

Variabilidad invernal de los transportes verticalmente integrados de humedad sobre la Península Ibérica e influencias atlánticas

Jon SÁENZ AGIRRE¹, Jesús FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ¹ y Eduardo ZORITA CALVO²

¹ Universidad del País Vasco; Departamento de Física Aplicada II
wdpsaagj@lg.ehu.es chus@wm.lc.ehu.es

² GKSS Research Center; Department of Paleoclimate
zorita@gkss.de

RESUMEN

Se presentan algunos resultados relativos a la variabilidad interanual de los transportes verticalmente integrados de humedad sobre la Península Ibérica y la cuenca mediterránea en invierno y su dependencia de la variabilidad en el Atlántico. Asimismo, se tratan aspectos relativos a las implicaciones de la variabilidad de los transportes verticalmente integrados de humedad en las estructuras espaciales de la variabilidad de precipitación y los efectos que tiene la propagación de esta señal sobre zonas a sotavento como, por ejemplo, la cuenca Mediterránea. Finalmente, se presentan unos resultados preliminares obtenidos mediante una integración larga con un modelo regional sobre la Península Ibérica y se muestra la mayor capacidad de representar los efectos de la orografía u otras condiciones de contorno inferiores (temperatura superficial del mar, por ejemplo) en la estructura espacial de estos transportes.

Palabras clave: transporte verticalmente integrado de humedad, precipitación, variabilidad, invernal, Atlántico, ciclo hidrológico.

Interannual variability of vertically integrated moisture transports over Iberian Peninsula and Atlantic influences during winter

ABSTRACT

Some results about the inter-annual variability of vertically integrated moisture transports over the Iberian Peninsula and the Mediterranean basin during winter are shown. Their dependency on Atlantic variability is also shown. The relationships between the spatial structure of the variability of precipitation and the variability of vertically integrated moisture transports and the effects this variability has on close downwind areas, like the Mediterranean is also treated. Finally, some preliminary results from a long-term integration of a regional atmospheric model over the Iberian Peninsula are shown. These results show a major improvement in the ability to represent effects by topography or other lower boundary conditions (SST, for instance) in the spatial structure of these transports.

Keywords: vertically integrated moisture transport, precipitation, variability, winter, Atlantic, hydrologic cycle.

SUMARIO: 1. Introducción. 2. Datos y metodología. 3. Resultados. 4. Conclusiones. 5. Agradecimientos. 6. Referencias bibliográficas.

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico tiene gran interés desde el punto de vista del estudio del medio natural. Cubre aspectos que relacionan la meteorología (ramal atmosférico) con la

oceanografía (evaporación, precipitación y su impacto en la salinidad del agua oceánica) o con la hidrología de la superficie terrestre (evaporación en los suelos, escorrentía, etc...). Todos estos ámbitos están relacionados por leyes de conservación del agua en sus diversas fases (vapor, líquido, sólido) y por leyes que rigen el transporte de esta materia entre diferentes reservorios.

Así, desde el punto de vista climático, y con las aproximaciones que se suelen emplear, la divergencia del transporte verticalmente integrado de humedad está relacionada con la diferencia evaporación menos precipitación (Berbery y Rasmusson 1999; Higgins et al. 1996; Peixoto y Oort 1992; Wang y Paegle 1996).

Los impactos de estos procesos sobre el medio natural son muy variados. Así, la existencia de una falta de balance en la evaporación y la precipitación sobre una cuenca oceánica con un transporte neto de vapor de agua fuera de la misma explica, por ejemplo, que las aguas del océano Atlántico sean notablemente más saladas que las aguas del océano Pacífico (Broecker 1997). Otros ejemplos notables son las diferencias entre los porcentajes de humedad reciclada (fracción de la humedad precipitada sobre un área procedente de esa misma zona frente a la procedente del exterior) entre regiones más o menos secas como pueden ser la cuenca del Amazonas o la del Missisipi, con ciclos hidrológicos notablemente diferentes entre ambas (Eltahir y Bras 1994).

