

## PATRONES DE TELECONEXIÓN ENTRE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA A GRAN ESCALA Y PRECIPITACIÓN EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

M<sup>a</sup> Luisa MARTÍN\*, M<sup>a</sup> Yolanda LUNA\*, Francisco VALERO\* y F. GONZÁLEZ-ROUCO\*\*

*\* Dpto. Astrofísica y CC. de la Atmósfera, Facultad de CC. Físicas, Universidad Complutense de Madrid. \*\* Institut für Gewässerphysik, GKSS Forschungszentrum, Max Planck Strasse 1, 21502 Geesthacht, Germany.*

### RESUMEN

Un análisis de descomposición singular ha sido realizado a la matriz de cros covarianza de dos campos para investigar la naturaleza de las interacciones entre la circulación atmosférica a gran escala y la precipitación en la Península Ibérica. Este análisis ha sido aplicado a una base de datos de 30 inviernos consistente en precipitación mensual acumulada en la Península Ibérica y altura geopotencial mensual media en varios niveles atmosféricos sobre la cuenca del Atlántico Norte. El análisis ha dado como resultado 2 pares significativos de patrones de teleconexión que cuentan con más del 86% del total de la covarianza cuadrada entre los dos campos.

El primer patrón de geopotencial, el modo dominante, puede ser identificado con la Oscilación del Atlántico Norte y da cuenta del valor más alto de fracción de covarianza cuadrada en todos los niveles atmosféricos. Este modo muestra una distribución espacial que se mantiene en toda la troposfera.

El segundo modo muestra altos valores de correlación en varios niveles atmosféricos. Este patrón de teleconexión está caracterizado por un dipolo de anomalías de geopotencial orientado SW-NE acoplado con un patrón de precipitación que presenta fuertes anomalías negativas en el norte de la Península Ibérica y anomalías positivas en el sur y el este. Para una mejor interpretación de los patrones resultantes, se ha complementado la información con un análisis de funciones ortogonales empíricas de los campos individuales.

**Palabras clave:** teleconexiones, circulación a gran escala, descomposición en valores singulares, precipitación, Península Ibérica.

### ABSTRACT

*To investigate the nature of the atmosphere circulation interactions with the rainfall at Iberia a singular value decomposition analysis has been performed to a cros covariance matrix of two fields. This analysis has been applied to a 30-winter dataset consisting of both monthly totals of*

*precipitation in Iberia and monthly mean geopotential height at several levels over North Atlantic Ocean. The analysis has yielded two significant pairs of teleconnection patterns that account for more than 86% of the total square covariance between the two fields.*

*The first geopotential pattern, the dominant mode, has been recognised as the North Atlantic Oscillation with the highest value of square covariance fraction at all atmospheric levels. The mode shows a spatial distribution which is kept on the whole troposphere.*

*The second mode shows high correlation values at the several atmospheric levels. These second teleconnection patterns showed a geopotential anomaly dipole SW-NE pattern that is coupled with strong negative precipitation anomalies at N of the Iberian Peninsula and positive ones at southern and eastern areas. To avoid misinterpretations, the information of these teleconnection patterns has been completed by the empirical orthogonal function analysis of the individual fields.*

**Key words:** teleconnections, large-scale circulation, singular value decomposition, precipitation, Iberian Peninsula.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los mecanismos de interacción entre circulación atmosférica a gran escala y precipitación regional han sido objeto de numerosos estudios (NAMIAS, 1983; TING y WANG, 1997). La caracterización de estos mecanismos es de vital importancia ya que ofrecerían una ayuda inestimable a la predicción estacional de la precipitación. El análisis de campos geofísicos puede llevarse a cabo por medio de varias técnicas estadísticas multivariantes. Así, mientras que el análisis de funciones ortogonales empíricas (FOE) ha sido ampliamente utilizado (LORENZ, 1956; DAVIS, 1976; BARNSTON y LIVEZEY, 1987; WALLACE *et al.*, 1990; HOUGHTON y TOURRE, 1992; MONTROY, 1997), el método de descomposición en valores singulares (DVS) se ha comenzado a utilizar en la última década (BRETHERTON *et al.*, 1992; WALLACE *et al.*, 1992; PENG y FYFE, 1996). DVS es una herramienta matemática muy poderosa para determinar las teleconexiones entre dos campos geofísicos. Una ventaja fundamental de los patrones de teleconexiones es que no se necesita formular ninguna suposición acerca de su estructura.

