

# ANÁLISIS DEL TRANSPORTE ATMOSFÉRICO DE HUMEDAD Y SU VARIABILIDAD SOBRE LA CUENCA MEDITERRÁNEA EN LOS REANÁLISIS DEL NCEP

Jon SÁENZ\*, Jesús FERNÁNDEZ\* y Eduardo ZORITA\*\*

\* *Departamento de Física Aplicada II. Universidad del País Vasco Apdo. 644, 48080-Bilbao*

\*\* *2GKSS Forschungszentrum. Max Planck Strasse, 1, D21502-Geesthacht, Alemania*

## RESUMEN

Se ha realizado un análisis mediante EOFs de datos instrumentales de precipitación invernal (Diciembre, Enero y Febrero) sobre tierra en un entorno de la cuenca mediterránea. Se han identificado los modos de transporte verticalmente integrado de humedad atmosférica asociados a estos EOFs a partir de datos cada seis horas de los Reanálisis. Se han estudiado también los flujos a través de la frontera del área a estudio y en cada punto de red. El primer EOF de precipitación invernal sobre la cuenca mediterránea está asociado a la dinámica del *storm-track* Atlántico. El segundo EOF representa la redistribución interna de humedad en el seno de la cuenca mediterránea, con el Golfo de Génova suministrando humedad a la atmósfera que precipita sobre el Mediterráneo oriental. Finalmente, el tercer EOF depende de la interacción entre la topografía europea a gran escala con los transportes de humedad.

**Palabras clave:** transporte atmosférico humedad, precipitación invernal mediterránea.

## ABSTRACT

*An EOF analysis of instrumental winter (December, January and February) precipitation data around the Mediterranean basin has been performed. The main modes of variability of the precipitation field have been used to identify the main modes of variability of the vertically integrated moisture transport at each grid point and at the boundaries related to these EOFs. The leading winter precipitation EOF is linked to the dynamics of the Atlantic storm-track. The second EOF, instead, represents the internal redistribution of moisture from the Genoa Gulf to the eastern Mediterranean. Finally, the last mode reflects the interaction of the European topography with the large-scale vertically integrated moisture transport.*

**Key words:** atmospheric moisture transport, winter precipitation, Mediterranean.

## 1. INTRODUCCIÓN

El área que rodea al mar Mediterráneo está densamente poblada y es una de las zonas en las que son abundantes las sequías que afectan a determinadas actividades económicas de gran impacto social, como la agricultura. Las precipitaciones más importantes, especialmente las debidas a sistemas meteorológicos de gran escala, se producen durante los meses de invierno, mientras que en otras épocas son más abundantes las debidas a sistemas convectivos aislados (PALUTIKOF *et al.*, 1994; RODRÍGUEZ-PUEBLA *et al.*, 1998; TRIGO *et al.*, 1999). En estas circunstancias, los

autores consideran interesante realizar un análisis detallado del subsistema atmosférico del ciclo hidrológico en el área, para aumentar el conocimiento sobre los aspectos físicos que rodean la variabilidad de precipitación en la zona.

Es generalmente aceptado que la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) influye en la variabilidad del clima de amplias regiones del sur de Europa y el norte de África debido a su influencia sobre la posición del final del storm-track Atlántico. También hay muchos estudios sobre las configuraciones de geopotencial o presión en superficie promediadas en el tiempo asociadas a él (GONZÁLEZ-ROUCO *et al.*, 2000; HURRELL, 1995; HURRELL y VAN LOON, 1997; QUADRELLI *et al.*, 2001; ROGERS, 1990, 1997; RODÓ *et al.*, 1997; ULBRICH *et al.*, 1999).

Algunos estudios previos han identificado diferentes mecanismos en la generación de ciclones en áreas distintas de la cuenca mediterránea. Así, los ciclones generados en el mediterráneo occidental tienen un origen principalmente debido al forzamiento orográfico por los Alpes, mientras que el efecto térmico es el más importante en el Mediterráneo oriental (ALPERT *et al.*, 1990a, 1990b). Otros trabajos han identificado dos principales fuentes de ciclones en el área en invierno (TRIGO *et al.*, 1999). La primera se centra en la ciclogénesis que se produce sobre el Golfo de Génova, la segunda se debe a los ciclones que penetran desde el Atlántico sobre la Península Ibérica y el Golfo de Bizkaia. Debido a este último camino, es importante que el área a estudio considere de forma explícita esta zona, prolongando hacia el Oeste el área inicialmente considerada por Alpert y colaboradores.