Desde el punto de vista climático resulta evidente la necesidad de considerar de forma detallada el ciclo hidrológico por muchos motivos. Juega un papel importante en los procesos de precipitación, evaporación (flujo de calor latente), en los flujos de radiación atmosférica, tanto en el espectro infrarrojo (el poder de absorción de radiación de onda larga por el vapor de agua es alto) como en el visible (formación de nubes). En el océano, la salinidad de determinadas regiones ejerce una influencia importante en la convección oceánica en las zonas de producción de aguas profundas.

Por otro lado, la evaporación y la precipitación sirven de nexo de unión entre los ramales superficial y atmosférico del ciclo global del agua, a la vez que el ciclo atmosférico del vapor de agua sirve de medio de transporte a grandes distancias de grandes cantidades de agua. Un estudio detallado del ramal atmosférico del ciclo de agua permite identificar zonas fuente y sumidero de vapor de agua. La variabilidad dominante del ciclo hidrológico está asociada a los campos de precipitación (Trenberth y Guillemot 1998), pero no es posible una consideración completa sin tener a la vez en cuenta la evaporación y los transportes. Finalmente, en determinadas zonas, y la Península Ibérica puede ser paradigmática al respecto, la existencia de factores de realimentación entre la precipitación y la superficie terrestre y su cobertura vegetal depende extraordinariamente de la identificación de los mecanismos implicados en la evaporación y el reciclaje de humedad en diferentes escalas espaciales (Burde y Zangvil 2001).

Por todo ello, en este estudio se analiza en detalle la variabilidad de los transportes de humedad sobre la Península Ibérica en relación con la variabilidad climática en el Atlántico. La influencia de la variabilidad climática en el Atlántico sobre diversos elementos climáticos como por ejemplo la precipitación, la temperatura o la irradiancia ha sido estudiada en detalle en trabajos previos de diversos grupos de investigadores. En este estudio se analiza su efecto en los transportes verticalmente integrados de humedad.

De todos los modos de variabilidad de gran escala identificados hasta el momento mediante diversas técnicas en el Hemisferio Norte (Bell y Halpert 1995; Kimoto y Gil 1993; Wallace y Gutzler 1981), este estudio se restringe básicamente a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y al índice correspondiente al patrón del Atlántico Oriental (*East Atlantic, EA*). La razón es que de esta manera se muestra la influencia de dos modos de variabilidad cuyos efectos sobre el área han sido ya identificados en diversos trabajos previos, sin intención de ser completamente exhaustivos en el análisis de la influencia de todos los modos del Hemisferio Norte, algo que está fuera del ámbito del trabajo. Los dos índices seleccionados muestran relación con la intensidad y disposición de los sistemas sinópticos y las anomalías meridionales de circulación en la zona a estudio (Rogers 1990; Sáenz et al. 2001; Ulbrich et al. 1999), así como con la variabilidad de los transportes verticalmente integrados de humedad sobre el área (Fernández et al. 2003), lo que justifica su selección.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

En este trabajo se emplean los datos de los Reanálisis del *National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research* (NCEP-NCAR *Reanalysis*). La resolución espacial de este conjunto de datos en latitudes de la Península es del orden de 150-200 km, dependiendo de la variable climática. Los transportes mensuales verticalmente integrados de humedad son los calculados por Trenberth y Guillemot (1998) en coordenadas sigma para evitar errores derivados de la interpolación a superficies de presión (Berbery y Rasmusson 1999; Trenberth y Guillemot 1995, 1998). Por simplificación, en este trabajo denotaremos el transporte integrado verticalmente simplemente como transporte de humedad.

El índice NAO mensual empleado proviene de *Climatic Research Unit* (Jones et al. 1997), así como los datos mensuales de precipitación (New et al. 2000). El índice EA empleado se ha obtenido de la definición proporcionada por Wallace y Gutzler (1981) a partir de las anomalías mensuales de los campos de altura geopotencial en 500 hPa (Z500) de los reanálisis ERA40 del *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Simmons y Gibson 2000) en los puntos (55N, 20W), (25N, 25W) y (50N, 40E).