STORCH *et al.*, (1993) y GONZÁLEZ-ROUCO *et al.* (2000) han indicado que la precipitación en la Península Ibérica está influenciada principalmente por las fluctuaciones de la circulación atmosférica en la cuenca del Atlántico Norte. Un análisis DVS realizado recientemente por LUNA *et al.* (2000) ha dado como resultado patrones de teleconexiones entre circulación a gran escala en la topografía de 500 hPa y la precipitación regional en la Península Ibérica. Estos patrones son similares a los encontrados por GONZÁLEZ (1997) mediante un análisis de correlación canónica (ACC) de la presión al nivel del mar y la precipitación en la Península Ibérica.

El objetivo principal de este estudio es investigar las interacciones entre la circulación atmosférica a gran escala y la precipitación en la Península Ibérica, no sólo a nivel de superficie o en la topografía de 500 hPa, sino también analizar la reproducibilidad a través de toda la troposfera de los patrones de teleconexiones obtenidos. Se trata de aislar el mecanismo físico responsable las interacciones detectadas mediante un análisis DVS realizado sobre una base de datos de precipitación

en la Península Ibérica y el campo de anomalías de altura geopotencial a diferentes niveles atmosféricos sobre la cuenca del Atlántico Norte. La información obtenida de los patrones resultantes del análisis *DVS* será complementada con un análisis *FOE* de los campos individuales.

## 2. DESCOMPOSICIÓN EN VALORES SINGULARES

La relación existente entre circulación atmosférica a gran escala y precipitación en la Península Ibérica es analizada por medio de una descomposición en valores singulares (*DVS*). Aquí sólo incluimos una breve descripción del método; una explicación matemática detallada del mismo puede encontrarse en GOLUB y VAN LOAN (1996) y una buena descripción acerca de sus aplicaciones en BRETHERTON *et al.* (1992).

La *DVS* es una poderosa herramienta algebraica para descomponer una matriz arbitraria en matrices ortogonales. La *DVS* puede considerarse como una generalización del método de diagonalización de matrices simétricas para matrices rectangulares, es decir, como una generalización del análisis de funciones ortogonales empíricas (*FOE*). El análisis *DVS* se realiza sobre dos campos geofísicos distintos con el objetivo de identificar modos o patrones que explican la máxima cantidad de covarianza entre ambos campos.

Una *DVS* de la matriz de croskovarianza, **A**, de dos campos, denominados izquierdo y derecho, produce dos conjuntos de patrones ortogonales que describen una fracción de covarianza cuadrada (*FCC*) de 2 series temporales. El análisis *DVS* consiste en la descomposición de **A** ( $m \times n$ ) en un producto de diferentes matrices, es decir

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (1)$$

donde las matrices **U** ( $m \times m$ ) y **V** ( $n \times n$ ) obedecen las siguientes relaciones de ortogonalidad

$$\mathbf{U}\mathbf{U}^T = \mathbf{V}\mathbf{V}^T = \mathbf{I} \quad (2)$$

y la matriz **Σ** está definida como la matriz diagonal formada por números no negativos ordenados en magnitud decreciente denominados valores singulares,  $\sigma_i$ ,  $i=1, \dots, \min(n,m)$ .

