

Procedencia de la humedad para los testigos de hielo identificada a partir de una aproximación Lagrangiana

E. TABOADA, R. NIETO*, A. DRUMOND

**rnieto@uvigo.es*

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

RESUMEN

En este trabajo se han analizado las principales fuentes de humedad en catorce testigos de hielo situados en diferentes puntos del planeta a escala anual y para la estación cálida y fría para el periodo de Enero 1980 a Diciembre 2012. Para el cálculo se ha utilizado el modelo lagrangiano FLEXPART desarrollado por Stohl y James (2004) con datos de reanálisis del ECMWF ERA-Interim cada seis horas. Los resultados sugieren que las principales fuentes de humedad coinciden con las regiones de las altas presiones subtropicales. Cuando se observa el comportamiento estacional se nota que las altas subtropicales se intensifican o se debilitan según la estación del año en que se encuentren y por lo tanto, las fuentes de humedad son más o menos intensas, respectivamente.

Palabras Clave: Testigos de hielo, fuentes de humedad, FLEXPART, aproximación Lagrangiana.

1. Introducción

De toda el agua que existe en la Tierra, los océanos y los mares contienen aproximadamente el 97% de la misma sobre la hidrosfera, por lo que la mayor parte del agua evaporada procede de la superficie oceánica. El vapor de agua se caracteriza por ser un gas capaz de sufrir cambios de estado en la atmósfera y por tener una alta capacidad calorífica lo que le convierte en un gran reservorio de calor y conductor de la circulación atmosférica (Gettelman *et al.*, 2000). El transporte de humedad influye en gran medida en el balance de calor de la superficie así como en las precipitaciones que se producen en una determinada región. El transporte de humedad es un elemento clave en el

sistema climático por lo que su estudio es vital para poder determinar el origen y destino de las masas de aire húmedo y de esta forma caracterizar las fuentes y sumideros de humedad. Para poder cuantificar el transporte del agua atmosférico primero hay que conocer dónde se evapora, pero prácticamente no existen medidas directas, por lo que se deben recudir a medidas indirectas. Entre ellas se ha venido usando la medida euleriana del flujo de humedad integrado en la vertical, que se define como:

$$\frac{1}{g} \int_0^{P_s} q \vec{v} dp \quad (1)$$

donde g es la aceleración debido a la gravedad, P_s es la presión en la

superficie, q es la humedad específica y \vec{v} es el viento. La Figura 1 muestra el

flujo de humedad integrado en la vertical y su divergencia en base anual y

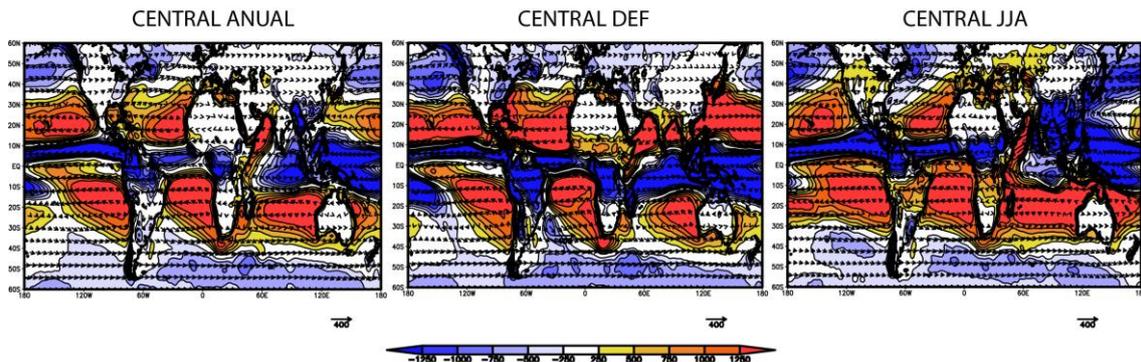


Fig.1. Flujo de humedad integrado en la vertical (vector; kg/m/s) y su divergencia (colores; mm/año). (Datos de Era-Interim)

para los meses de diciembre a febrero (DEF) y de julio a agosto (JJA) para la zona que llamaremos Central en este estudio limitada entre 60°N y 60°S. Los colores cálidos son máximos de divergencia del flujo de humedad, es decir, son regiones evaporativas, mientras que los colores fríos corresponden a máximos de convergencia, representando regiones precipitantes. Las principales fuentes de humedad coinciden con el cinturón de las altas subtropicales y en las regiones con un patrón monzónico se observan variaciones estacionales bien marcadas, pasando de una región evaporativa en invierno a una región precipitante en verano.

Los testigos de hielo (o *ice-cores*, en inglés), cilindros de hielo que se extraen por perforación de capas profundas de hielo, permiten hacer reconstrucciones climáticas de, entre otras variables, la temperatura, precipitación, erupciones volcánicas..., a partir de las burbujas de aire que están contenidas en ellos (Bradley, 2014). Los testigos de hielo permiten estudiar el clima de la región de donde se han extraído en escalas de tiempo que pueden ir de décadas a cientos de miles de años (Brook, 2006). El objetivo principal de este estudio es aplicar una metodología lagrangiana de retro trayectorias de masas de aire para

identificar las principales fuentes de humedad en el periodo 1980-2012 para catorce de las principales zonas de extracción de testigos de hielo en el planeta. Se analizarán los resultados tanto en base anual como estacional y se compararán con la información que nos brindan los valores del transporte de humedad integrado en la vertical (enfoque euleriano).