Finalmente, los transportes de humedad calculados con alta resolución sobre la Península Ibérica se han obtenido de un reanálisis meteorológico regional realizado por los autores empleando el modelo climático regional MM5 (Grell et al. 1995). En esta simulación se emplean tres dominios anidados sucesivamente uno dentro del otro (Fig. 1), con tamaños de malla de 135 km sobre el Atlántico, 45 km sobre la Península, 15 km sobre la Cornisa Cantábrica y 24 niveles verticales σ entre la superficie y 100 hPa. Existe anidamiento de doble vía entre los dominios interiores y el análisis regional está realizado empleando como condiciones de contorno los Reanálisis del NCEP entre 1960 y 1989. Se emplea relajamiento newtoniano hacia los datos de NCEP. Se ha empleado como conjunto de parametrizaciones del modelo MM5 las siguientes: la parametrización Kain-Fritsch de convección de cúmulos, el esquema radiativo *Cloud* (Dudhia), el esquema explícito de humedad de fase mixta (Reisner), el esquema

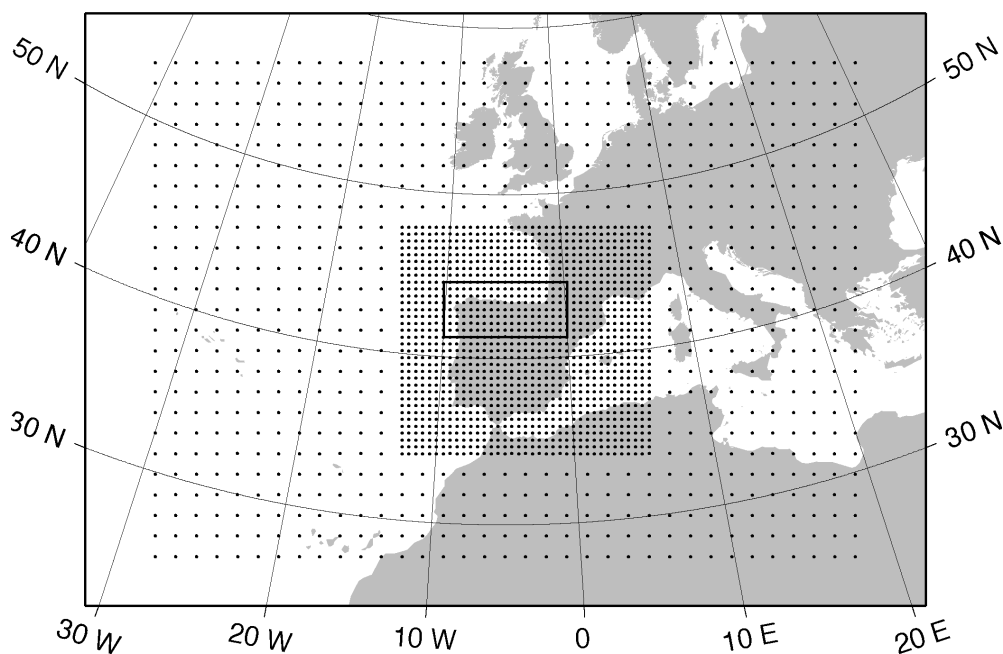


Figura 1. Dominios de la simulación 1960-1989 con MM5 forzada por las condiciones de contorno de los Reanálisis del NCEP-NCAR.

MRF de capa límite y un suelo de cinco capas (Grell et al. 1995). El modelo se ha utilizado en modo asimilación de datos, de forma que cada seis horas los resultados del dominio exterior son consistentes con los Reanálisis del NCEP-NCAR.

3. RESULTADOS

La Fig. 2 muestra el ciclo anual de los transportes de humedad, de acuerdo con la climatología obtenida en el período 1979 a 2001. Se aprecia claramente la evolución meridional de estos transportes, asociada a la posición estacional de las «trayectorias de las depresiones» (*storm-track*) en el Atlántico.