Las matrices **U** y **V** están compuestas por los vectores  $u$  y  $v$ , respectivamente, que forman una base ortonormal y pueden ser relacionados mediante su correspondiente valor singular. Estos vectores se denominan vectores singulares izquierdos y derechos, respectivamente, y están ordenados respecto a su valor singular de forma que el primer par de vectores cuenta con el máximo valor de fracción covarianza cuadrada, el segundo par describe una fracción máxima de la covarianza cuadrada no descrita por el primer par, y así sucesivamente (de forma análoga a los autovalores en el análisis *FOE*). Cada valor singular mide la contribución de cada par de vectores o modos a la covarianza cuadrada total. Los vectores derechos e izquierdos pueden ser interpretados como una extensión a dos campos o variables de los resultados de un análisis *FOE* a un único campo.

Si el vector singular  $i$ -ésimo se proyecta sobre cada campo, se obtiene la serie temporal de coeficientes de expansión  $i$ -ésima. La correlación entre los coeficientes de expansión  $i$ -ésimos de los dos campos ofrece una medida de la intensidad de la relación existente entre los pares de modos obtenidos. El patrón de correlación homogéneo para el  $i$ -ésimo vector izquierdo (derecho) es defi-

nido como la correlación lineal entre el campo izquierdo y su  $i$ -ésima serie temporal de coeficientes de expansión. Estos patrones no son ortogonales y no proporciona una relación directa con los modos  $DVS$ . El patrón de correlación heterogéneo para el  $i$ -ésimo vector izquierdo (derecho) es definido como la correlación entre el campo izquierdo y la  $i$ -ésima serie temporal de coeficientes de expansión del campo derecho (izquierdo). Estos patrones sí forman conjuntos ortogonales y ofrecen una relación entre ambos campos, el izquierdo y el derecho.

En este trabajo, el análisis  $DVS$  ha sido aplicado a las matrices de cros-covarianza formadas con las anomalías de altura geopotencial (campo izquierdo) en varios niveles atmosféricos y la precipitación en la Península ibérica (campo derecho). Los datos de precipitación se han obtenido de la base de datos Southwestern Europe Dataset ( $SED$ ) de GONZÁLEZ-ROUCO *et al.* (2001). Esta base de datos contiene observaciones de precipitación mensual acumulada en 92 estaciones que cubren la Península Ibérica, el sur de Francia y norte de Africa. Los datos de altura geopotencial ( $HGT$ ) en diferentes niveles de la atmósfera han sido obtenidos del National Centre for Atmospheric Research ( $NCAR$ ). El dominio espacial abarca el Atlántico Norte, el mar Mediterráneo y Europa desde  $20^\circ$  a  $85^\circ N$  de latitud, y desde  $100^\circ W$  a  $40^\circ E$  de longitud. Desde  $20^\circ N$  al ecuador, los datos de geopotencial no fueron utilizados debido a las muchas lagunas existentes. Los datos  $HGT$  son medias mensuales sobre una rejilla de  $5^\circ \times 5^\circ$  latitud-longitud; ambos conjuntos de datos abarcan un periodo de 30 inviernos (diciembre-enero-febrero) para el periodo 1960-1989. Para realizar los cálculos de  $DVS$ , se obtuvieron anomalías estandarizadas de ambos campos.

### 3. RESULTADOS

Los resultados para el nivel de 500 hPa han sido descritos por LUNA *et al.* (2000) y VALERO *et al.* (2000). Estos autores mostraban que la precipitación en la Península Ibérica esta principalmente influenciada por la circulación atmosférica en el Atlántico Norte al nivel de 500 hPa. El análisis  $DVS$  de los campos  $HGT-SED$  ha dado como resultado dos modos significativos de acoplamiento entre circulación atmosférica a gran escala en varios niveles y precipitación (Tabla 1). En todos los niveles atmosféricos considerados, los dos primeros modos dan cuenta de más del 86% de la covarianza cuadrada total. El primer patrón heterogéneo izquierdo correspondiente al campo  $HGT$ , no mostrado en este trabajo pero muy similar en todos niveles al obtenido por dichos autores en 500 hPa, puede identificarse con la Oscilación del Atlántico Norte. En la Tabla 1 puede