Las catorce zonas de extracción de testigos de hielo se han dividido en tres dominios regionales: zona Ártica entre 90°N y 60°N, Central entre 60°N y 60°S, y Antártica de 60°S a 90°S. En la Tabla 1 se muestran para cada testigo de hielo analizado su localización (longitud, latitud y altitud), la profundidad máxima a la que se llegó en la medida, el periodo climático que se puede estudiar, y la duración de los proyectos científicos realizados en cada zona. En la Figura 2 se indican en un mapa la posición geográfica de cada uno de estos.

Existen trabajos previos que utilizaron testigos de hielo para identificar las fuentes de humedad que llega a esas zonas como es el trabajo de Sodemann *et al.* (2008) en el que analizaron las fuentes de humedad para Groenlandia, o Sodemann y Zubler (2009) para los Alpes.

Dominio	Nº	Nombre	Lat.	Long.	Altitud (m)	Prof. Máx. (m)	Período de tiempo (años)	Duración de los proyectos
Ártico (90°N–60°N)	1	GISP2	72,60°N	38,50°W	3200	~2790	~110000	1988-1993
	2	NEEM	77,45°N	51,07°W	2479	~2540	~108000	2007-2010
	3	NGRIP	75,10°N	42,30°W	2917	~3084	~123000	1999-2003
	4	Logan	60,58°N	140,58°W	5340	~186	~8000	1980-2000
	5	Bona-Churchill	61,40°N	141,70°W	4420	~460	~2500	2002-
	6	Windy Dome	80,78°N	63,53°E	580	~315	~10000	1997-
Central (60°N–60°S)	7	Huascarán	9,18°S	78,02°W	6048	~166	~20000	1983-
	8	Sajama	18,10°S	68,97°W	6542	~133	~20000	1983-
	9	Grenzgletscher	45,92°N	7,87°E	4200	~125	~77-20	
	10	Everest	28,02°N	86,97°E	6518	~117	~4000	2002-
	11	Kilimanjaro	3,13°S	37,58°E	5893	~51*	~11700	2002
Antártico (60°S–90°S)	12	Byrd	80°S	119°W	1530	~2164	~100000	1957-
	13	EPICA DML	75°S	0°E	2892	~2774	~150000	1996-2006
	14	Vostok	78°S	106°E	3488	~3623	~440000	1998-

TABLA 1. Información de las zonas de estudio divididas en los dominios.

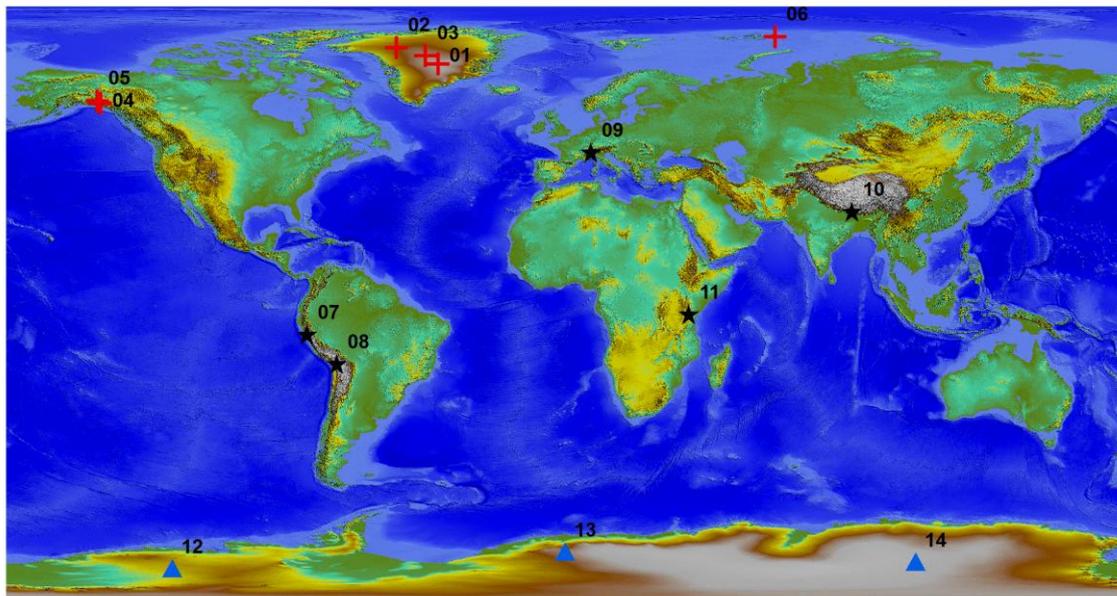


Fig. 2. Localización de los testigos de hielo usados en este estudio. Las cruces rojas pertenecen al dominio Ártico, los asteriscos negros pertenecen al dominio Central y por último las estrellas azules pertenecen al dominio Antártico. Los números corresponden con los indicados en la Tabla 1.