La variabilidad de estos transportes en los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) de acuerdo con la variabilidad asociada a los dos modos más importantes de variabilidad en el Atlántico (NAO y EA) se muestra en las Figs. 3 y 4, en forma de regresión de los transportes de humedad en cada punto de malla con los valores mensuales (de las anomalías respecto a los valores climatológicos mensuales) de estos índices en los meses de diciembre, enero y febrero. En estas gráficas, los puntos de los reanálisis donde el coeficiente de correlación de los índices con alguna de las componentes (zonal o meridional, indistintamente) es superior a 0.4, 0.5, 0.6 y sucesivamente, están indicados con valores crecientes de gris. Estos niveles son

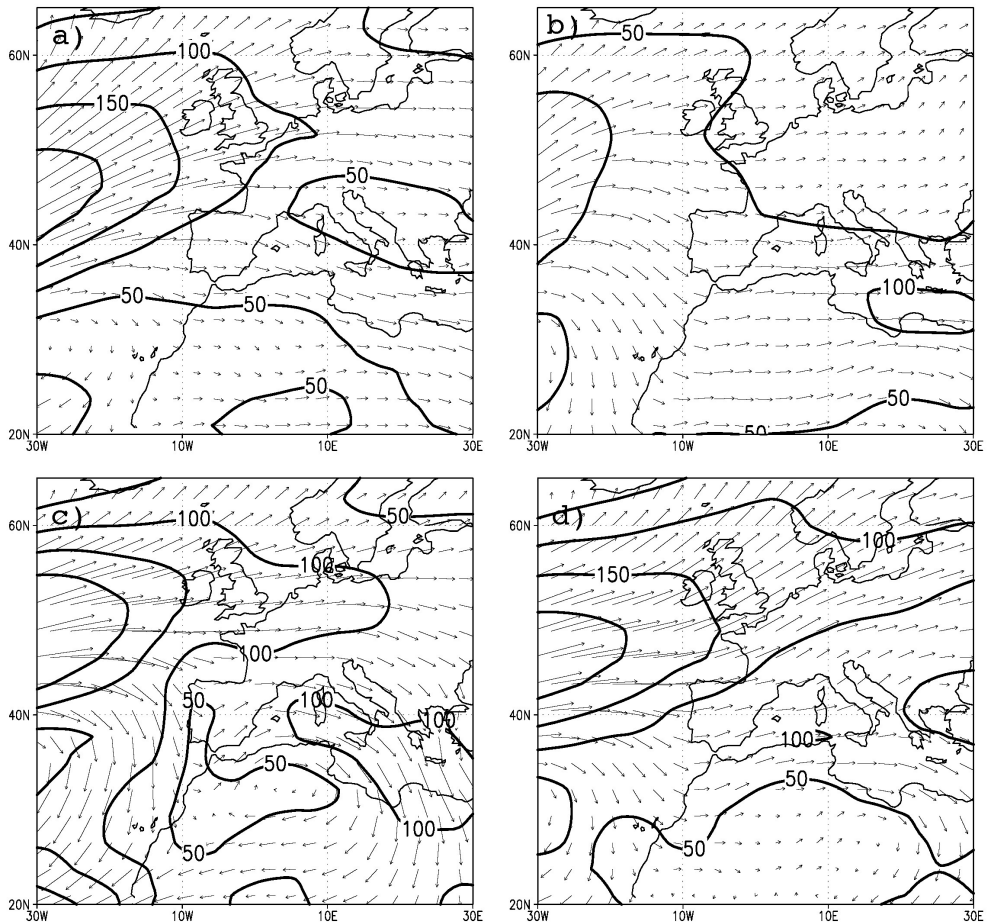


Figura 2. Ciclo anual del vector verticalmente integrado de humedad y su módulo (contornos), expresado en $\text{kg}/(\text{m s})$. De izquierda a derecha y de arriba a abajo, a) enero, b) abril, c) julio y d) octubre.

estadísticamente significativos (localmente) a un nivel del 95% de acuerdo a un test t sobre el coeficiente de correlación, dadas las longitudes de las series y su autocorrelación.

La variabilidad asociada al índice NAO (Fig. 3a) indica que durante fases positivas del índice NAO, el transporte medio de humedad atmosférica desde el Atlántico hacia el suroeste peninsular disminuye significativamente. Análogamente, los transportes de humedad hacia el Norte de Europa y las Islas Británicas aumentan de una forma notable. Con el fin de facilitar la interpretación, la Fig. 3b muestra el patrón asociado a las fases negativas del índice NAO, aunque dado el carácter lineal del cálculo de la regresión, no aporta información nueva.