Tabla 1: FRACCION DE COVARIANZA CUADRADA,  $FCC$ , Y COEFICIENTE DE CORRELACION,  $r$ , PARA LOS TRES PRIMEROS MODOS DEL ANALISIS  $DVS$  ENTRE LOS CAMPOS  $HGT$  Y  $SED$

$k$	850 hPa		700 hPa		500 hPa		300 hPa	
	$SCF$	$r$	$SCF$	$r$	$SCF$	$r$	$SCF$	$r$
1	80	0.72	73	0.70	73	0.72	76	0.78
2	11	0.76	14	0.66	13	0.77	13	0.78

observarse que este primer patrón es el modo dominante ya que da cuenta del máximo valor de *FCC* en todos los niveles. La distribución espacial de este modo se mantiene a través de toda la troposfera y relaciona anomalías negativas de *HGT* en el Atlántico con anomalías positivas de precipitación sobre gran parte de la península debido a advección de aire húmedo del oeste. Se han encontrado valores significativos de correlación entre la serie temporal del índice de la oscilación del Atlántico Norte, definido como la diferencia de presión a nivel del mar entre Azores e Islandia, y las series de coeficientes de expansión del primer modo de los campos *HGT* y *SED* ( $r = 0.63$  y  $r = 0.49$ , respectivamente).

El segundo modo muestra valores más altos de correlación que el primero aún explicando menor cantidad de *FCC*. Como el primer modo ha sido ampliamente descrito por los autores anteriormente mencionados y se mantiene a lo largo de toda la troposfera, en este trabajo vamos a presentar en mayor detalle los resultados correspondientes a los patrones de correlación heterogéneos del segundo modo en todos los niveles atmosféricos. El segundo patrón heterogéneo de correlación en 850 hPa muestra una distribución espacial de *HGT* acoplada a una de precipitación con una correlación que varía de nivel a nivel desde 66% a 78% y explican una cantidad de *FCC* variando desde 11% a 14%. Estos patrones de teleconexiones están caracterizados por un dipolo de anomalías de geopotencial orientado SW-NE (Fig. 1a), con valores positivos centrados al N de Europa y negativos situados al SW de la Península, asociado a anomalías negativas de precipitación al N de la Península Ibérica y positivas en el S y SE (Fig. 1b). Este patrón de anomalías de geopotencial promueve y refuerza advección de aire cálido y húmedo sobre estas zonas de la Península. Estos resultados parecen ser muy razonables, ya que la presencia de bajas presiones al SW peninsular implica advección cálida y húmeda sobre las costas S y SE desarrollándose sistemas de precipitación en estas zonas. Este patrón de geopotencial fue identificado por VALERO *et al.* (1997) como una situación meteorológica a gran escala que controla la ocurrencia de precipitación en el SE de la Península Ibérica. GONZÁLEZ (1997) encontró una distribución bastante similar utilizando campos de presión al nivel del mar y los datos de precipitación *SED* y un análisis *CCA*.

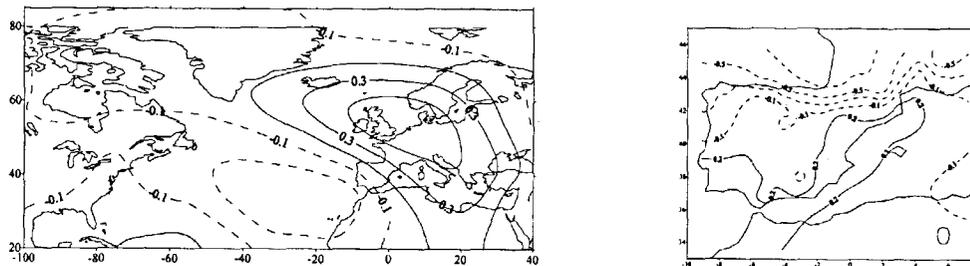


Figura 1: Patrones heterogéneos de correlación en 850 hPa para el segundo modo acoplado: (izquierda) geopotencial, *HGT*; (derecha) precipitación, *SED*. Valores positivos (negativos) están indicados por líneas continuas (discontinuas).