En todo caso, en el Mediterráneo son habituales ciclones de pequeñas dimensiones que no pueden ser identificados de forma positiva en análisis de resolución relativamente baja, como es el caso de los Reanálisis del NCEP. Este problema es aún más importante en el caso de la evaluación de los transportes verticalmente integrados, como se expondrá a continuación. No obstante, la ausencia, para conocimiento de los autores, de evaluaciones detalladas del ciclo hidrológico atmosférico en la cuenca Mediterránea y su variabilidad en invierno justifica que se emprenda un estudio como el presente.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

El área considerada cubre la zona [10W,40E] x [30N,50N] y el estudio abarca el período 1948-1996. Se han empleado datos mensuales de precipitación del análisis 0.5° x 0.5° de CRU (NEW *et al.*, 2000). La robustez de los resultados a la selección del conjunto de datos de partida se ha comprobado por la comparación de los EOFs con los obtenidos a partir de 150 estaciones individuales con pocos datos perdidos comprendidas en la zona a estudio y procedentes de *Global Historical Climatology Network* (GHCN) en el período 1948-1990. La figura 1 muestra el área a estudio y la ubicación de las estaciones del conjunto de datos GHCN utilizadas. El estado de la atmósfera se ha obtenido a partir de los datos cada 6 horas de los Reanálisis del NCEP en superficies de presión en el período 1948-1996. Los datos de humedad específica y viento utilizados cubren los niveles P=1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400 y 300 hPa, con una resolución horizontal de 2.5° x 2.5°.

Se ha calculado el ciclo estacional mensual en cada celda del conjunto CRU. Tras ello se han seleccionado los valores de anomalías de precipitación en cada punto de malla eliminado el ciclo

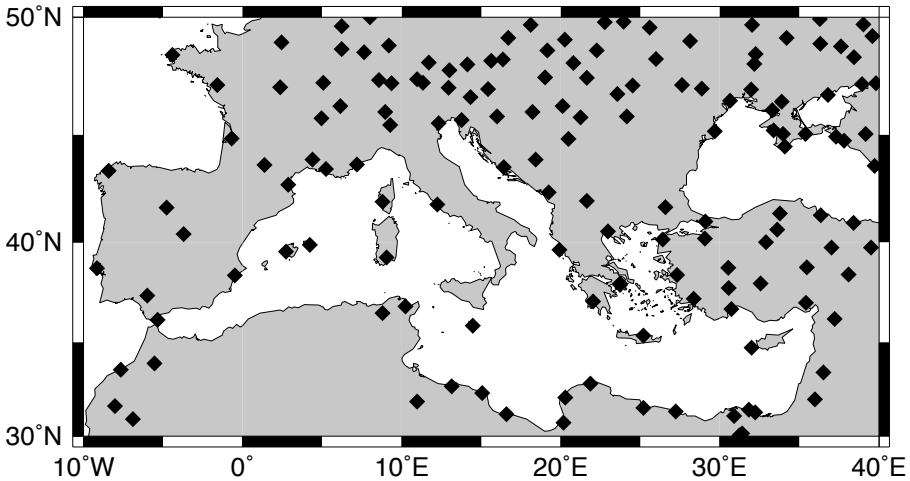


Figura 1: Area a estudio y estaciones del GHCN utilizadas de forma independiente en el análisis.

estacional mensual previamente obtenido. Finalmente, de las anomalías obtenidas, se han eliminado las tendencias lineales en cada celda calculándolas de forma independiente para cada mes de los analizados (Diciembre, Enero y Febrero). A partir de las anomalías (sin tendencia) de precipitación en cada punto de malla se han calculado los autovalores de su matriz de covarianza en modo S. Se han comprobado la estabilidad y la degeneración de los resultados mediante las técnicas habituales (NORTH *et al.*, 1982) y de Monte Carlo basadas en *subsampling*.