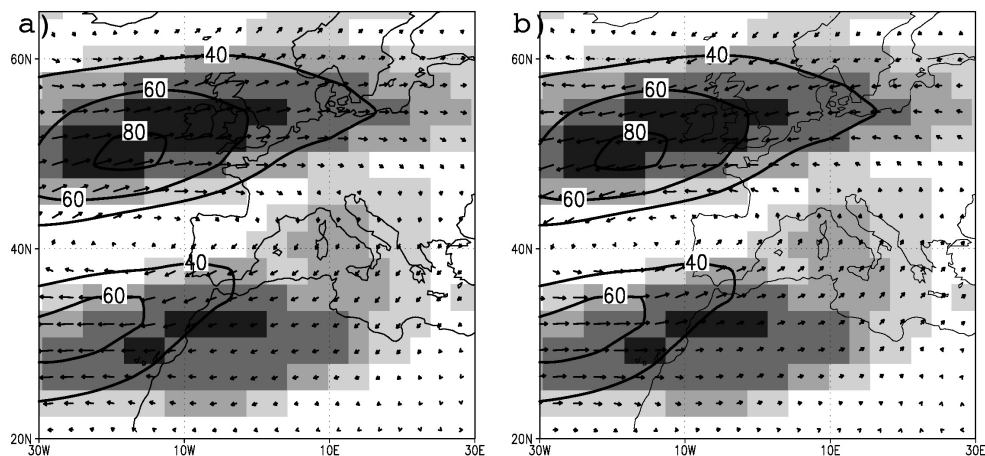


Figura 3. Regresión en cada punto de malla del índice NAO (CRU) sobre los transportes verticalmente integrados de humedad, expresada en $\text{kg}/(\text{m s})$. El panel izquierdo muestra la anomalía correspondiente a un valor unidad del índice NAO (estandarizado) y el panel derecho la anomalía correspondiente a un valor -1 del índice NAO (estandarizado). Las sombras indican que en cada punto de la malla, el coeficiente de correlación con la componente zonal o meridional supera los niveles 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 o 0.8, con diferentes niveles de gris.

Por su parte, el índice EA induce también cambios importantes en los transportes de humedad (Fig. 4a), si bien esta vez los cambios se ciñen al norte de la Península Ibérica y, especialmente, al norte de Europa. Análogamente, la Fig. 4b muestra las anomalías de transporte de humedad durante fases negativas del índice EA.

Los resultados previos son claramente consistentes con la estructura espacial del coeficiente de correlación de la precipitación durante diciembre, enero y febrero con los índices NAO y EA (Fig. 5a y 5b, respectivamente). Sin embargo, aún a pesar de que los patrones de transporte de humedad derivados de los datos de los reanálisis de NCEP —de resolución espacial relativamente grosera— son consistentes con los datos de precipitación observacionales de un conjunto independiente de datos (CRU) de mayor resolución espacial, existen áreas de estudio, como puede ser la relación de los caudales en los ríos con los transportes de humedad o los fenómenos de reciclaje de humedad, en los que la resolución espacial de los datos obtenidos de un Reanálisis y la calidad en la representación del ciclo hidrológico es insuficiente (Gutowski et al. 1997). Por ello, es bastante común el empleo de integraciones con modelos regionales de alta resolución (Giorgi 1994; Berbery et al. 1996) para obtener una interpolación espacial de las variables relevantes consistente con las leyes físicas y con la topografía de una determinada región. Otra faceta potencialmente interesante de esta línea de trabajo es el análisis en detalle de mecanismos causales asociados a la evaporación y la liberación de calor latente. Esto ha sido ya identificado en la evolución de perturbaciones baroclínicas dentro de la cuenca Mediterránea, por ejemplo, asociadas a modos principales del transporte en el interior de la cuenca que no quedan claramente identificados a partir de los Reanálisis (Fernández et al. 2003).