En las Figuras 2-4 pueden observarse los patrones de geopotencial y precipitación resultantes del segundo modo *DVS* para los restantes niveles, 700, 500 y 300 hPa. Los patrones son muy simila-

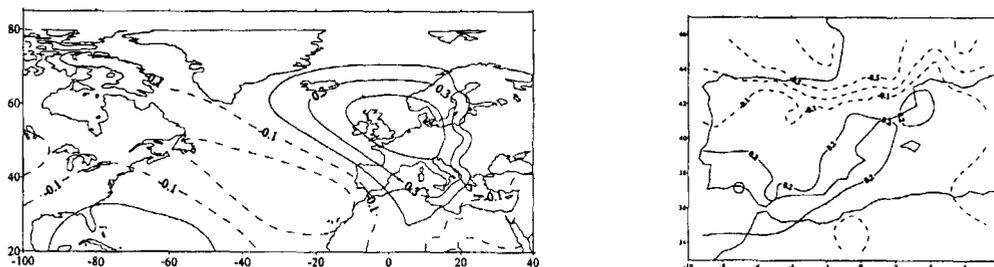


Figura 2: *Idem* a Fig. 1 excepto para 700 hPa.

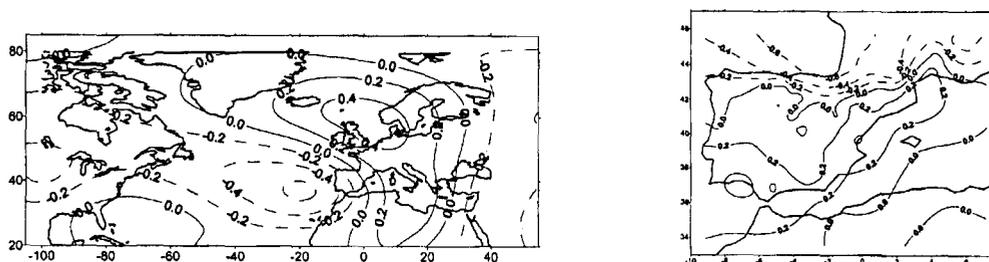


Figura 3: *Idem* a Fig. 1 excepto para 500 hPa.

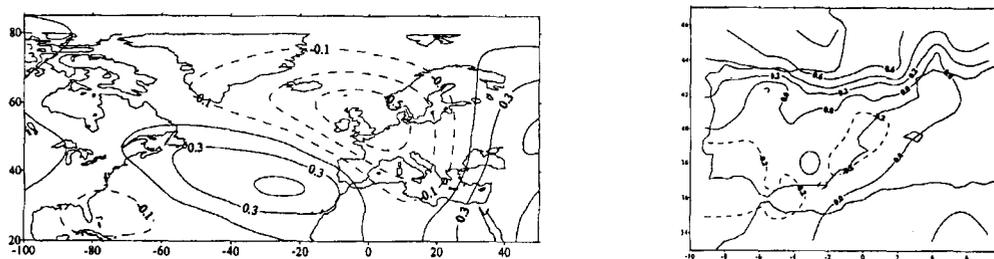


Figura 4: *Idem* a Fig. 1 excepto para 300 hPa.

res a los encontrados para 850 hPa, denotando la fuerza de la teleconexión encontrada entre la circulación a gran escala y la precipitación peninsular ya que el patrón se mantiene en toda la troposfera con valores similares de correlación, incluso en 300 hPa.

