

# REGIONALIZACIÓN DEL CAMPO DE VIENTO EN SUPERFICIE EN TERRENO COMPLEJO.

Pedro A. Jiménez<sup>(1)</sup>, J. Fidel González-Rouco<sup>(2)</sup>, Juan P. Montávez<sup>(3)</sup>,  
Jorge Navarro<sup>(1)</sup>, Francisco Valero<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> DER-CIEMAT Avd. Complutense 22, 28040 Madrid ([pa.jimenez@ciemat.es](mailto:pa.jimenez@ciemat.es),  
[jorge.navarro@ciemat.es](mailto:jorge.navarro@ciemat.es))

<sup>(2)</sup> MCAM Universidad Complutense de Madrid ([fidelgr@fis.ucm.es](mailto:fidelgr@fis.ucm.es), [valero@fis.ucm.es](mailto:valero@fis.ucm.es)).

<sup>(3)</sup> Dpt. de Física. Universidad de Murcia ([montavez@um.es](mailto:montavez@um.es)).

## 1.- Introducción

Entender y predecir la variabilidad regional del viento es de gran importancia para una gran variedad de fenómenos tales como la dispersión y el transporte de contaminantes en una región, la toma de decisiones que conlleva la extinción de los incendios forestales, o la predicción de la potencia generada por los parques eólicos necesaria para establecer políticas energéticas nacionales.

Las circulaciones en la atmósfera libre están controladas por los gradientes de presión generados por los grandes sistemas de presión. Conforme la altitud decrece, la topografía gana importancia generando forzamientos dinámicos que producen importantes modificaciones en la dirección e intensidad de los vientos generales debido a canalizaciones, ascensos forzados, efectos de barrera... (Whiteman, 2000). Además, existen forzamientos térmicos asociados a calentamientos diferenciales de la superficie que generan circulaciones locales (Blumen, 1990). El forzamiento dinámico depende de los flujos sinópticos mientras que el forzamiento térmico depende de las diferencias de temperatura que se establecen a lo largo de los ejes de los valles o de los ejes de los sistemas plano-montaña (Whiteman, 2000).

La variabilidad del viento es por lo tanto más complicada en zonas de terreno complejo donde el forzamiento térmico, el dinámico y sus interacciones generan una gran variedad de patrones de circulación (McGowan y Sturman, 1996). Whiteman y Doran (1993) estudiaron la relación entre las circulaciones sinópticas y el flujo en un valle sugiriendo que el forzamiento térmico es importante cuando los vientos sobre el valle son débiles y por lo tanto con débiles forzamientos dinámicos. Como las circulaciones generadas por forzamientos dinámicos están controladas por los movimientos sinópticos y las circulaciones generadas por forzamientos térmicos son importantes cuando estos movimientos son débiles, los movimientos a escala sinóptica controlan directa o indirectamente las circulaciones en superficie. Su frecuencia típica de variación de

pocos días hace adecuado el estudio de la variabilidad diaria del viento en superficie.

Las complicadas circulaciones en las regiones de terreno complejo pueden entenderse mejor dividiendo el área de estudio en subregiones que presenten un comportamiento similar del viento, es decir, realizando una regionalización del campo de viento. Una estrategia empleada para obtener áreas de distinto comportamiento regional son las técnicas basadas en autovectores. Estas técnicas han sido aplicadas con éxito en la determinación de subregiones para diversas variables meteorológicas (White et al., 1991; Fovell and Fovell, 1993). Sin embargo, muy pocos trabajos se han centrado en la regionalización de variables relacionadas con el viento (Cheng, 1998).

En el presente estudio se ha empleado una metodología basada en la rotación de las componentes principales para realizar la regionalización del campo de viento en superficie. Dicha técnica ha sido aplicada a las medias diarias del viento de 35 estaciones meteorológicas distribuidas en una región de terreno complejo como es la Comunidad Foral de Navarra (CFN).

