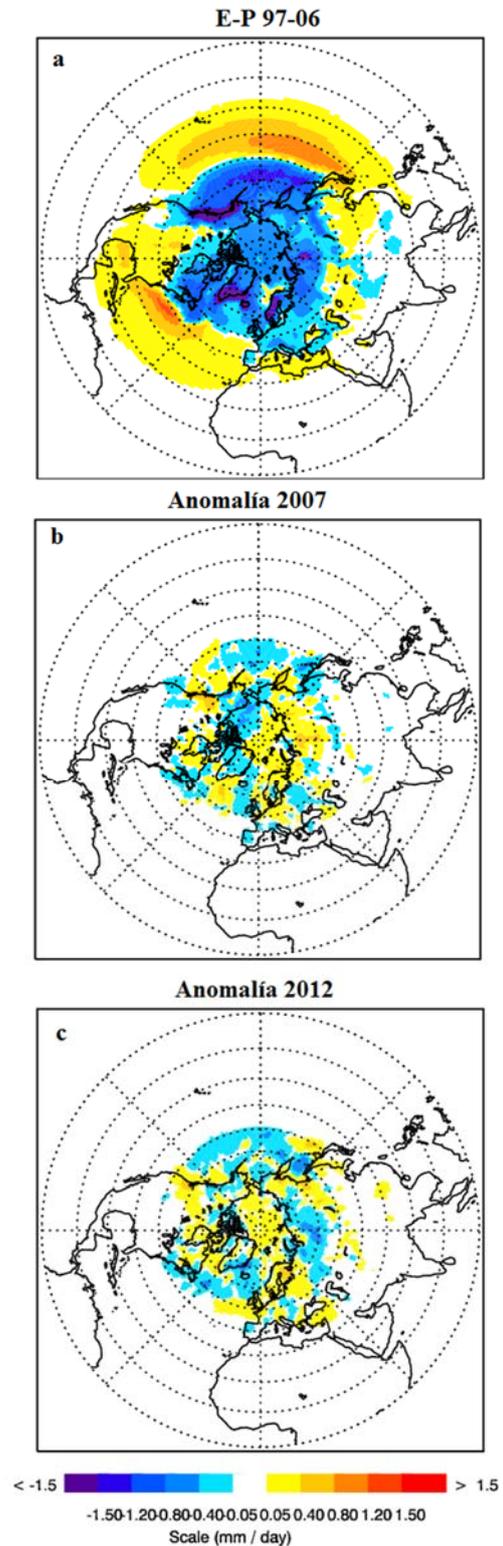


Fig. 3. Aportes de humedad en el sistema Ártico: a) Fuentes (rojo) y sumideros (azul) de humedad para el periodo 1997-2006. b) y c) Anomalia para los sumideros de humedad en el 2007 y 2012 calculada con respecto al periodo anterior.

Para ello se analizan los valores de la anomalía de $E - P$ para aquellos años en los que la extensión de hielo ha sido mínima. La anomalía está calculada con respecto al periodo de referencia 1997-2006.

Ya que lo que interesa es lo que respecta al aporte de humedad, se calcula estas anomalías solo para aquellas zonas que hayan registrados valores de $E - P$ negativos, es decir, sumideros de humedad. Ya que en estos casos la precipitación media viene representada por $\bar{P} = P - E$ y la anomalía está calculada para los valores $E - P$, se ha invertido el signo en los valores con el fin de que las anomalías positivas representen aumentos en la precipitación y las anomalías negativas descensos.

En la Figura 3b y 3c se muestran estas anomalías para el año 2007 y 2012 respectivamente. En el caso del año 2007 se puede observar como la precipitación ha sido mayor que en el periodo de referencia, sobre todo en la parte este del océano y sobre la zona de Eurasia. Analizando la gráfica correspondiente al año 2012, las anomalías positivas se centran sobre el océano y cubren la mayor parte de él.

Estos cambios en la precipitación para estos dos años han podido afectar en mayor o menor medida la disminución de la extensión de hielo. A continuación se analizará cada año en más detalle para comprobar cómo es esta influencia.

3.2. Mínimo 2007

En septiembre del año 2007 se produjo el primer mínimo en la extensión de hielo Ártico desde 1979.

Para analizar la situación con respecto a los aportes de humedad de este año concreto se consideran los mapas correspondientes a las anomalías mensuales o estacionales de precipitación.