2. Datos y procedimiento

El modelo FLEXPART (Stohl *et al.*, 2004; 2005) es un modelo de dispersión lagrangiano que en un principio se utilizó para simular la dispersión de sustancias peligrosas desde diferentes fuentes puntuales. En los últimos años se ha venido utilizando para analizar la rama atmosférica del ciclo global del

agua a través del transporte de humedad.

El modelo FLEXPART da como salida las trayectorias de un número a elegir de partículas de aire, por lo que en esencia nos describe el movimiento de cada partícula desde su inicio hasta el final de su trayectoria, pudiendo seguir estas trayectorias hacia adelante en el tiempo para investigar la dispersión de los trazadores desde sus fuentes o hacia atrás para determinar las contribuciones

de fuentes potenciales para los receptores indicados.

Las variables más importantes para el cálculo de las fuentes de humedad son la humedad específica y la localización exacta de las partículas (latitud, longitud y altitud).

En este trabajo se ha utilizado la versión FLEXPART 9.0 que permite hacer el seguimiento de hasta dos millones de partículas en la atmósfera. Aunque son dos millones de partículas las distribuidas por el globo, una vez que se selecciona el área de estudio sobre cada testigo de hielo el número de las mismas varía., ya que su distribución no es homogénea espacialmente debido al transporte por el viento. El área entorno a cada testigo de hielo para el que se analizan las fuentes de humedad es de un círculo de 100km de radio. En la Tabla 2 se muestra el número medio de partículas identificadas sobre las zonas de estudio para cada día y cada testigo de hielo.

Se han utilizado en este trabajo las salidas de una simulación global de FLEXPART realizada por el grupo de investigación EphysLab de la Uvigo para el período de 1980-2012 usando datos del reanálisis ERA-Interim del ECWMF (Dee et al., 2011). La resolución de los datos de entrada son de 1° en la horizontal y 60 niveles en la

Dom	Nombre	Núm. partículas por día
Ártico	GISP2	219
	NEEM	185
	NGRIP	184
	Logan	230
	Bona-Churchill	217
	Windy Dome	789
Central	Huascarán	73
	Sajama	66
	Grenzgletscher	148
	Everest	72
	Kilimanjaro	78
Antártico	Byrd	449
	EPICA DML	1214
	Vostok	790

TABLA 2. Número de partículas por día en cada zona de estudio.

vertical cada 6h (00, 06, 12, 18 UTC).

Las salidas del modelo FLEXPART guardan para cada partícula las variables de longitud, latitud, altura, altura topográfica, vorticidad potencial, humedad específica, densidad del aire, altura de la capa límite y temperatura, entre otras.

Para la determinación de las fuentes de humedad se computa el incremento (e) y el decrecimiento (p) en la humedad analizando los cambios en la humedad específica (q) a lo largo de la trayectoria durante 10 días, tiempo medio de residencia del vapor de agua en la atmósfera (Numaguti, 1999), según:

$$e - p = m \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

donde m es la masa de cada partícula. Estos cambios se realizan en todas las partículas seleccionadas previamente y los resultados obtenidos se integran en la columna atmosférica sobre un área dada (A):

$$E - P \approx \frac{\sum_{k=1}^K (e - p)}{A} \quad (3)$$

donde K es el número de partículas que se encuentran sobre A, en este caso 1°x1°. Por lo tanto, una región es considerada fuente de humedad cuando el balance hidrológico atmosférico es favorable a la evaporación de la superficie y sumidero cuando el balance favorece a la precipitación.

Existen trabajos previos que utilizan este método y que corroboran la validez del mismo, como los de Gimeno et al. (2010, 2013) en los que se evaluaron a nivel global la contribución de las principales fuentes oceánicas de humedad a la precipitación continental, o análisis más regionales para la identificación de las fuentes de humedad en la Antártida (Nieto et al.,

2010) o en la cuenca amazónica (Drumond *et al.*, 2014), entre otros.

3. Resultados

En este estudio se analizan las fuentes de humedad para catorce testigos de hielo, agrupados en tres regiones o dominios geográficos, que cubren la mayor parte del planeta y que son representativos de los proyectos científicos más importantes. El estudio se realiza en base anual y estacional.

En las figuras que se muestran a continuación para cada uno de los testigos de hielo se representa solamente aquellas zonas consideradas como fuentes de humedad, es decir, sólo los valores positivos del campo de $(E-P)$ integrados a lo largo de los 10 días de las retrotrayectorias: $(E-P)_{1-10} > 0$.