## 2.- Datos

Las 35 estaciones con mayor disponibilidad de medidas de viento de la red de la CFN fueron seleccionadas (Fig. 1). Las observaciones cubren el periodo 1 de Enero de 1992 a 30 de Septiembre de 2002. Algunas estaciones fueron instaladas con posterioridad a 1992 y por lo tanto tienen menos observaciones disponibles. Para evitar posibles efectos adversos en la regionalización debido a la falta de datos, se seleccionaron los días con más del 80 % de las observaciones disponibles (i. e. medidas en más de 28 estaciones). Los días así seleccionados (947) son más frecuentes en los meses de verano y esto da más peso a las circulaciones predominantes en ese periodo. Para evitar este efecto no deseado se creó una distribución más homogénea imponiendo un límite superior al número de días en cada mes. Esto se consiguió seleccionando los 65 días con mejor calidad de información de cada mes con la única excepción de Febrero, que sólo disponía de 54

días. Por lo tanto, un total de 769 campos diarios de viento fueron empleados para la regionalización.

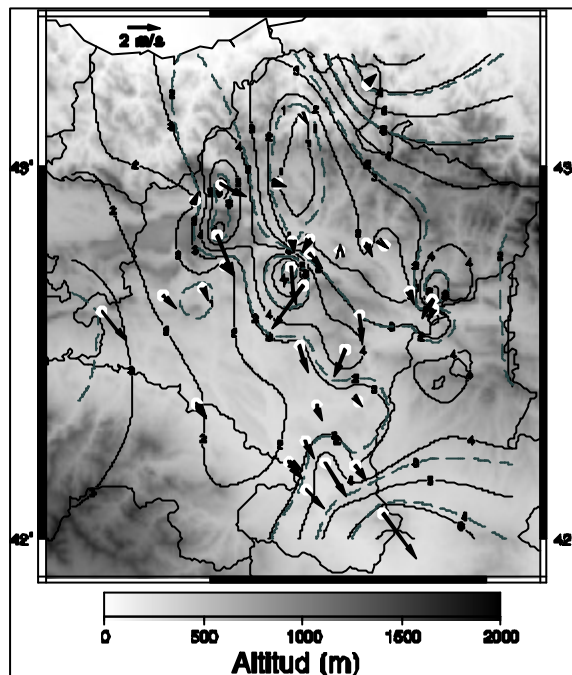


Fig. 1.- Topografía (sombreado) y localización de las estaciones (círculos). Así como el campo medio del módulo del viento (líneas continuas), su desviación típica (líneas discontinuas) y componentes zonal y meridiana medias (vectores) de los campos de viento diarios seleccionados.

### 3.- Metodología

La regionalización se llevó a cabo realizando un análisis de componentes principales (ACP) en modo S (Richman, 1986) a la matriz de correlaciones. Debido a la naturaleza vectorial del viento, el ACP es aplicado en su forma vectorial (von Storch y Zwiers, 1999). La regionalización se consigue rotando los autovectores de los modos principales seleccionados. El propósito de la rotación es conseguir 'estructuras simples' (Richman, 1986) en las que las variables estén tan cerca como sea posible de los hiperplanos de al menos un modo principal. Con estructuras simples los pesos de cada modo principal pesan una subregión diferente y la regionalización se alcanza definiendo un valor crítico. Cada subregión estará formada por las estaciones cuyos pesos sean superiores a ese valor crítico. Como el ACP se ha realizado en su forma vectorial, los pesos son vectores y el valor crítico se define para el módulo de dichos vectores.

Las rotaciones pueden ser ortogonales u oblicuas. Las técnicas de rotación VARIMAX (ortogonal) y OBLIMIN (oblicua) fueron aplicadas encontrándose pocas diferencias en los resultados para este estudio particular. La primera de ellas fue finalmente seleccionada por mantener la importante propiedad

de la ortogonalidad de los autovectores tras la rotación.

Este método de regionalización define subregiones que pueden solaparse unas con otras dotando de cierta flexibilidad a la definición de las mismas. Por otro lado, el hecho de asignar un modo principal a cada subregión permite examinar la variabilidad temporal del viento en cada subregión analizando el espectro de su componente principal.

### 4.- Resultados

Las medias y desviaciones típicas de los campos de viento seleccionados para la regionalización (ver sección 2) fueron examinados en una inspección preliminar de la variabilidad del viento sobre la zona (Fig. 1). Puede apreciarse que un promedio mayor de velocidad conlleva mayor desviación debido a la distribución positiva del módulo del viento. Las estaciones de montaña y algunas del valle del Ebro son los emplazamientos con mayor velocidad media.