Se analizan las variaciones en los aportes de humedad con respecto al periodo de referencia para los meses anteriores a septiembre. Como podemos comprobar en la Figura 4a, en los meses de primavera, principalmente marzo y abril, la anomalía en la precipitación es positiva sobre el océano. Además se puede observar una anomalía importante sobre el mar de Okhotsk, zona que todavía presencia cubierta de hielo en esta estación.

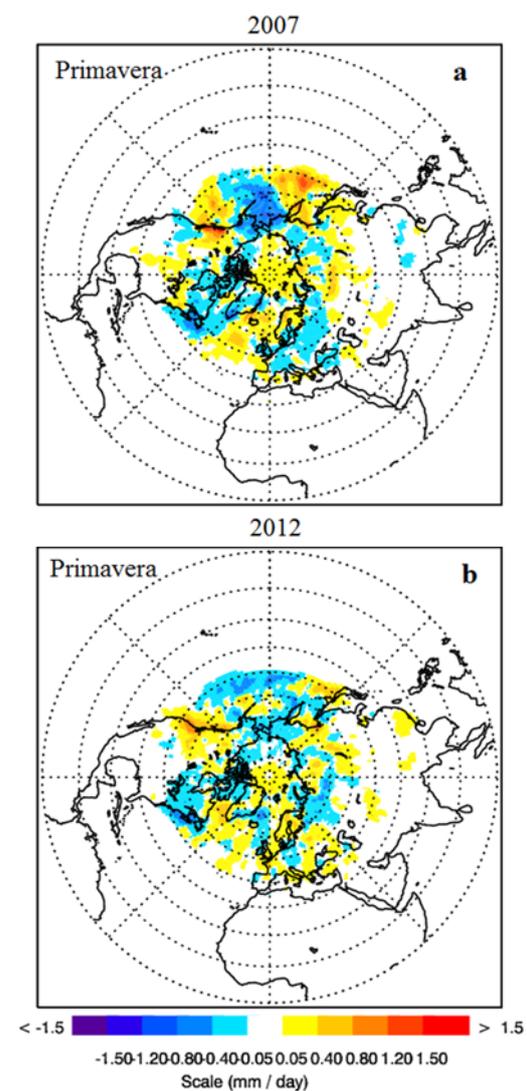


Fig. 4. Anomalía en los aportes de humedad para los meses de primavera en los años 2007(a) y 2012 (b) calculada con respecto al periodo de referencia 1997-2006.

En los meses de verano se observa que las anomalías se vuelven mucho más importantes, sin embargo, se puede ver en la Figura 5a cómo sobre el océano se

dan principalmente anomalías negativas, localizándose las positivas sobre Eurasia e introduciéndose un poco en el océano al norte de Siberia. Cabe destacar la situación observada durante el mes de agosto, dónde se puede observar un importante aumento de las precipitaciones sobre el mar de Laptev y un aumento en general sobre el océano con respecto a lo que había ocurrido en los dos meses anteriores. Este hecho es importante, ya que podría asociarse con el fuerte retroceso sufrido en esa zona entre julio y agosto, véase la Figura 6a y 6c.

Por último, la mayor parte de los meses de este año, aunque no se muestran todos en este trabajo, presentan anomalías positivas importantes sobre la región de Eurasia. Esta mayor precipitación se manifiesta sobre todo entre mayo y agosto (Figuras 4a y 5a). Esto indica que las partículas que llegan al Ártico han perdido humedad en esa zona. Este

aporte de humedad puede haberse visto transformado en una mayor descarga de los ríos de la zona, pudiendo afectar al hielo Ártico.

3.2. Mínimo 2012

En este año el registro de la extensión de hielo en septiembre es aún menor que en el 2007. El tratamiento a realizar en este caso será análogo al realizado para el otro año, analizando los mapas de anomalías mensuales y estacionales para la precipitación.

Al analizar los meses de primavera (Figura 4b) se puede observar como en este caso también se producen anomalías positivas en la mayor parte del océano Ártico. Sin embargo, en este caso son mucho más reducidas tanto en intensidad como en extensión. Además, se observa cómo sobre el mar de Bering la anomalía en la precipitación es negativa.