Es bien conocido que se pueden evaluar los transportes verticalmente integrados o bien en las coordenadas originales del modelo (coordenadas sigma en los datos espectrales) o bien en los datos de mallas regulares latitud-longitud interpoladas a superficies de presión que distribuye el NCEP. Diversos trabajos (MO y HIGGINS, 1996; TRENBERTH y GUILLEMOT, 1995, 1998) recomiendan el uso de los valores en coordenadas sigma para obtener mayor precisión. No obstante, en nuestro caso vamos a utilizar las coordenadas de presión y los valores interpolados en una malla regular latitud-longitud. La razón básica es de índole práctica. Los datos en superficies de presión distribuyen directamente el campo de velocidad del viento, mientras que los datos en coordenadas sigma requieren obtener los valores de la velocidad a partir de los campos de vorticidad y divergencia que son los únicos que se distribuyen en este caso. Por otro lado, existen ciertas dudas de que el esfuerzo extra necesario tenga una repercusión cuantitativa importante debido a dos factores. En primer lugar, los autores más críticos con el uso de superficies de presión reconocen que las inexactitudes son elevadas en el caso de utilizar las divergencias de los transportes, pero que las inexactitudes son mucho menores en los propios transportes (TRENBERTH y GUILLEMOT, 1995), que son las magnitudes que se van a emplear en este estudio. En segundo lugar, dentro de las fuentes de error que pueden aparecer, además de los errores debidos a la interpolación sobre superficies de presión aparecen errores debidos a la falta de resolución horizontal y a una representación incorrecta de la topografía real. Es lógico suponer que en la región mediterránea estos

errores superan a los debidos a la interpolación a superficies de presión, dado el importante papel de los ciclones de pequeña escala y la topografía compleja de la zona. Por tanto, los resultados solamente serían en realidad mejorables con simulaciones (*reanálisis*) a muy alta resolución mediante modelos regionales que cubran toda la cuenca mediterránea, algo que está fuera del alcance de los autores del estudio por razones obvias.

En primer lugar, se han evaluado los transportes verticalmente integrados de humedad calculados en superficies de presión:

$$\vec{Q} = \frac{1}{g} \int_{P_i}^{P_s} q \vec{v} dP$$

A partir de ellos se han calculado las regresiones de los PCs significativos y estables obtenidos a partir de las anomalías de precipitación con estos transportes y con los flujos de humedad a través de las fronteras del dominio seleccionado a estudio, lo que da una idea de los transportes de humedad desde y hacia el dominio en situaciones positivas o negativas de cada PC. Los flujos transfronterizos  $\Phi_i$  en la celda  $i$ -ésima del límite de la región se han obtenido a partir de la expresión  $\Phi_i = l_i \vec{Q}_i \bullet \hat{n}_i$ , con  $l_i$  la longitud lineal de esa celda (dependiente de la latitud) y  $\hat{n}_i$  un vector unitario saliente hacia el exterior del área a estudio.

### 3. RESULTADOS

Los resultados del análisis de EOFs muestran que tres modos son estables (más del 90 % de las submuestras aleatorias obtenidas superan un valor absoluto del coeficiente de congruencia de 0.85) y significativos de acuerdo con los tests usuales. Los tres EOFs explican respectivamente el 22 %, el 16 % y el 11 % de la varianza total. Todos ellos aparecen como los tres primeros (aunque el primero y el segundo están cambiados de orden) en el campo definido por las estaciones del GHCN. Estos modos se representan como la fracción de varianza explicada en cada punto en la figura 2. La interpretación es clara. El primer modo representa variaciones en la parte occidental, el segundo en la parte oriental y el tercero variabilidad de la sección norte de la cuenca mediterránea, resultados de acuerdo con los presentados por QUADRELLI y colaboradores (2001) derivados de un análisis alternativo de precipitación (CMAP), lo que da idea de la robustez de estos resultados. Los PCs asociados a estos EOFs se presentan en la figura 3. El primer PC correlaciona significativamente al 99.9 % con el índice NAO de Gibraltar ( $r=-0.52$  con 141 valores en las series). Por su parte, el tercer PC correlaciona ( $r=-0.58$ ) también significativamente al 99.9 % con el índice East Atlantic definido por WALLACE y GUTZLER (1981).