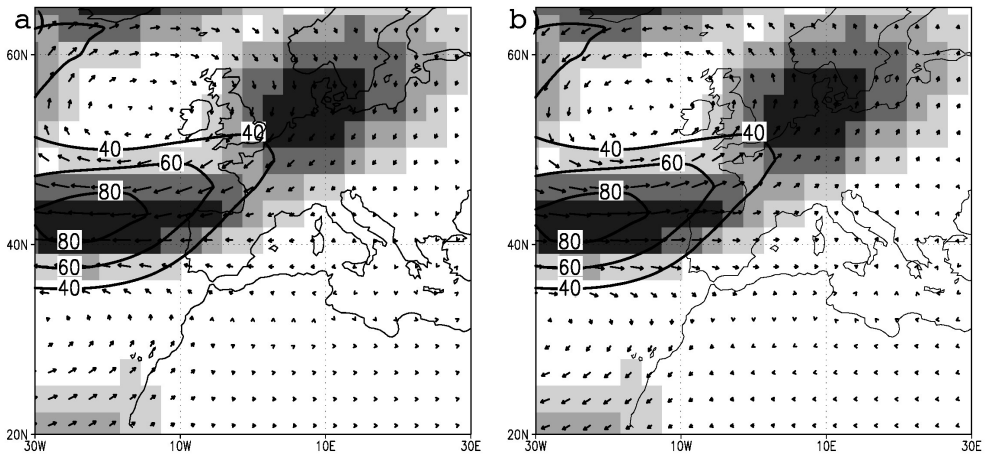


Figura 4. Regresión en cada punto de malla del índice EA (Wallace y Gutzler, 1981) sobre los transportes verticalmente integrados de humedad, expresada en kg/(m s). El panel izquierdo muestra la anomalía correspondiente a un valor unidad del índice EA (estandarizado) y el panel derecho la anomalía correspondiente a un valor -1 del índice EA (estandarizado). Las sombras indican que en cada punto de la malla, el coeficiente de correlación con la componente zonal o meridional supera los niveles 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 o 0.8, con diferentes niveles de gris.

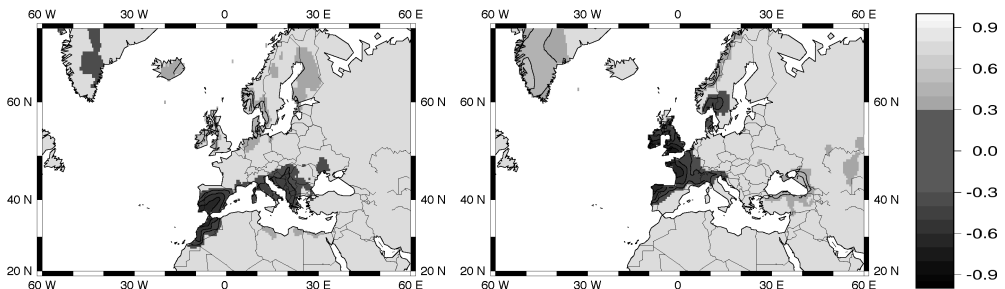


Figura 5. Correlación de la precipitación mensual (diciembre, enero, febrero) con los índices NAO (izquierda) y EA (derecha).

La Fig. 6 muestra, como un resultado preliminar, la climatología de los transportes de humedad sobre la Península Ibérica, estimados a partir de los resultados de una simulación de alta resolución con el modelo regional MM5. Se aprecian claramente mejoras en la definición de los transportes de humedad sobre zonas montañosas como los Picos de Europa, los Pirineos o el Sistema Central, la canalización de transportes a lo largo de valles como el del Ebro en invierno y la complejidad de los transportes de humedad sobre el centro de la Península en verano.