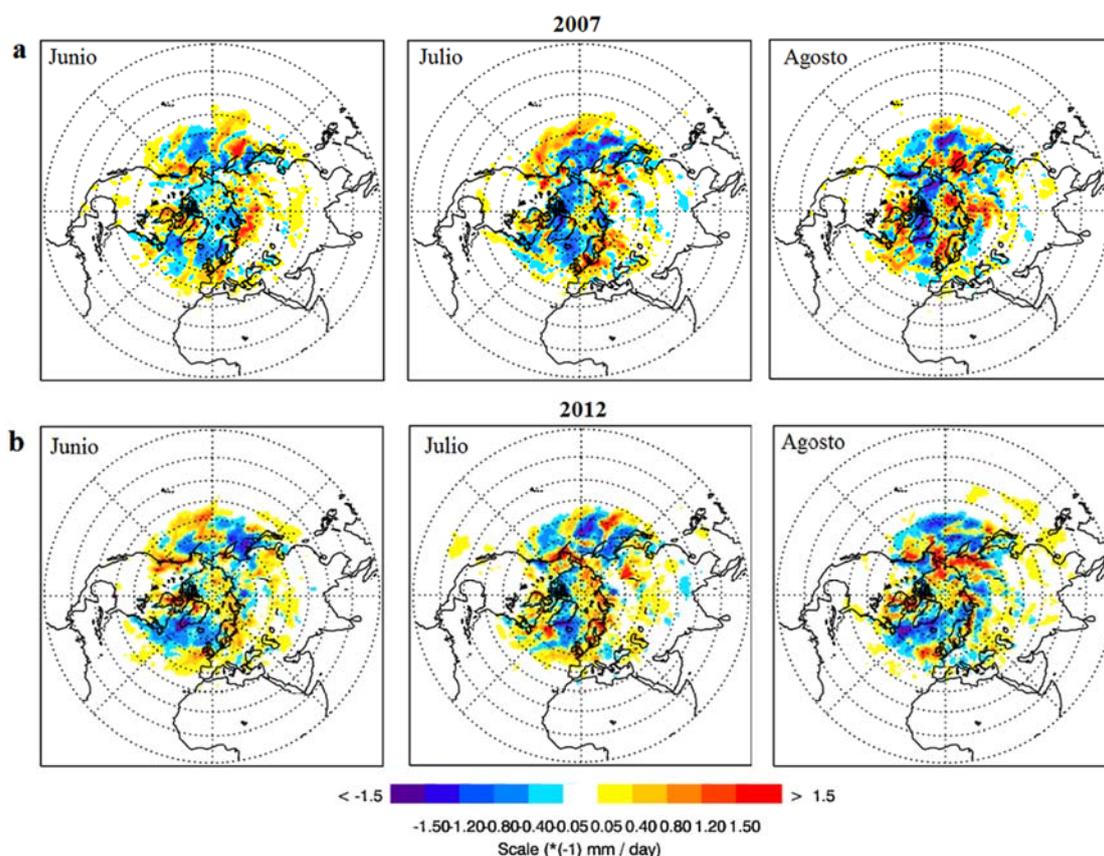


Fig. 5. Anomalía en los sumideros de humedad del sistema Ártico para cada uno de los meses de verano en los años 2007 (a) y 2012 (b), calculado con respecto al periodo de referencia 1997-2006.