La figura 4 muestra las principales características de los flujos transfronterizos de humedad atmosférica. La figura 4a muestra el flujo medio y las figuras 4b, 4c y 4d, respectivamente, los patrones de regresión del flujo transfronterizo con los componentes principales PC1, PC2 y PC3. Con la elección de signos que se ha realizado en la definición del flujo transfronterizo (los vectores unitarios correspondientes son salientes), valores positivos reflejan que la humedad atmosférica se está exportando a través de esa frontera y signos negativos indican que en el punto de malla donde se producen aparece una entrada de humedad hacia el dominio desde el exterior. Junto a las columnas que representan los flujos transfronterizos aparecen unos números del mismo color que las barras correspondientes que indican el valor del flujo (en petagramos/mes) para valores  $PC_i=1$

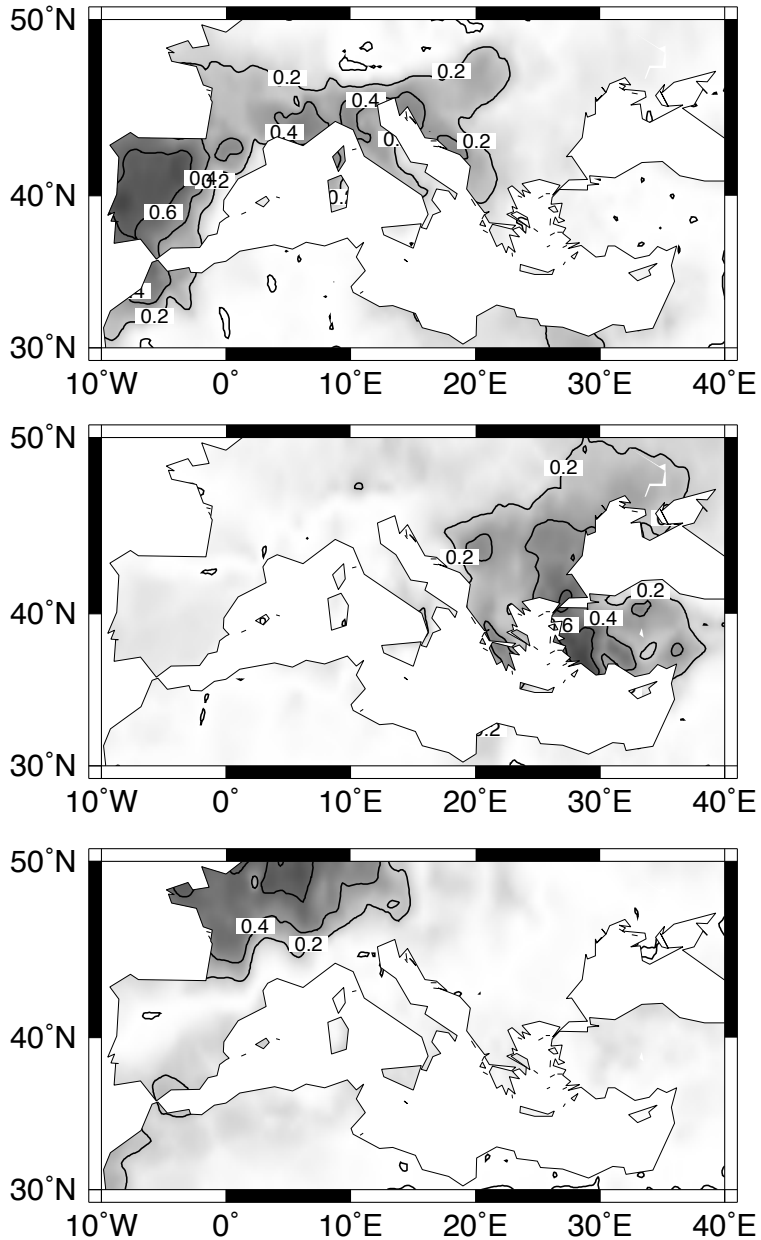


Figura 2: De arriba abajo, EOFs estables del conjunto de precipitación de CRU expresados como la fracción de varianza explicada en cada punto.