3.1. Dominio Ártico ($90^{\circ}N-60^{\circ}N$)

Para los testigos de hielo localizados en el dominio Ártico (Figura 3) las fuentes de humedad se encuentran en torno a los $30^{\circ}-50^{\circ}N$. Para los testigos de hielo (TH, a partir de ahora) sobre Groenlandia (TH1, TH2 y TH3 en la Figura 2) la principal fuente de humedad proviene del Atlántico, asociada probablemente con las altas presiones sobre las Azores; para Windy Dome (TH6) proviene del Atlántico, Pacífico y mares Mediterráneo, Caspio y Negro, asociada con el cinturón de las altas subtropicales; y para las estaciones situadas en Alaska y Canadá (TH4 y TH5), las principales fuentes se localizan en el Pacífico norte subtropical, asociadas probablemente con la alta subtropical del Pacífico norte.

Si se compara por estaciones se observa que en los meses DEF para las zonas de extracción situadas en Groenlandia, las fuentes de humedad proceden del Atlántico y Golfo de México debido a la intensificación del alta de las Azores, en

cambio, en los meses de JJA, este sistema se debilita y la fuente de humedad procede de la zona continental de América del norte y en menor medida del Atlántico. Para Windy Dome, en los meses de DEF, las fuentes de humedad proceden del Atlántico y Pacífico norte subtropical y de los mares Mediterráneo, Caspio, Negro, Norte y de Noruega, efecto asociado de nuevo con la intensificación del alta de las Azores, en cambio, en los meses JJA, las fuentes de humedad provienen del norte de Eurasia y Canadá debido a su debilitamiento. Por último, para los TH sobre Alaska y oeste de Canadá, en los meses DEF las fuentes de humedad proceden del Pacífico coincidiendo con la intensificación del alta del Pacífico, en cambio para JJA la contribución del Pacífico se debilita y se desplaza hacia el norte debido probablemente a que el alta del Pacífico se sitúa en latitudes superiores.

3.3. Dominio Central ($60^{\circ}N-60^{\circ}S$)

En la Figura 4 se puede observar de donde procede la humedad para las zonas de los testigos de hielo situadas en este dominio.

Para las zonas de extracción situadas en los Andes (TH7 y TH8) las fuentes de humedad proceden de la costa Pacífica sudamericana y del Atlántico en menor medida. La fuente de humedad junto a la costa es debida probablemente al giro del alta del Pacífico subtropical y la proximidad de la cuenca amazónica, que tiene al Atlántico tropical como principal fuente remota de humedad a través de los Alisios (Drumond *et al.*, 2014), explicando la importancia del Atlántico en esta zona. Para la zona de los Alpes (TH9) la fuente de humedad se sitúa en el Mediterráneo y Atlántico norte subtropical y Golfo de México. Para el Kilimanjaro (TH11) la humedad proviene del Índico sur subtropical y del mar de Arabia, asociada a la evaporación y transporte desde la región

sobre la que se sitúa el alta subtropical del Índico sur y a la circulación asociada al sistema del monzón asiático. Por último, para el Everest (TH10), las mayores contribuciones de humedad provienen del mar de Arabia, del Índico y del sur de Asia coincidiendo con la región del Monzón Asiático.

Al comparar por estaciones se puede observar como para los Andes en los meses DEF, las fuentes de humedad se expanden por toda la costa pacífica sudamericana, mientras que en JJA se debilitan y se desplazan hacia el norte. Tales cambios se pueden explicar a través de la migración estacional del alta del Pacífico y del Atlántico sur subtropical. En el caso de los Alpes, en los meses DEF la humedad proviene del Atlántico norte subtropical y del Mediterráneo, mientras que en JJA procede de Europa continental, ligado a procesos de evaporación local. En el Kilimanjaro, las fuentes de humedad se

localizan durante los meses DEF sobre el mar de Arabia debido al alta asiática. En cambio en los meses JJA, fase activa del monzón y momento en el cual se intensifica el alta del Índico sur, se favorece el transporte de humedad desde el hemisferio sur. Por último, para el Everest en los meses DEF, fase inactiva del monzón, las fuentes de humedad son débiles y locales, en cambio en los meses JJA que coincide con la fase activa del monzón de nuevo, las contribuciones de humedad proceden del Índico, mar de Arabia y zonas continentales del sur de la India.

3.3. Dominio Antártico (60°S-90°S)

Como se puede observar en la Figura 5, las fuentes de humedad para las tres zonas de extracción de testigos de hielo en este dominio se encuentran entre los 30°-50°S coincidiendo con el cinturón de las altas subtropicales.