Los vectores medios del viento calculados a partir de la media de la componente zonal y meridiana están representados en la Figura 1. El flujo medio es del Noroeste y se observa que se canaliza desde las regiones del Norte hacia el valle del Ebro por los pasos existentes en las cadenas montañosas.

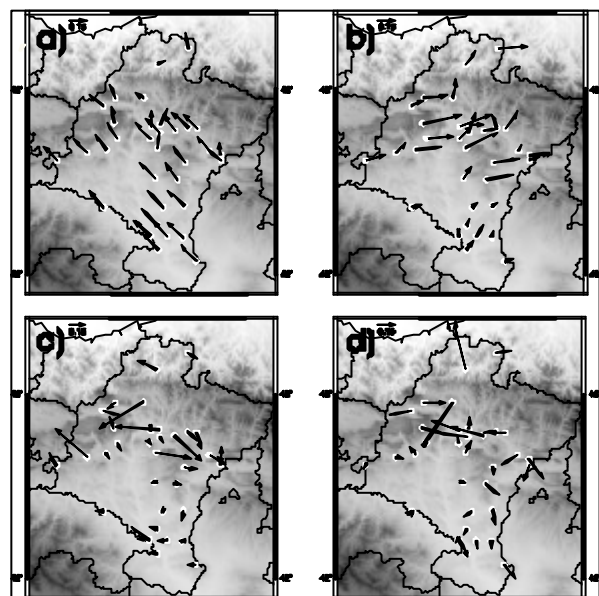


Fig. 2.- Autovectores de los primeros cuatro modos principales. El primer modo principal (a) explica el 66.8 % de la varianza, el segundo (b) el 8.6 %, el tercero (c) el 3.4 % y el cuarto (d) el 2.9 %.

Tras aplicar el ACP, los autovectores de los cuatro primeros modos principales que explican un 81.7 % de la varianza fueron retenidos (Fig. 2). El primer modo explica aproximadamente dos tercios de la varianza (66.8 %) y está bien organizado (Fig 2a): los vectores están alineados a lo largo de los ejes de

los valles mostrando que el proceso dominante es la canalización topográfica y, observándose cierto desacoplamiento con las estaciones de montaña. El segundo modo principal explica un 8.6 % de la varianza y presenta en su fase positiva (negativa) fuertes flujos del Oeste (Este) en las estaciones de montaña y flujos débiles del Suroeste (Noreste) en el resto (Fig. 2b). Físicamente puede ser interpretado como la influencia de los flujos a escala sinóptica que son del Oeste en estas latitudes y afectan más a los emplazamientos más elevados. El tercer modo principal explica el 3.4 % de la varianza (Fig. 2c). Muestra actividad en el centro de la región con direcciones zonales del flujo pero con diferentes sentidos en los distintos emplazamientos. El cuarto modo principal explica el 2.9 % de la varianza y muestra consistencia en pocas estaciones (Fig. 2d).

Como fue mencionado anteriormente, la regionalización se consigue rotando los autovectores de los modos principales seleccionados (Fig. 2) con el propósito de formar estructura simple en la que las variables estén tan cerca como sea posible del hiperplano de al menos un modo principal. El grado de estructura simple alcanzado tras la rotación puede ser evaluado representando los pesos de un modo principal frente a los pesos de otro modo principal. Los pesos antes de la rotación no muestran preferencia por ningún hiperplano estando distribuidos alrededor del origen (Fig. 3a y b). Sin embargo, los pesos después de la rotación mediante la técnica VARIMAX se distribuyen razonablemente bien a lo largo de los hiperplanos formando estructuras simples (Fig. 3b y d).