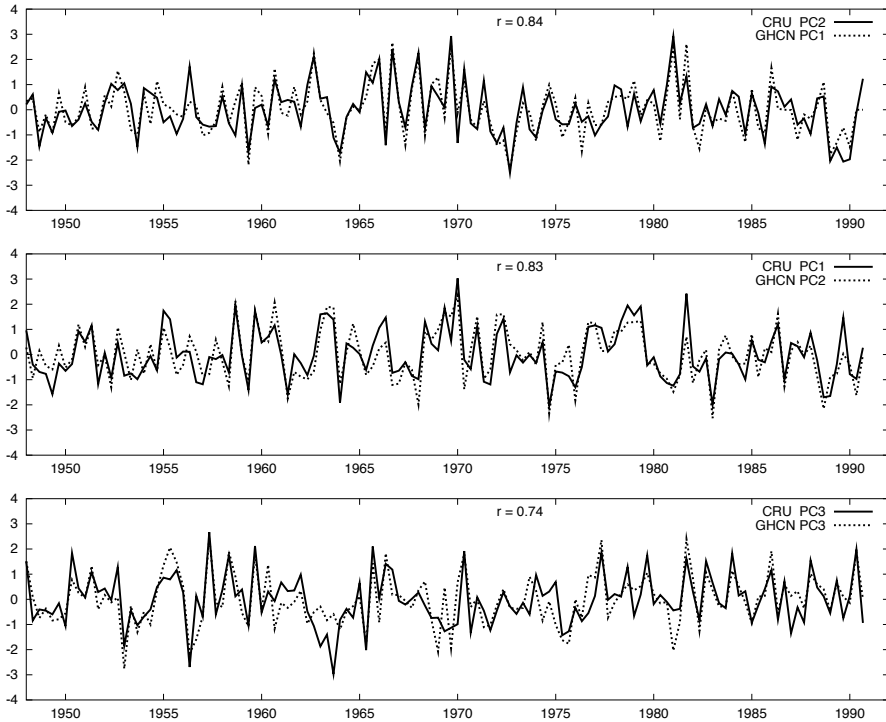


Figura 3: Componentes principales obtenidos a partir del conjunto de CRU y del GHCN. Los dos primeros PCs del conjunto GHCN han sido intercambiados.

sobre unos números entre paréntesis que representan el valor del flujo medio en esas mismas columnas. Las columnas que aparecen en los paneles 4b, 4c y 4d solamente se han representado si el intervalo de confianza en un test  $t$  sobre el coeficiente de correlación de Pearson en ese punto de red supera el 95 % y, por tanto, se pueden considerar como aquellos puntos de red donde se producen flujos anómalos estadísticamente significativos asociados a los PCs correspondientes.

Debido a limitaciones de espacio, no se van a describir todas las características asociadas a la figura 4. Solamente se van a analizar algunos resultados que permitirán ayudar en su interpretación. Así, la figura 4a muestra un flujo predominantemente zonal de la humedad sobre la cuenca. El flujo está bastante equilibrado, con una pequeña diferencia del flujo de entrada sobre el de salida de solamente 15 Pgr de agua mensuales, lo que equivaldría a una precipitación de 0.05 mm/día. Las figuras 4b y 4c muestran unas entradas anómalas de humedad atmosférica por la frontera occidental en fases positivas de los PCs correspondientes (PC1 y PC2), pero repartidas por la zona más al sur o al norte del dominio, respectivamente. Igualmente destaca de forma sorprendente la entrada de agua sobre Libia en la frontera sur del dominio, flujo anómalo de 38 Pgr que supera los valo-