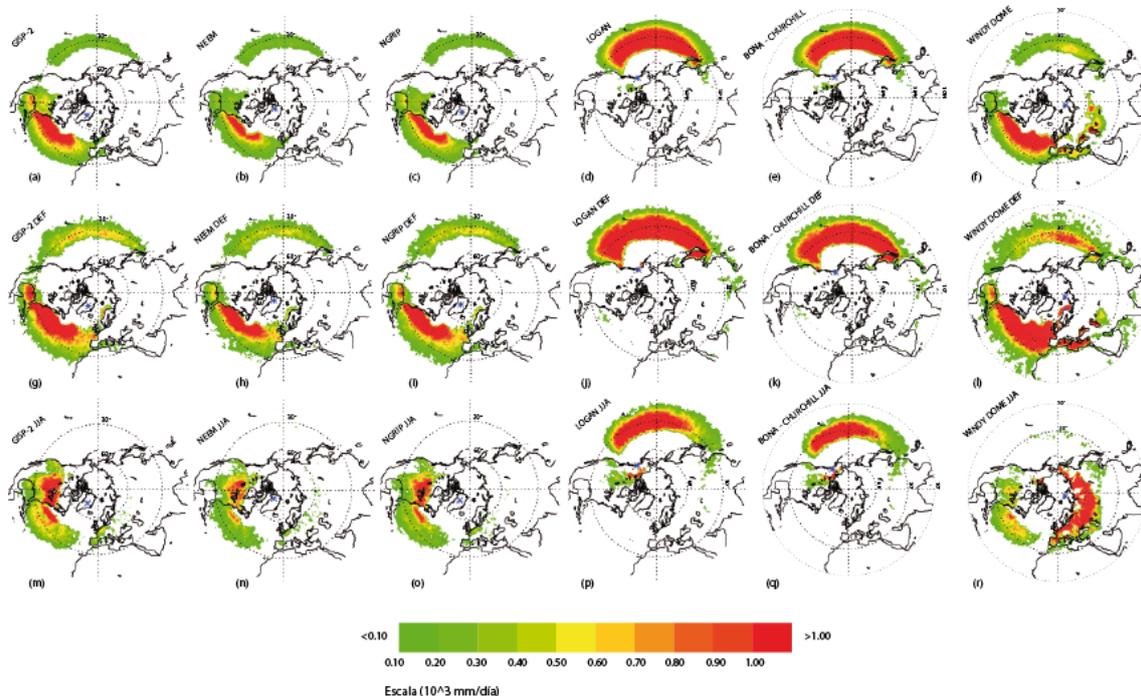


Fig. 3. Mapas anuales y estacionales de las fuentes de humedad (regiones donde $(E-P)_{1-10} > 0$) para el dominio Ártico. Las figuras de la primera fila corresponden a las fuentes de humedad anual para las zonas GISP-2, NEEM, NGRIP, Logan, Bona-Churchill y Windy Dome respectivamente; las figuras de la segunda fila corresponden a las fuentes de humedad estacional para los meses DEF y las figuras de la tercera fila a los meses de JJA.

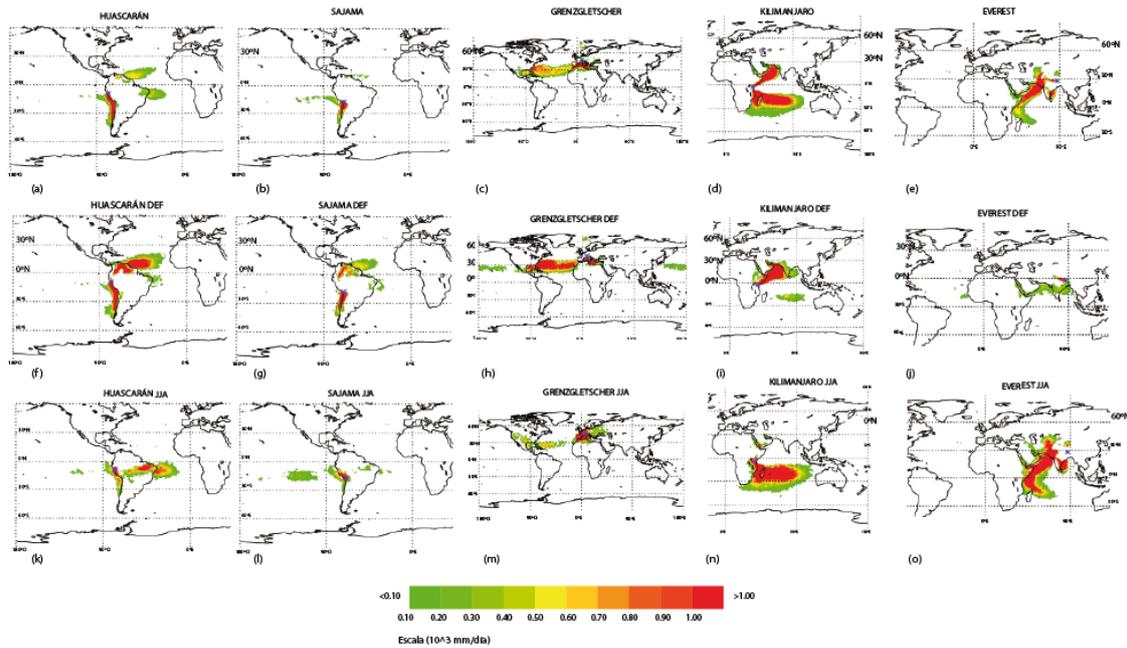


Fig 4. Mapas anuales y estacionales de las fuentes de humedad (regiones donde $(E-P)_{1-10} > 0$) para el dominio Central. Las figuras de la primera fila corresponden a las fuentes de humedad anual para las zonas Huascarán, Sajama, Grenzgletscher, Kilimanjaro y Everest respectivamente; las figuras de la segunda fila corresponden a las fuentes de humedad estacional para los meses DEF y las figuras de la tercera fila a los meses de JJA.