Para validar la significancia estadística de las teleconexiones encontradas, se evaluó la reproducibilidad de los patrones repitiendo el análisis con diferentes subconjuntos de los datos originales.

El análisis *DVS* se realizó en dos subconjuntos de datos formados por los años pares e impares y los patrones de teleconexiones obtenidos coinciden razonablemente con los mostrados.

Una medida de la importancia relativa de un patrón puede obtenerse realizando un análisis *FOE*. La información obtenida de *FOE* y *DVS* es complementaria y es de gran utilidad para evaluar la coherencia de los patrones obtenidos, por lo que ambos métodos deben utilizarse conjuntamente. En el análisis *FOE* de los campos *HGT* en varios niveles y *SED* en la Península Ibérica se pueden detectar tres patrones más significativos. En la Figura 5 mostramos la segunda *FOE* de ambos

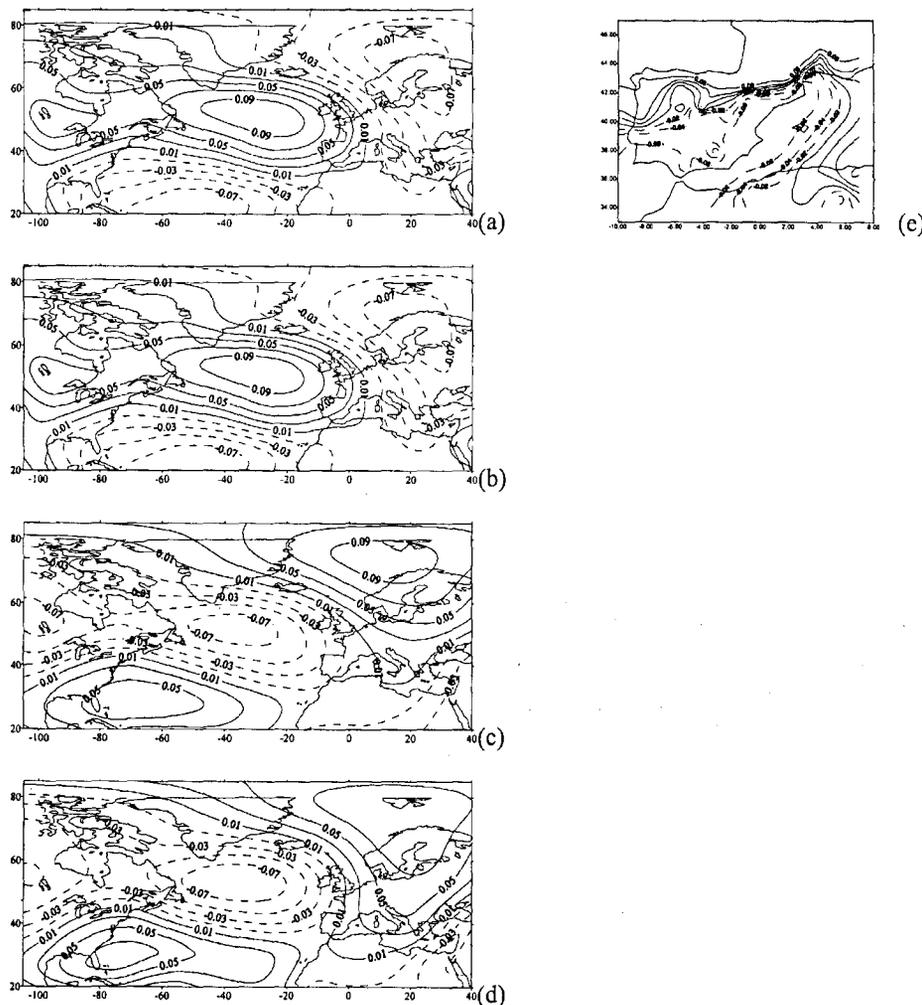


Figura 5: Segunda *FOE* para: (a)-(d) altura geopotencial en 850, 700, 500 y 300 hPa; (e) precipitación. La fracción de varianza para los modos del geopotencial varía desde un 13 a un 15%, y para el modo de precipitación es 13%.