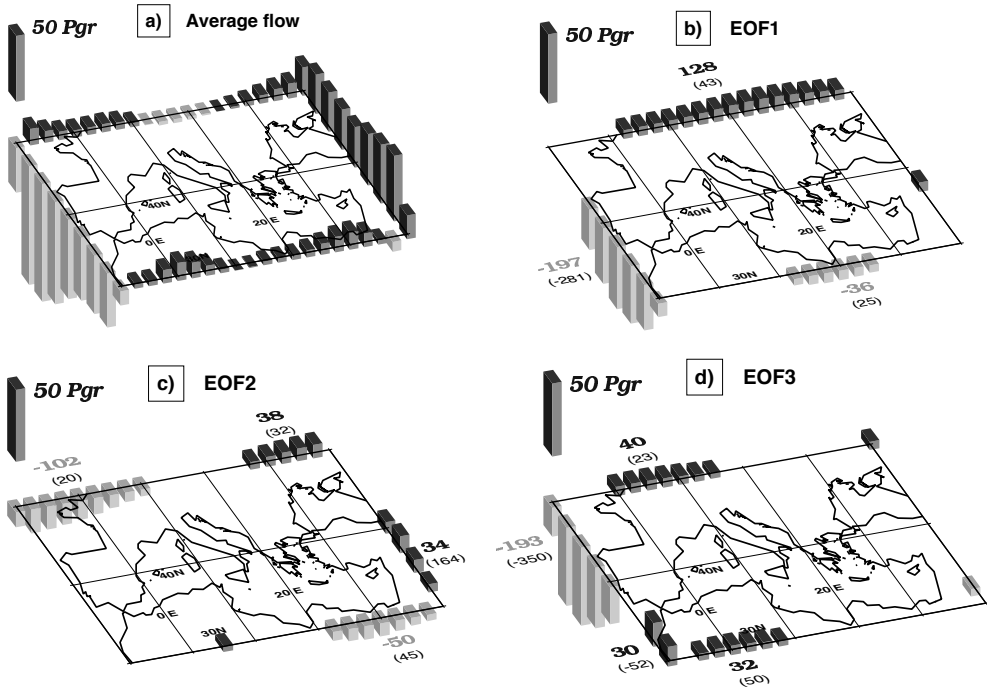


Figura 4: Flujos de humedad a través de las fronteras del dominio en Pgr/mes. El flujo medio aparece en el panel 4a, mientras que los paneles 4b, 4c y 4d muestran los patrones de regresión asociados a los componentes principales PC1, PC2 y PC3.

res medios correspondientes (25 Pgr). Este resultado es chocante, pero se puede interpretar si se analiza a la luz de la asimetría que muestra la distribución del PC1 de precipitación. Básicamente, el resultado indica que el Mediterráneo no importa humedad por esa zona durante fases positivas, mientras que la exporta significativamente durante fases negativas, más abundantes, de acuerdo a la estimación de la PDF basada en los datos existentes. En forma global, todos los transportes que aparecen en los bordes del dominio se pueden explicar de forma análoga, teniendo especial cuidado en el convenio de signos y en considerar que las figuras 4b, 4c y 4d representan patrones de regresión que hay que sumar (fases positivas de los PCs) o restar (fases negativas) a los valores medios que aparecen en la figura 4a. En forma global, hay que resaltar que el primer PC está caracterizado en fases positivas por una entrada neta elevada de 98 Pgr/mes de agua a la cuenca Mediterránea. En el caso de las fases positivas de PC2, hay un incremento de la llegada de agua por las frontera norte del dominio y un aumento de la salida por el este (el caso de la frontera meridional sur tiene la misma explicación que la citada en el caso de PC1 sobre Libia). En el balance total, fases positivas de PC2 muestran un menor incremento en la entrada neta de humedad a la cuenca mediterránea, solamente 76 Pgr/mes. No obstante, la figura 5 muestra la manera como se