Para el caso del punto de extracción Byrd (TH12), las fuentes de humedad se sitúan sobre el sur de Oceanía y Pacífico sur subtropical, ya que corresponden con regiones evaporativas asociadas al dominio del alta subtropical del Pacífico sur. Para el punto de extracción EPICA DML (TH13), la humedad procede del Atlántico y Pacífico sur. Por último, para el punto de extracción Vostok (TH14), la humedad procede del Índico sur subtropical y sur de África y Australia. El transporte hacia esas zonas se realizaría por medio de los vientos del oeste de las trayectorias de las tormentas.

Cuando se compara por estaciones, se pueden observar grandes diferencias que corresponden con la circulación general atmosférica. Las fuentes de humedad para Byrd en los meses DEF

se localizan sobre el Pacífico sur subtropical y sur de Oceanía, mientras que para los meses JJA, además de las anteriores, también se observa como fuente el océano Atlántico sur. Para EPICA DML, las fuentes de humedad para DEF se encuentran principalmente sobre el Atlántico sur subtropical y en menor medida sobre el Pacífico e Índico sur subtropical, mientras que para JJA se localizan en el Atlántico, Pacífico e Índico sur subtropical y sur de Oceanía. Por último para el testigo de hielo Vostok la humedad proviene del Índico sur subtropical en DEF, mientras que para JJA su fuente se extiende por el Atlántico e Índico sur subtropical. Las diferencias entre el verano e invierno austral podrían explicarse a través de la variabilidad estacional de la circulación atmosférica.