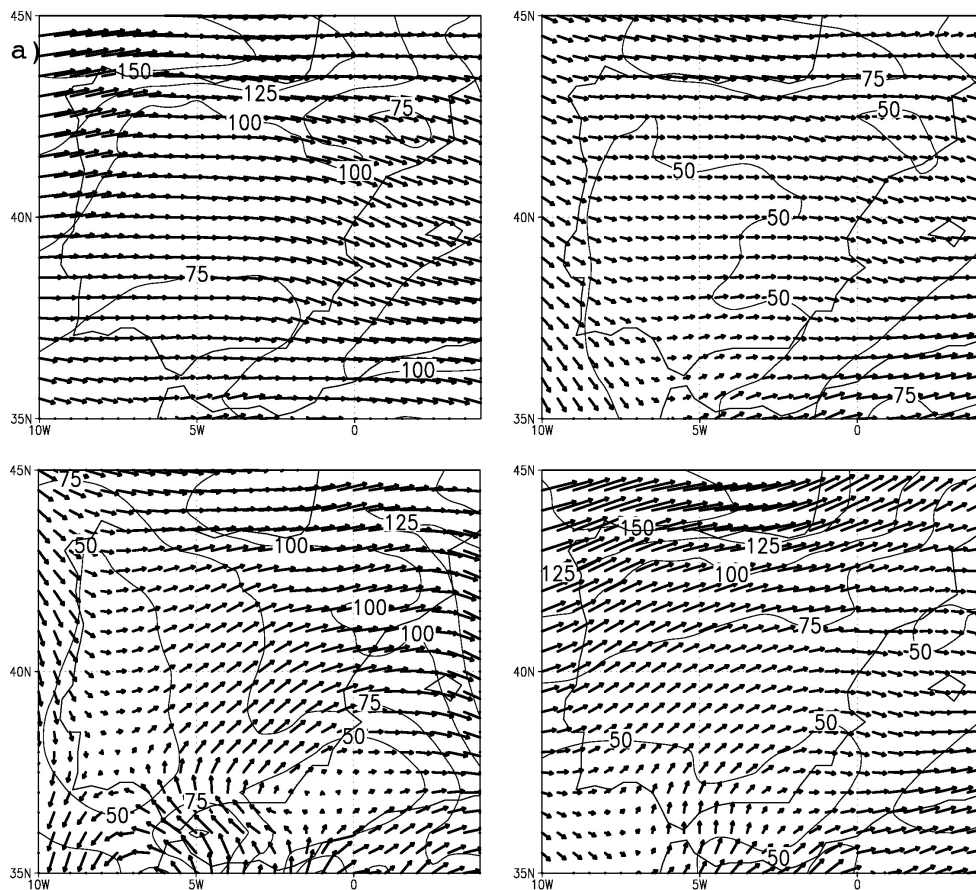


Figura 6. Ciclo anual de los transportes verticalmente integrados de humedad sobre la Península Ibérica, de acuerdo con la integración de un modelo regional forzado por las condiciones de contorno suministradas por los Reanálisis del NCEP, 1960-1989. De izquierda a derecha y de arriba abajo, climatología de a) enero, b) abril, c) julio y d) octubre.

4. CONCLUSIONES

Los transportes de humedad sobre el Atlántico muestran una estructura espacial claramente asociada a la variabilidad de las «trayectorias de las depresiones» (*storm-track*). Tanto la Oscilación del Atlántico Norte como el índice del Atlántico Oriental (EA) modifican de forma intensa el patrón espacial de estos transportes en Europa Occidental. La interrelación entre la variabilidad de la precipitación y la variabilidad de los transportes de humedad es evidente. Ello sugiere que, dado que los transportes de humedad están influenciados por una gran variedad de campos atmosféricos (viento a diferentes alturas, baroclinicidad, humedad específica, presión superficial), podrían llegar a convertirse en una gran ayuda para el análisis y predicción de cambios regionales