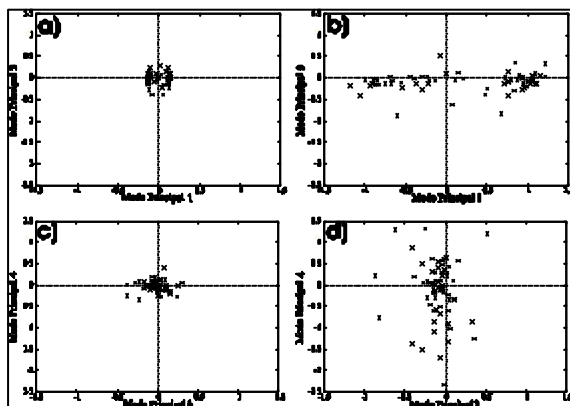


Fig. 3.- Ejemplos seleccionados de los pesos de un autovector frente a los de otro antes (a y c) y después (b y d) de la rotación VARIMAX.

Los autovectores de los cuatro modos principales después de la rotación están representados en la Figura 4. El primer modo principal rotado (Fig. 4a) presenta un patrón similar a su correspondiente modo antes de la rotación (Fig. 2a) mostrando en la fase positiva (negativa) canalización del SE al NW (NW a SE) a lo largo del valle del Ebro. El segundo modo principal rotado (Fig. 4b) es también similar a

su correspondiente modo antes de la rotación (Fig. 2b) pero con los vectores más alineados hacia el Este (Oeste) en los emplazamientos de montaña y con pesos más débiles en los valles. El tercer modo principal rotado (Fig. 4c) presenta orientación meridiana de los vectores hacia el Sur (Norte) en áreas orientales de la CFN, y orientación zonal hacia el Oeste (Este) en áreas occidentales. El cuarto modo principal rotado muestra canalización del flujo en los valles del Norte con pesos débiles en las estaciones de montaña y del valle del Ebro (Fig. 4d).

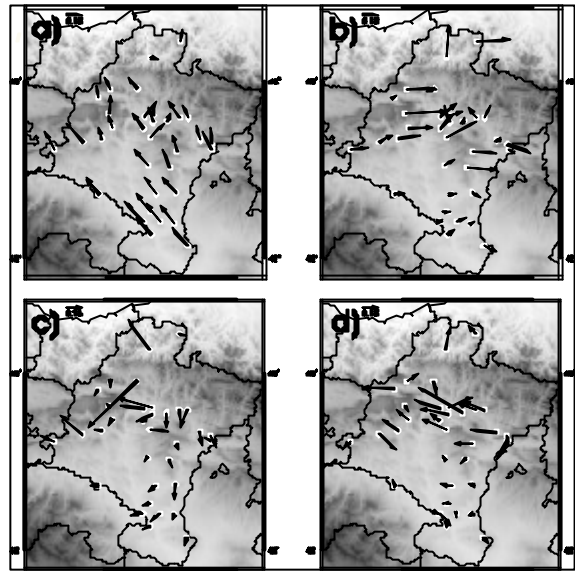


Fig. 4.- Autovectores de los cuatro primeros modos principales después de la rotación VARIMAX.

El valor crítico que define las regiones debe seleccionarse cuidadosamente para evitar que las regiones solapen en exceso o que las estaciones queden sin agrupar como puede comprobarse en la Figura 4. Varios valores críticos fueron ensayados y finalmente se optó por un valor crítico del módulo de 0.175 para definir las subregiones (Fig. 5). La primera subregión corresponde al valle del Ebro (círculos en Fig. 5), la segunda está formada básicamente por las estaciones de montaña (cuadrados en Fig. 5), la tercera son una serie de estaciones con alineación Norte-Sur en el centro de la CFN (rombos en la Fig. 5) y la cuarta son fundamentalmente estaciones emplazadas en los valles al Norte del valle del Ebro (triángulos en la Fig. 5). No obstante, hay dos estaciones que no fueron asignadas a ninguna subregión (cruces en la Fig. 5). La primera está en las montañas del centro de la CFN y presenta pesos importantes en la subregión del valle del Ebro y en la subregión de montaña, y la segunda se encuentra en los valles al Norte del valle del Ebro y tiene pesos elevados en dicha subregión y en la del valle del Ebro.