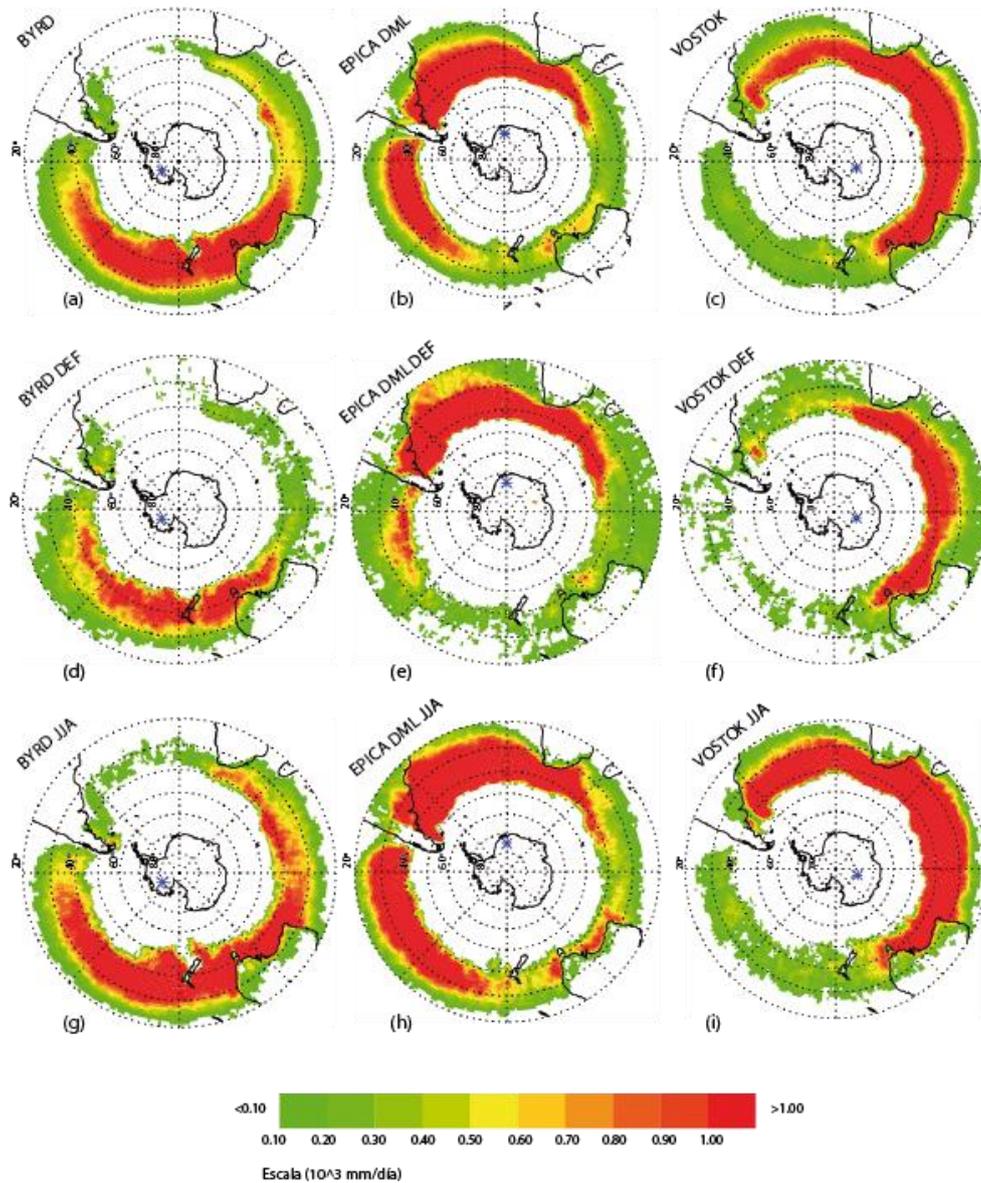


Fig. 5. Mapas anuales y estacionales de las fuentes de humedad (regiones donde $(E-P)_{1-10} > 0$) para el dominio Antártico. Las figuras (a), (b) y (c) corresponden a las fuentes de humedad anual para las zonas Byrd, EPICA DML y Vostok; las figuras (d), (e) y (f) corresponden a las fuentes de humedad estacional para los meses DEF y las figuras (g), (h) e (i) corresponden a las fuentes de humedad estacional para los meses de JJA.

4. Conclusiones

En este estudio se ha utilizado el método desarrollado por Stohl y James (2004) y los datos de ERA-Interim para detectar las principales fuentes de humedad en el clima presente (1980-2012) para catorce de las zonas de extracción de testigos de hielo más investigadas en paleoclimatología. Las zonas se han agrupado en tres dominios

geográficos (Ártico, Central y Antártico) para una mejor interpretación de los resultados. En la Figura 6 se muestra en resumen el campo de $E-P_{1-10} > 0$ para los catorce testigos de hielo representado por la línea de contorno que engloba el valor del percentil 95% para cada una de las áreas analizadas. Los resultados muestran que las principales fuentes de humedad provienen de las zonas de altas presiones situadas en torno a los 30° , tanto en el hemisferio norte como en el