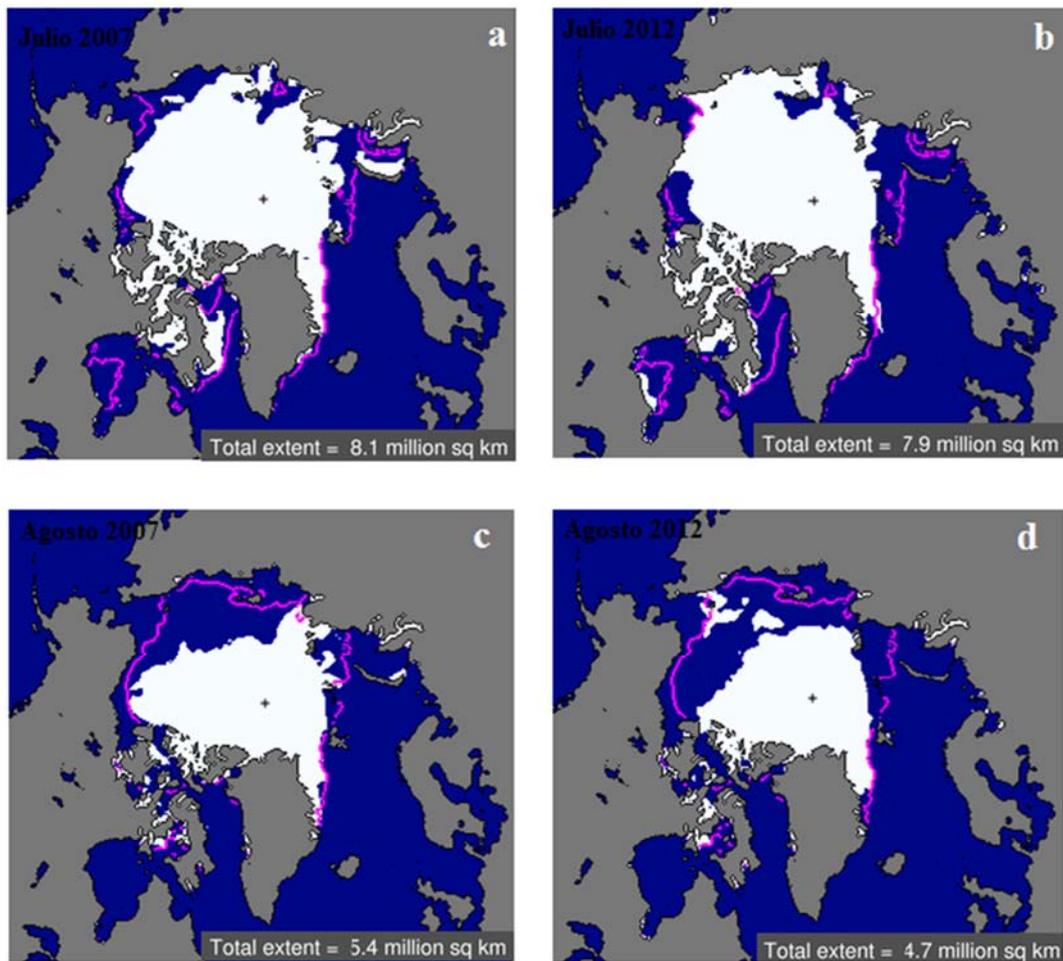


Fig. 6. Extensión de hielo durante los meses de Julio y Agosto en los años 2007 (a y c) y 2012 (b y d). La línea sólida representa la extensión de hielo promedio para cada mes para el periodo 1979-2000. Imágenes cortesía del National Snow and Ice Data Center (NSIDC), University of Colorado, Boulder.

En el caso de los meses de verano, se puede observar en la Figura 5b que se dan anomalías positivas durante los tres meses sobre el océano Ártico.

Se tiene constancia de que este año el sistema Ártico sufrió el paso de un ciclón de gran intensidad. El paso de este ciclón pudo afectar seriamente la extensión de hielo marino. Por lo tanto, en este año resulta especialmente interesante observar lo ocurrido en el mes de agosto. Así, en la Figura 5b se puede ver como las anomalías son especialmente importantes para este mes. Estas fuertes anomalías positivas se observan principalmente en la zona este de Siberia, extendiéndose hacia el estrecho de Bering y adentrándose ya en un grado

menor hacia el océano Ártico. Esta región coincide a grandes rasgos con la trayectoria de paso de dicho ciclón. Así, a pesar de estar promediado mensualmente se puede concluir que el paso de este ciclón tiene un peso importante en los aportes de humedad de este mes y, por lo tanto, una posible influencia en la disminución drástica de la extensión de hielo). Si se analiza además la variación en la extensión de hielo entre julio y agosto para este año (Figura 6) se observa que se produce una fuerte disminución en la extensión de hielo en esa zona y que además esta disminución es mucho más marcada en la zona siberiana que en el caso del mínimo anterior.

4. Conclusiones

Se ha comprobado que, en general, durante los años en que la extensión de hielo presenta un mínimo las anomalías en la precipitación sobre el océano Ártico son positivas.

Los mínimos tienen lugar en los meses de septiembre, pero es la precipitación en los meses anteriores lo que afecta a la extensión. Algunos estudios han mostrado como el aporte de humedad durante los meses de primavera, sobre todo abril-mayo, se incrementa para los años en los que la extensión de hielo se ve más reducida en aquellas zonas donde se observa la retirada del hielo. En nuestro estudio se puede observar cómo se producen anomalías positivas en los aportes de humedad sobre el océano para ambos años. Sin embargo, la anomalía al norte del estrecho de Bering es negativa en el año 2012. El hecho de que sea en esta zona donde se produce la máxima reducción de hielo para este año con respecto al periodo de referencia sugiere la importancia que ha podido tener la precipitación durante estos meses, al menos en el caso del 2012.