de precipitación en el futuro. Su uso vendría apoyado por el fundamento matemático de la ecuación de conservación de la humedad atmosférica. No obstante, esta conclusión se debe matizar. La resolución espacial y vertical de la actual generación de Reanálisis (T63 para NCEP-NCAR) no es suficiente para una representación adecuada del ciclo atmosférico de la humedad, y hay problemas para el cálculo detallado de los transportes de humedad utilizando datos con una resolución temporal de seis horas. Por tanto, para el caso de los ejercicios de regionalización en el caso de escenarios del IPCC (clima futuro), es dudoso que sea posible obtener la información con la resolución espacial (horizontal y vertical) y temporal necesaria. Sin embargo, el uso de los transportes de humedad podría ser una opción interesante en ejercicios de regionalización a partir de Reanálisis o resultados de simulaciones mediante modelos regionales de alta resolución para estudios muy detallados sobre regiones muy concretas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los centros NCEP/NCAR, y ECMWF la cesión de los datos de los Reanálisis, sin los cuales no hubiera sido posible este trabajo. Asimismo, los datos de precipitación en superficie y del índice NAO han sido obtenidos de *Climatic Research Unit*, Universidad de East Anglia. Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología por medio del proyecto REN2002-04584-C04-04/CLI y la financiación de la Universidad del País Vasco en el capítulo de subvención a grupos 9/UPV00060.310-15343/2003. Jesús Fernández está financiado por una beca de formación del Departamento de Educación del Gobierno Vasco.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELL, G. D. & M. S. HALPERT (1995). *NOAA Atlas No. 12. Interseasonal and Interannual Variability: 1986 to 1993*. Climate Analysis Center. U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration, 256 pp.
- BERBERY, E. H. & E. M. RASMUSSEN (1999). Mississippi moisture budgets on regional scales. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2654-2673.
- BERBERY, E. H.; E. M. RASMUSSEN, & K. E. MITCHELL (1996). Studies of North American continental scale hydrology using Eta model forecast products. *J. Geophys. Res.*, 101, 7305-7319.
- BROECKER, W. S (1997). Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO₂ upset the current balance? *Science*, 278, 1582-1588.
- BURDE, G. I. & A. ZANGVIL (2001). The estimation of regional precipitation recycling. Part I: Review of recycling models. *J. Climate*, 14, 2497-2508.
- ELTAHIR, E. A. B. & R. L. BRAS (1994). Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120, 861-880.
- FERNÁNDEZ, J.; J. SÁENZ & E. ZORITA (2003). Analysis of wintertime atmospheric moisture transport and its variability over southern Europe in the NCEP Reanalyses. *Clim. Res.*, 23, 195-215.

- GIORGI, F.; S. W. HOSTETLER & C. S. BRODEUR (1994). Analyses of the surface hydrology in a regional climate model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120, 161-183.
- GRELL, G. A.; J. DUDHIA & D. R. STAUFFER (1995). A Description of the Fith-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note 398+STR, NCAR, Boulder, 117 pp.
- GUTOWKI, J. R.; W. J., Y. CHEN & Z. OTLES (1997). Atmospheric water vapor transport in NCEP-NCAR Reanalyses: Comparison with river discharge in the Central United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1957-1969.
- HIGGINS, R. W.; K. C. MO & S. D. SCHUBERT (1996). The moisture budget of the Central United States in Spring as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO Reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 939-963.
- JONES, P. D.; T. JÓNSSON & D. WHEELER (1997). Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.*, 17, 1433-1450.
- KIMOTO, M. & M. GHIL (1993). Multiple flow regimes in the Northern Hemisphere winter. Part II: Sectorial regimes and preferred transitions. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2645-2673.
- NEW, M.; M. HULME & P. JONES (2000). Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, 13, 2217-2238.
- PEIXOTO, J. P. & A. H. OORT (1992). *Physics of Climate*. American Institute of Physics, Nueva York, 520 pp.
- ROGERS, J. C. (1990). Patterns of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899-1986) and associated wave cyclone frequencies. *J. Climate*, 3, 1364-1379.
- SÁENZ, J.; C. RODRÍGUEZ-PUEBLA, J. FERNÁNDEZ & J. ZUBILLAGA (2001). Interpretation of interannual winter temperature variations over southwestern Europe. *J. Geophys. Res.*, 106, 20641-20652.
- SIMMONS, A. J. & J. K. GIBSON (2000). *The ERA-40 Project Plan*. ERA-40 Project Report Series 1. ECMWF, Reading, 62 pp.
- TRENBERTH, K. E. & C. J. GUILLEMOT (1995). Evaluation of the global atmospheric moisture budget as seen from analyses. *J. Climate*, 8, 2255-2272.
- TRENBERTH, K. E. & C. J. GUILLEMOT (1998). Evaluation of the atmospheric moisture and the hydrological cycle in the NCEP Reanalysis. *Climate Dyn.*, 14, 213-231.
- ULBRICH, U.; M. CRISTOPH, J. G. PINTO & J. CORTE-REAL (1999). Dependence of winter precipitation over Portugal on NAO and baroclinic wave activity. *Int. J. Climatol.*, 19, 379-390.
- WALLACE, J. M. & D. S. GUTZLER (1981). Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784-812.
- WANG, M. & J. PAEGLE (1996). Impact of analysis uncertainty upon regional atmospheric moisture flux. *J. Geophys. Res.*, 101, 7291-7303.