campos en los diferentes niveles atmosféricos. La proporción de varianza explicada por cada una de ellas está indicada en el pie de figura. Se puede observar en la Figura 5, al igual que en el segundo modo del análisis *DVS*, una estructura dipolar en el patrón de geopotencial con valores positivos (negativos) en las proximidades de Islandia y valores negativos (positivos) al oeste peninsular, mientras que en el patrón de precipitación se detectan fuertes valores positivos al norte de la Península y negativos al sur y este (Fig. 5e). La segunda *FOE* del campo *HGT* no corresponde exactamente con el segundo modo *DVS* mientras que el de precipitación si es bastante similar al segundo modo *DVS*. El análisis *FOE* se realiza sobre campos individuales, mientras que el *DVS* asila patrones de variabilidad conjunta, por lo que el orden no tiene porque mantenerse. Así, en este caso ocurre que la tercera *FOE* del campo *HGT* (no mostrada) si es bastante similar al segundo modo *DVS*, pudiendo decirse que el análisis de descomposición en valores singulares establece que existe covariabilidad entre el segundo patrón *FOE* de precipitación y el tercero de geopotencial. Además, las dos series de coeficientes de expansión de este segundo modo *DVS* presentan la máxima correlación.

Al igual que con el análisis *DVS*, las *FOE* se repitieron para diferentes subconjuntos de los datos originales, concretamente para los años pares e impares, y los resultados eran prácticamente los mismos, confirmando la robustez de los patrones obtenidos.

#### 4. CONCLUSIONES

La interacción entre la circulación a gran escala y la precipitación en la Península Ibérica es investigada mediante el análisis *DVS* aplicado a datos precipitación y altura geopotencial sobre el Atlántico Norte en varios niveles atmosféricos de 30 inviernos. La información obtenida de los modos resultantes del método *DVS* ha sido complementada con un análisis de las *FOE* de los campos individuales. Los patrones obtenidos por ambos métodos exhiben características comunes, por lo que los modos *DVS* se pueden considerar significativos y representativos de interacciones físicamente reales entre la circulación atmosférica y la precipitación en la Península Ibérica.

Los dos patrones más significativos detectados mediante *DVS* involucran fuertes acoplamientos entre la precipitación y la circulación a gran escala y dan cuenta de una gran proporción de variabilidad conjunta de los dos campos (más del 86% de la *FCC*). El primer modo de geopotencial corresponde al patrón atmosférico más importante en la zona del Atlántico Norte. En él se observa flujo zonal del oeste sobre la península que induce advección de aire marítimo sobre la franja occidental de la Península Ibérica. Esta situación está caracterizada por valores negativos del índice *NAO*. De esta forma, anomalías positivas (negativas) de precipitación en el centro y sur de la península están asociadas con anomalías negativas (positivas) de geopotencial sobre el NE del Océano Atlántico.

El resto del área peninsular está afectada por otros sistemas de circulación a gran escala como el que puede observarse en el segundo modo *DVS*. Situaciones con anomalías negativas de geopotencial en el Atlántico al suroeste peninsular producen advección de aire cálido y húmedo sobre el sur y este peninsular, provocando la formación de sistemas de precipitación sobre estas áreas. Este segundo modo presenta máxima correlación aunque explica menor cantidad de *FCC*. Esto quiere

decir que aunque es menos frecuente que el primero, la relación entre anomalías de geopotencial en el Atlántico Norte y de precipitación en la Península Ibérica es más fuerte en el segundo modo que en el primero.