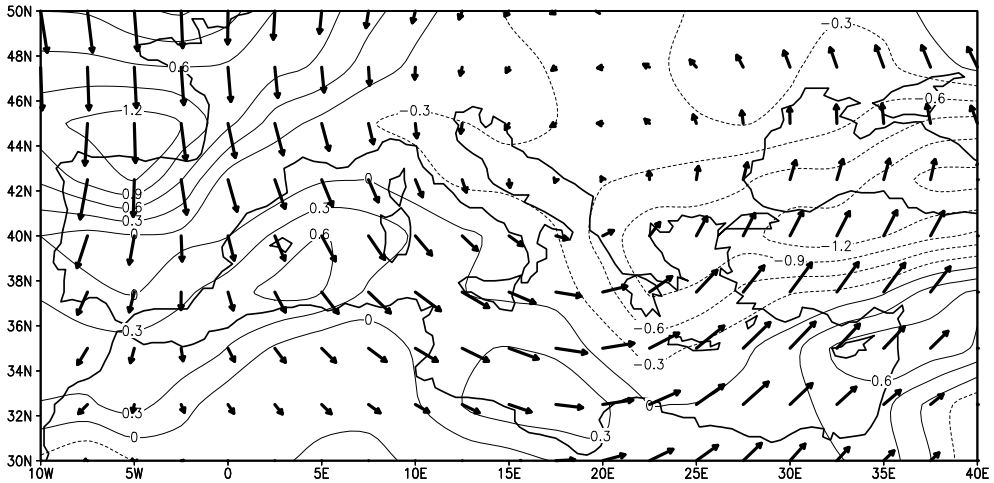


Figura 5: Flujos de humedad asociados a PC2 en el interior del dominio (patrón de regresión), en  $\text{kg/m/s}$ . Los contornos de isóneas indican la regresión de PC2 con la divergencia del transporte verticalmente integrado de humedad, expresada en  $\text{mm/día}$ .

distribuye internamente la humedad durante las fases positivas. Existe claramente un predominio de la evaporación sobre la precipitación en el Mediterráneo occidental y el Golfo de Génova (se muestra como indicación cualitativa la divergencia positiva de los vectores de transporte verticalmente integrado de humedad) y, por el contrario, un predominio de la convergencia (precipitación) sobre el Mediterráneo oriental. Este resultado ha sido ratificado por el análisis del patrón de regresión del campo de evaporación calculado a partir del flujo de calor latente superficial. Finalmente, la figura 4d, correspondiente a PC3, muestra un incremento elevado del flujo de humedad por la mitad septentrional de la frontera oeste del dominio, humedad que precipita especialmente en el Norte de Europa debido al impacto de la orografía (figura 6). Este PC está asociado a una mayor entrada de humedad del área a estudio de 90 Pgr/mes.

#### 4. CONCLUSIONES

Los EOFs 1 y 3 están afectados por un mayor suministro de humedad desde el océano Atlántico por la frontera Oeste del dominio, mientras que el EOF2 representa un menor desequilibrio entre las entradas y las salidas y, básicamente, está asociado a la redistribución de humedad en el seno de la cuenca mediterránea, con un suministro extra de humedad sobre el Golfo de Génova que precipita sobre el Mediterráneo Oriental (figura 5). EOF3 está claramente relacionado con la interacción entre la topografía y los transportes de humedad a escala continental.