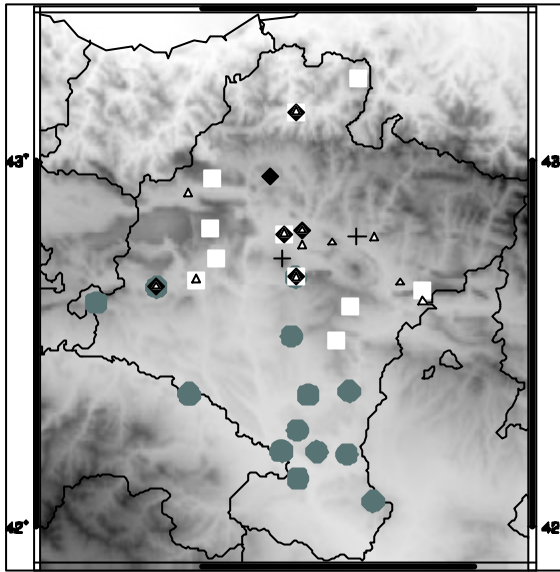


Fig. 5.- Regionalización obtenida del campo de viento obtenida: 1) valle del Ebro (círculos), 2) estaciones de montaña (cuadrados), 3) grupo central con alineación Norte-Sur (rombos) y 4) valles del Norte (triángulos). Las cruces corresponden a las estaciones sin clasificar.

Las componentes principales así como las componentes meridiana y zonal medias de cada subregión están representadas en la Figura 6. La variabilidad de las componentes principales están en concordancia con la variabilidad de las componentes zonales o meridianas (o ambas) de las subregiones. La variabilidad de la componente meridiana del viento es similar en todas las subregiones (línea punteada en Fig. 6) mientras que la variabilidad zonal es la que marca las diferencias entre las distintas subregiones (línea discontinua en Fig. 6).

El análisis espectral de las componentes principales de las distintas subregiones proporciona un análisis complementario de la variabilidad temporal del viento en cada subregión. Todas las subregiones muestran importantes bandas espectrales a bajas frecuencias que no llegan a ser significativas posiblemente debido al empleo de sólo 769 días (Fig. 7). Estas bandas acumulan la mayor parte de la varianza excepto en la primera subregión, el valle del Ebro, que muestra el máximo sobre un periodo de 2.7 meses. La cuarta subregión, valles del Norte, muestra similar comportamiento que el valle del Ebro pero no tiene picos significativos a altas frecuencias y muestra más actividad a bajas frecuencias. La segunda subregión, la de montaña, es la que presenta mayor variabilidad anual si bien no muestra notable actividad a bajas frecuencias. La tercera subregión, estaciones con alineación Norte-Sur en el centro de la CFN, es la que más variabilidad del viento presenta con una importante banda a bajas frecuencias así como otras a altas frecuencias.

Para un análisis más completo de la variabilidad a bajas frecuencias, las anomalías estandarizadas de las series diarias del viento se proyectaron sobre los autovectores de cada subregión con el fin de obtener series temporales más largas que la de las componentes principales rotadas (769 días). Dichas proyecciones se realizaron sobre aquellos días con más del 50 % de las medidas disponibles, con lo que un total de 2169 días fueron proyectados. Estas proyecciones fueron estandarizadas para tener el mismo comportamiento que las componentes principales rotadas; por lo tanto, para cada subregión, ambas series temporales son muy parecidas en las partes de solapamiento pero, las proyecciones son mucho más largas permitiendo un mejor análisis a bajas frecuencias. Sus espectros están representados en la Figura 8. Son muy similares a los de las componentes principales rotadas (Fig. 7), pero con una banda significativa anual siendo la más acusada la de la subregión de montaña. Esto confirma la significación de las bandas anuales que no lo eran en el caso de las componentes principales rotadas porque sus series temporales no eran lo suficientemente largas.