Con el análisis *DVS* se han identificado patrones de teleconexiones entre la circulación atmosférica a gran escala en la cuenca del Atlántico Norte y la precipitación en la Península Ibérica que son dominantes en la estación invernal, en la que se produce la mayor parte de la precipitación peninsular.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar las gracias al Data Support Section del NCAR por proporcionarles los datos de geopotencial. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de investigación REN2000-0786/CLI.

## 6. REFERENCIAS

- BARNSTON, A. G. y R. E. LIVEZEY (1987): "Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns". *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1083-1126.
- BRETHERTON, C. S., C. SMITH y J. M. WALLACE (1992): "An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data". *J. Climate*, 5, 541-560.
- DAVIS, R. (1976): "Predictability of sea surface temperature and sea-level pressure anomalies over the Northern Hemisphere". *J. Phys. Oceanogr.*, 6, 249-266.
- GOLUB, G. H. y C. F. VAN LOAN (1996): "*Matrix computations*". 3<sup>rd</sup> Edition, Johns Hopkins University Press, 694 pp.
- GONZÁLEZ, J.F. (1997): "*Modelo de predicción de la precipitación peninsular en climas perturbados*". Tesis Doctoral. UCM. 237pp.
- GONZÁLEZ-ROUCO, J.F., H. HEYEN, E. ZORITA y F. VALERO (2000a): "Agreement between observed rainfall trends and climate change simulations in the Southwest of Europe". *J. Climate*, 13, 3057-3065.
- GONZÁLEZ-ROUCO, J.F., J.L. JIMÉNEZ, V. QUESADA y F. VALERO (2001): "Quality control of monthly precipitation data in the Southwest of Europe". *J. Climate*, 14, 964-978.
- HOUGHTON, R. W. y Y. M. TOURRE (1992): "Characteristics of low-frequency sea surface temperature fluctuations in the tropical Atlantic". *J. Climate*, 5, 765-771.
- LORENZ, E. (1956): "*Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction*". Sci. Rept. no. 1, Statistical forecasting Project, Dept. of Meteor., MIT, Cambridge, Mass.
- LUNA, M.Y., M.L. MARTIN, F. VALERO y F. GONZALEZ (2000): "Wintertime Iberian Peninsula precipitation variability and its relation to North Atlantic atmospheric circulation" En "*Detect*

*ting and Modelling Regional Climate Change and Associated Impacts*", M. Brunet y D. López (Eds.), Springer-Verlag (en prensa).

MONTROY, D. L. (1997): "Linear relation of central and eastern North American precipitation to tropical Pacific sea surface temperature anomalies". *J. Climate*, 10, 541-558.

NAMIAS, J. (1983): "Some causes of United States drought". *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 30-39.

PENG, S. y J. FYFE (1996): "The coupled patterns between sea level pressure and sea surface temperature in the midlatitude North Atlantic". *J. Climate*, 9, 1824-1839.

STORCH, H. VON, E. ZORITA y U. CUBASCH (1993): "Downscaling of global climate estimates to regional scales: an application to the Iberian rainfall in wintertime". *J. Climate*, 6, 1161-1171.

TING, M. y H. WANG (1997): "Summertime U.S. precipitation variability and its relation to sea surface temperature". *J. Climate*, 10, 1853-1873.

VALERO, F., M.Y. LUNA y M.L. MARTIN (1997): "An overview of a heavy rain event in southeastern Iberia: the role of large-scale meteorological conditions". *Ann. Geophysicae*, 15, 494-502.

VALERO, F., M.L. MARTIN, M. Y. LUNA y F. GONZALEZ (2000): "Coupled variability between large-scale circulation and precipitation in the Iberian Peninsula". *3rd European Conference on Applied Climatology*. Italy.

WALLACE, J. M., C. SMITH y Q. JIANG (1990): "Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the northern winter". *J. Climate*, 3, 990-998.

WALLACE, J. M., C. SMITH y C. S. BRETHERTON (1992): "Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies". *J. Climate*, 5, 561-576.