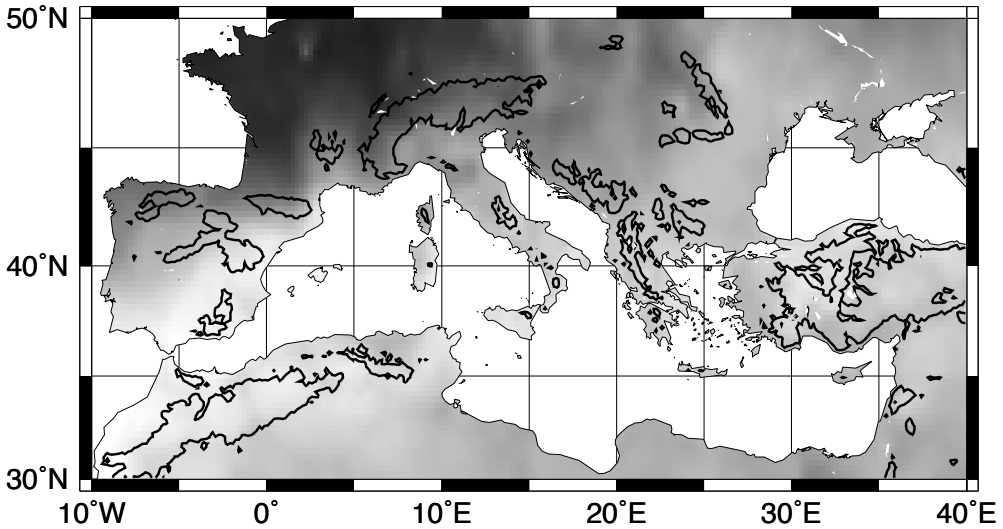


Figura 6: Estructura espacial de EOF 3 (como correlación de PC3 con la serie de precipitación en cada punto) y contorno de topografía de 1000 m obtenido a partir de ETOPO5.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Dos de los autores (J. Sáenz y J. Fernández) agradecen la hospitalidad del centro GKSS Forschungszentrum durante el verano de 2001. Este trabajo se ha podido llevar a cabo gracias a la financiación recibida del Servicio Vasco de Meteorología durante 2001. Jesús Fernández disfruta de una beca del Gobierno Vasco, Departamento de Educación, Universidades e Investigación. Los datos utilizados en este trabajo se han obtenido de los servidores WWW del Climate Prediction Center, NCAR Climate and Global Dynamics Division, NASA Goddard Institute for Space Studies, el Carbon Dioxide Information Analysis Center en Oak Ridge National Laboratory y el NCEP/NCAR Reanalysis Project. Los datos de precipitación del conjunto CRU han sido suministrados por el Proyecto LINKS de Impacto Climático (UK Department of the Environment, Contrato EPG 1/1/16) mediante la Climate Research Unit, Universidad de East Anglia.

## 6. REFERENCIAS

- ALPERT, P., NEEMAN, B.U. y SHAY-EL, Y. (1990a): Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data, *Tellus*, 42A, pp. 65-77.
- ALPERT, P., NEEMAN, B.U. y SHAY-EL, Y. (1990b): Intermonthly variability of cyclone tracks in the Mediterranean, *J. Climate*, 3, pp. 1474-1478.
- GONZÁLEZ-ROUCO, F., HEYEN, H., ZORITA, E. y VALERO, F. (2000): Agreement between observed rainfall trends and climate change simulations in the Southwest of Europe, *J. Climate*, 13, pp. 3057-3065.

- HURREL, J.W. (1995): Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science*, 269, pp. 676-679.
- HURREL, J.W. y van LOON, H. (1997): Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation, *Climate Change*, 36:301-326. MO, K. C. y HIGGINS, R.W. (1996): Large-scale atmospheric moisture transport as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalyses, *J. Climate*, 9, pp. 1531-1545.
- NEW, M., HULME, M. y JONES, P. (2000): Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate, *J. Climate*, 13, pp. 2217-2238.
- NORTH, G. BELL, T., CAHALAN, R. y MOENG, F. (1982): Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions, *Mon. Wea. Rev.*, 110, pp. 699-706.
- PALUTIKOF, J.P., GOODESS, C.M. y GUO, X. (1994): Climate change, potential evapotranspiration and moisture availability in the Mediterranean basin, *Int. J. Climatol.*, 14, pp. 853-869.
- QUADRELLI, R., PAVAN, V. y MOLTENI, F. (2001): Wintertime variability of Mediterranean precipitation and its links with large-scale circulation anomalies, *Climate Dyn.*, 17, pp. 457-466.
- RODO, X. BAERT, E. y COMIN, F.A. (1997): Variations in seasonal rainfall in Southern Europe during the present century: Relationships with the North Atlantic Oscillation and the El Niño-Southern Oscillation, *Climate Dyn.*, 13, pp. 275-284.
- RODRÍGUEZ-PUEBLA, C., ENCINAS, A.H., NIETO, S. Y GARMENDIA, J. (1998): Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula, *Int. J. Climatol.*, 18, pp. 299-316.
- ROGERS, J.C. (1990): Patterns of low-frequency monthly sea level pressure variability (1899-1986) and associated wave cyclone frequencies, *J. Climate*, 3, pp. 1364-1379.
- ROGERS, J.C. (1997): North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe, *J. Climate*, 10, pp. 1635-1647.
- TRENBERTH, K.E. y GUILLEMOT, C.J. (1995): Evaluation of the global atmospheric moisture budget as seen from analyses, *J. Climate*, 8, pp. 2255-2272.
- TRENBERTH, K.E. y GUILLEMOT, C.J. (1998): Evaluation of the atmospheric moisture and the hydrological cycle in the NCEP reanalysis, *Climate Dyn.*, 14, pp. 213-231.
- TRIGO, I.F., DAVIES, T.D. y BIGG, G.R. (1999): Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region *J. Climate*, 12, pp. 1685-1696.
- ULBRICH, U., CHRISTOPH, M., PINTO, J.G. y CORTE-REAL, J. Dependence of winter precipitation over Portugal on NAO and baroclinic wave activity, *Int. J. Climatol.*, 19, pp. 379-390.
- WALLACE, J.M. y GUTZLER, D.S. (1981): Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter *Mon. Wea. Rev.*, 109, pp. 784-812.