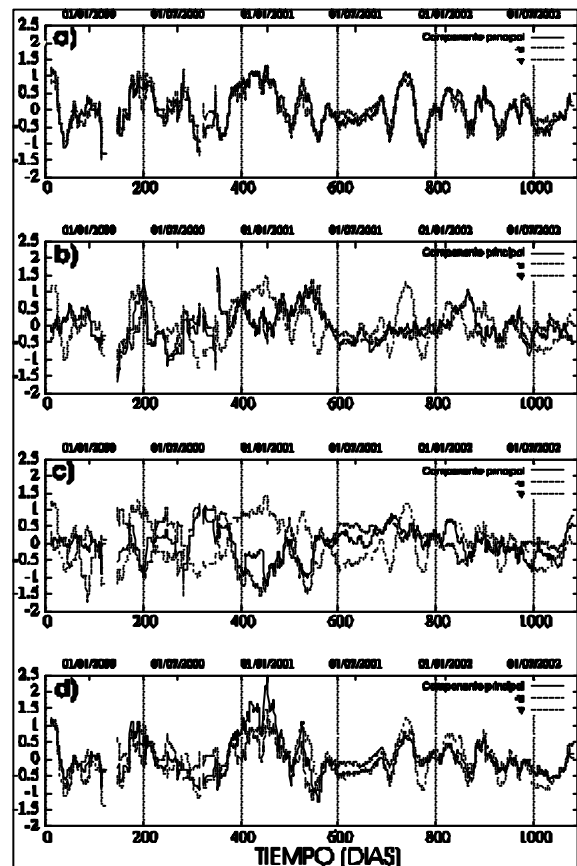


Fig. 6.- Media móvil de 20 días de las componentes principales (línea continua) y las correspondientes componentes, zonal (línea discontinua) y meridiana (línea punteada), medias estandarizadas del viento en cada subregión definidas en la Figura 5: a) valle del Ebro, b) estaciones de montaña, c) estaciones con alineación Norte-Sur y d) valles del Norte.



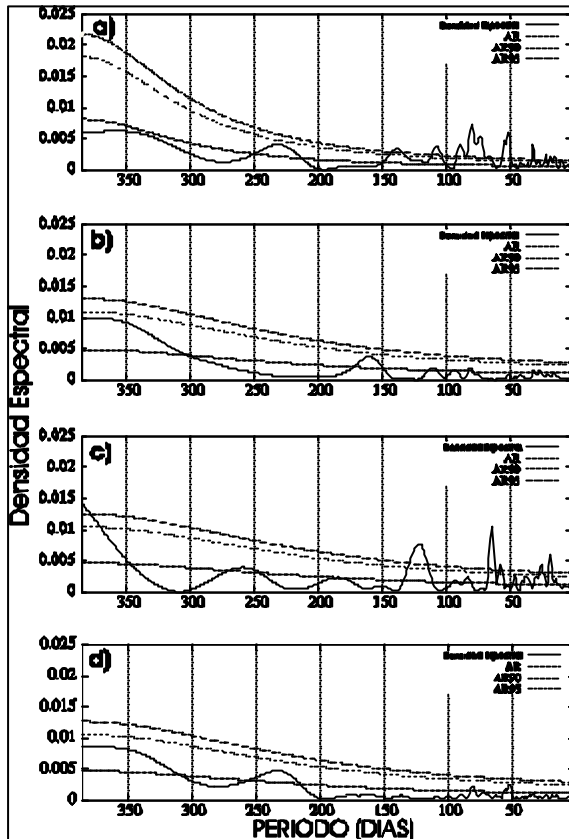


Fig. 7.- Espectros de las cuatro componentes principales después de la rotación VARIMAX (líneas continuas), sus correspondientes espectros de los procesos autoregresivos de orden uno (líneas rayadas) y los intervalos de confianza al 90 % (línea punteada) y al 95 % (línea de puntos y rayas). Los espectros representan la variabilidad del viento en cada región: a) valle del Ebro, b) estaciones de montaña, c) estaciones con alineación Norte-Sur y d) valles del Norte.

#### 4.- Conclusiones

La variabilidad del viento en una región de terreno complejo ha sido analizada. Una metodología basada en la rotación de los modos principales del ACP ha sido empleada para regionalizar el campo de viento en superficie sobre la CFN. De acuerdo a esta metodología cuatro subregiones han sido definidas (Fig. 5). Un mayor número de estaciones o una mayor longitud de las series observacionales permitirían clasificar más subregiones caracterizando mejor el viento sobre la CFN.