En el estudio de los aportes de humedad para estos dos años se han encontrado resultados que difieren en algunos aspectos.

En el caso del año 2007 se observa como la precipitación en los meses de primavera es mayor con respecto al otro año en estudio. Además la anomalía positiva se distribuye por todo el Ártico en este caso. Este hecho, a pesar de que no parece producir una gran reducción de hielo en los meses siguientes, puede afectar al posterior decrecimiento provocando un adelgazamiento de la capa de hielo y haciéndola más susceptible al derretimiento en los meses de verano. En los meses de verano las anomalías sobre el océano se vuelven negativas y no es hasta agosto cuando

cobran importancia. agosto parece ser un mes clave con respecto a la extensión de hielo y los fuertes aumentos en la precipitación al norte de Siberia parecen estar relacionados con la reducción tan brusca del hielo en esta zona para dicho mes. Sin embargo, lo que más llama la atención al analizar los aportes de humedad en este año es la pérdida de humedad que sufren en general las partículas sobre la zona de Eurasia. Este hecho supone sin duda un aporte de humedad para esa zona, el cual puede haber afectado al caudal de los ríos en general, y en particular a los ríos Obi, Yenisei y Lena que desembocan en el océano Ártico. Pudiendo esto afectar también a la reducción del hielo. Sin embargo, para poder afirmar algo a este respecto sería necesario un análisis más detallado de los aportes de humedad para dichos ríos en este año, estudio que en el presente trabajo no se ha abordado.

Con respecto al año 2012 podemos observar que las anomalías positivas son muy importantes durante los meses de verano. En junio y julio las anomalías son bastante fuertes en la mayor parte del océano, contribuyendo esto a un estrechamiento y debilitamiento del hielo durante estos meses. Sin embargo, un factor clave en este mínimo en la extensión parece ser el ciclón que tuvo lugar a principios de agosto. Uno de los motivos de su importancia es el hecho de que es responsable de la separación de una masa de hielo de 0.4×10^6 km². Además hemos observado como en el mes de ocurrencia del ciclón se produce una anomalía positiva de gran importancia que coincide a grandes rasgos con la zona de paso del ciclón. Y es precisamente en esta zona donde se produce el retroceso más importante del hielo marino. Por lo tanto, se hace evidente la importancia de este evento en la situación del hielo.

Agradecimientos

Mostramos nuestro agradecimiento al NSIDC por facilitar sus datos e imágenes al dominio público.

Referencias

- Kapsch, M.L., R.G. Graverseny M. Tjernström, 2013. Springtime atmospheric energy transport and the control of Arctic summer sea-ice extent. *Nature Climate Change*.
- Numaguti, A., 1999. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: experiments using an atmospheric general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 104, 1957-1972.
- Parkinson, C.L. y J.C. Comiso, 2013. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm. *Geoph. Res. Lett.*, 40, 1356-1361.
- Roberts, A. et al., 2010. A science plan for regional Arctic System modeling, a report to the National Science Foundation from the International Arctic Science Community. International Arctic Research Center Technical Papers, 10-0001. International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks.
- Simmond, I. y K. Keay, 2009. Extraordinary September Arctic sea ice reductions and their relationship with storm behavior over 1979-2008. *Geoph. Res. Lett.*, 36, L19715
- Simmond, I. y I. Rudeva, 2012. The great Arctic cyclone of August 2012. *Geoph. Res. Lett.*, 39, L23709.
- Stohl, A., M. Hittenberg y G. Wotawa, 1998. Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiment data. *Atmos. Environ.*, 32, 4245-4264.
- Stohl, A. y P. James, 2004. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global cycle. Part I: Method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in Central Europe. *J. Hydromet.*, 5, 656-678.
- Stohl, A. y P. James, 2005. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global cycle. Part II: Moisture transport between Earth's ocean basins and river catchments. *J. Hydromet.*, 6, 961-984.
- Zhang, X., J. He, J. Zhang, I. Polyakov, R. Gerdes, J. Inoue y P. Wu, 2012. Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend. *Nature climate change*.