hemisferio sur, y de las regiones afectadas por regímenes monzónicos

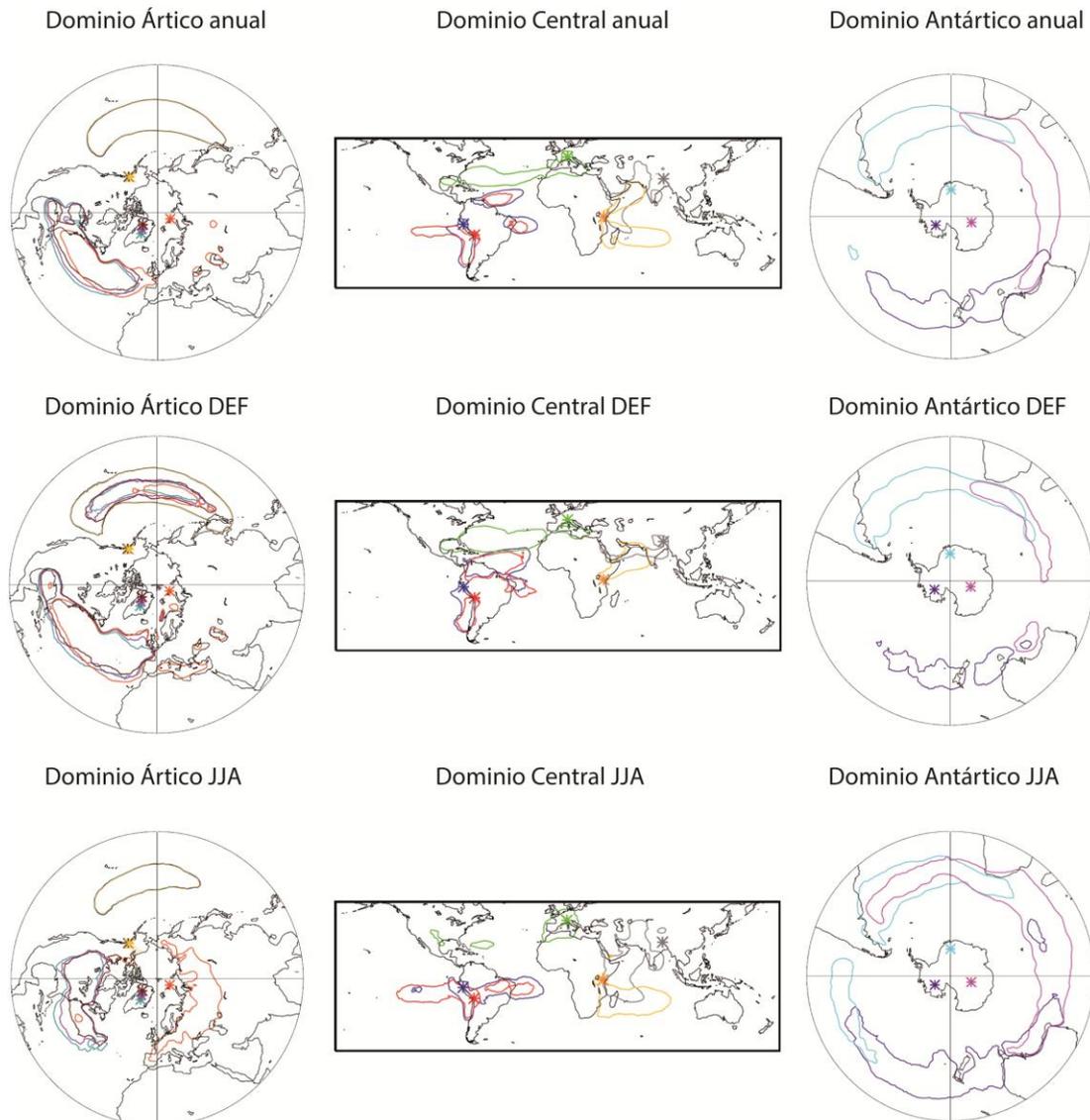


Fig. 6. Fuentes de humedad ($E-P_{1-10} > 0$) para los catorce testigos de hielo analizados agrupados en tres dominios geográficos: Ártico, Central y Antártico. Arriba: resultados anuales, Centro: para DEF. Abajo: para JJA. Las líneas de contorno en colores representan el valor de percentil del 95% del campo para cada testigo de hielo (marcados con un asterisco del mismo color) calculado en base anual.

durante su fase activa, coincidiendo con las regiones evaporativas del flujo de humedad integrado en la vertical. Más en concreto para el dominio Ártico las fuentes provienen entre los 30°-40°N de los océanos Atlántico y Pacífico, coincidiendo con el cinturón de las altas subtropicales. Para el dominio Central: la humedad que llega a América proviene del Atlántico y Pacífico (de ambos hemisferios) debido al cinturón de las altas. Para Europa, proviene del Mediterráneo y del Atlántico. Para

Kilimanjaro y el Everest, las fuentes de humedad provienen del mar de Arabia. Finalmente para el dominio Antártico: las principales fuentes de humedad se sitúan en torno a los 30°-40°S debido al cinturón de las altas subtropicales. Para Byrd la humedad proviene del Atlántico sur subtropical y sur de África, para EPICA DML del Índico, del sur de África y Oceanía y para Vostok proviene del Pacífico sur subtropical y sur de Oceanía.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MINECO a través de proyecto TRAMO (“TRANsport of MOisture”), y cofinanciado por FEDER.

Referencias

- Bradley, R. S. (2014). *Paleoclimatology: Reconstruction Climate of the Quaternary*. Tercera Edición. Ed. Elsevier, ISBN: 978-0-12-386913-5, China.
- Brook, E.J., Wollf, E., Dahl-Jensen, D., Fischer, H., Steig, E.J., on behalf of the IPICS steering committee (2006). The future if ice coring: International partnerships in ice core sciences (IPICS). *Pages News* 14 (1), 6-10, ISSN 1563-0803.
- Dee, D., et al. (2011), The ERA Interim reanalysis: ConFiguration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553–597, doi:10.1002/qj.828.
- Drumond, A., Marengo, J., Ambrizzi, T., Nieto, R., Moreira, L. and Gimeno, L. (2014). The role of the Amazon Basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18,2577-2598.
- Gimeno, L., Drumond, A., Nieto, R., Trigo, R.M. and Stohl, A. (2010). On the origin of continental precipitation. *Geophys. Res. Lett*, 37, 1-7, 2010a.
- Gimeno, L., Nieto, R., Drumond, A., Castillo, R. and Trigo, R.M. (2013). Influence of the intensification of the major oceanic moisture sources on continental precipitation. *Geophys. Res. Lett*, doi: 10.1002/grl.50338, 2013.
- Gettelman, A., A. R. Douglas, and J. R. Holton, (2000). Simulations of water vapour in the upper troposphere and lower stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 105, 9003 - 9023.
- Nieto, R., Durán-Quesada, A.M., and Gimeno, L. (2010). Major sources of moisture for Antarctic ice-core sites identified through a Lagrangian approach. *Clim. Res.* VOL. 40: 45-49, 2010, doi: 10.3354/cr00842.
- Numaguti, A. (1999). Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model, *J. Geophys. Res: Atmospheres* (1984{2012), 104, 1957-1972.
- Sodemann, H., Schwierz, C. and Wernli, H. (2008). Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence. *J. Geophysical Res: Atmospheres* (1984-2012). VOL 113, issue D12, 27, doi: 10.1029/2007JD009416.
- Sodemann, H. and Zubler, E., (2009). Seasonal and inter-annual variability of moisture sources for Alpine precipitation during 1995-2002. *Int. J. Climatol.* 30, 947-961, doi: 10.1002/joc.1932.
- Stohl, Andreas (2004). A Lagrangian Analysis of the Atmospheric Branch of the Global Water Cycle. Part I: Method Description, Validation and Demonstration for the August 2002 Flooding in Central Europe. *J. Hydrometeorol* 5:656-678.
- Stohl A and James P (2005) A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. II. Moisture transports between Earth’s ocean basins and river catchments. *J Hydrometeorol* 6:961–984.