La variabilidad de la componente meridiana del viento es similar en toda la CFN siendo la variabilidad de la componente zonal la que permite distinguir la variabilidad del viento entre las subregiones. Esto podría sugerir que una regionalización basada en la componente zonal bastaría para caracterizar el viento sobre la CFN pero, de ser así, se perdería la información de las circulaciones sobre la zona (e. g. canalizaciones a lo largo de los valles). El espectro del viento en cada

subregión revela un marcado ciclo anual en todas ellas. Las subregiones de valle tienden a presentar mayor actividad a altas frecuencias que la subregión de montaña que, por el contrario, presenta la mayor banda anual.

La regionalización conseguida es útil en estudios mesoscalares en la región. Por ejemplo, las simulaciones-predicciones realizadas con modelos mesoscalares pueden ser evaluadas en cada subregión y no por emplazamientos, lo que permite una validación más exacta y, por lo tanto, una mejor comprensión de los procesos físicos asociados a las circulaciones en la zona.

*Agradecimientos.* Los autores quieren agradecer a la sección de Evaluación de Recursos Agrarios del Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra la cesión desinteresada de los datos observacionales empleados en este estudio. Así como a la Dra. Marisa Montoya por sus importantes comentarios, discusiones, ayudas y sugerencias y, al Dr. Manuel Cornide la cesión del programa empleado en el cálculo de densidades espectrales.

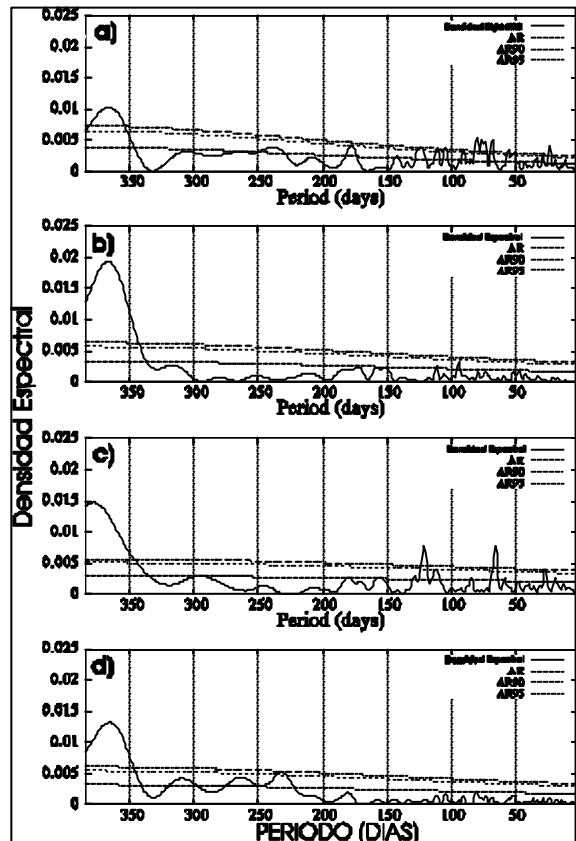


Fig. 8.- Idem que la Figura 7 pero para las proyecciones estandarizadas de los campos de viento diarios (con más del 50 % de las observaciones disponibles) sobre los autovectores rotados.

## Referencias:

Cheng, E. D., Macroscopic extreme wind regionalization, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, 77&78, 13-21, 1998.

Blumen, W., ed., *Atmospheric Processes Over Complex Terrain*, Meteor. Monogr., 45, 1990.

Fovell, R. G. and Fovell, M. C., Climate Zones on the Conterminous United States Defined Using Cluster Analysis, *J. Climatol.*, 6, 2103-2135, 1993.

McGowan, H. A., and Sturman, A. P., Interacting multi-scale wind systems within an alpine basin, Lake Tekapo, New Zealand, *Meteor. Atmos. Phys.*, 58, 165-177, 1996.

Richman, M. B., Rotation of principal components, *J. Climatol.*, 6, 293-335, 1986.

von Storch, H. and Zwiers, F., *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press., 1999.

White, D., Richman, M., and Yarnal, B., Climate regionalization and rotation of principal components, *Int. Journal of Climatol.*, 11, 1-25, 1991.

Whiteman, C. D., *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*, Oxford University Press, 2000.

Whiteman, C. D., and Doran, J. C., The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley, *J. Appl. Meteor.*, 32, 1669-1682, 1990.