

# HOMOGENEIZACIÓN Y TENDENCIAS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN ESPAÑA Y PORTUGAL, 1961-2011

César AZORÍN-MOLINA<sup>1</sup>, Sergio M. VICENTE-SERRANO<sup>1</sup>, Tim R. McVICAR<sup>2</sup>, Sonia JEREZ<sup>3</sup>, Arturo SÁNCHEZ-LORENZO<sup>4</sup>, Juan Ignacio LÓPEZ-MORENO<sup>1</sup>, Jesús REVUELTO<sup>1</sup>, Ricardo M. TRIGO<sup>5</sup>, Joan A. LÓPEZ-BUSTINS<sup>6</sup>, Fátima ESPÍRITO-SANTO<sup>7</sup>

1. *Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global, Zaragoza*

2. *CSIRO Land and Water, Canberra, ACT, Australia*

3. *Departamento de Física, Universidad de Murcia*

4. *Grup de Física Ambiental, Departament de Física, Universitat de Girona*

5. *Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal*

6. *Grup de Climatologia, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona*

7. *Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Lisboa, Portugal*

cazorin@ipe.csic.es

## RESUMEN

En este estudio se analizan las tendencias de la velocidad del viento registradas en 67 estaciones de España y Portugal durante el período 1961-2011, y el subperíodo 1979-2008. Las series originales de velocidad del viento fueron sometidas a un control de calidad, reconstrucción y homogeneización aplicando el *Standard Normal Homogeneity Test* a partir de series de referencia simuladas con el modelo MM5. Los resultados muestran una ligera tendencia de descenso de la velocidad del viento, para ambos períodos 1961-2011 ( $-0.016 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ) y 1979-2008 ( $-0.010 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ). Estacionalmente, se detectan diferencias entre invierno y primavera, que muestran tendencias de descenso, y el verano y otoño, con tendencias de ascenso de la velocidad del viento. A pesar de que el descenso de la velocidad del viento afecta a un 77.8% de los observatorios en invierno y a un 66.7% en primavera, sólo aproximadamente el 40% de estas tendencias son estadísticamente significativas ( $p < 0.10$ ). Por el contrario, el aumento de la velocidad del viento se observa en un 51.9% de los observatorios en verano y un 57.4% en otoño, resultando igualmente un 40% de estas tendencias estadísticamente significativas ( $p < 0.10$ ). La homogeneización de las series de viento y la evaluación de las tendencias a largo plazo es fundamental para muchos campos, como la energía eólica, la agricultura, y la hidrología, entre otras.

Palabras clave: Homogeneización, Velocidad del Viento, Tendencias, España y Portugal.

## ABSTRACT

In this study we analyzed near-surface wind speed trends recorded at 67 land-based stations across Spain and Portugal for 1961-2011, also focussing on the 1979-2008 sub-period. Wind speed series were subjected to a quality control, reconstruction and homogenization using a novel procedure that incorporated MM5-simulated series as reference. The resultant series show a slight downward trend for both 1961-2011 ( $-0.016 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ) and 1979-2008 ( $-0.010 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ). However, differences between seasons declining values in winter and spring, and

increasing trends in summer and autumn were observed. Even though wind stilling affected 77.8% of the stations in winter and 66.7% in spring, only roughly 40% of the declining trends were statistically significant at the  $p < 0.10$  level. On the contrary, increasing trends appeared in 51.9% of the stations in summer and 57.4% in autumn, with also around 40% of the positive trends being statistically significant at the  $p < 0.10$  level. An accurate homogenization and assessment of long-term trends of wind speed is crucial for many fields such as wind energy, agriculture, hydrology, among others.

**Key words:** Homogenization, Wind Speed, Trends, Spain and Portugal.

## 1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, muchos estudios climáticos han detectado un descenso significativo de la velocidad del viento en superficie, conocido con el término anglosajón de «global stilling» (Roderick *et al.*, 2007). Este fenómeno ha sido observado en los Estados Unidos (Klink, 1999; Pryor *et al.*, 2009), China (Xu *et al.*, 2006), Australia (McVicar *et al.*, 2008), Holanda (Smits *et al.*, 2005), República Checa (Brázdil *et al.*, 2009), entre otras muchas regiones. McVicar *et al.* (2012) confirmaron que el «global stilling» es un fenómeno extendido en la mayor parte del planeta, con una tendencia de descenso del viento de  $-0.014 \text{ m s}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (metros/segundo/año) en promedio, es decir, del orden de  $-0.700 \text{ m s}^{-1}$  (metros/segundo) en los últimos 50 años. Las causas de este descenso en la velocidad del viento siguen sin ser resueltas, aunque en los últimos años se han apuntado múltiples hipótesis científicas: (i) debilitamiento de la circulación atmosférica causada por la expansión de la célula de Hadley (Lu *et al.*, 2007), (ii) incremento de la rugosidad del terreno asociada a una mayor masa forestal, crecimiento urbano y otros cambios en los usos del suelo (Vautard *et al.*, 2010), (iii) problemas de instrumentación (Wan *et al.*, 2010), (iv) aumento de la estabilidad causada por un incremento de la contaminación atmosférica (Xu *et al.*, 2006), y (v) efectos astronómicos vinculados a cambios decadales en la longitud del día (Mazzarella, 2007).

El objetivo de este trabajo es analizar las tendencias de la velocidad del viento en España y Portugal durante las últimas décadas (1961-2011) a fin de evaluar si el «global stilling» está afectando a esta región de latitudes medias. Los objetivos particulares de este artículo son los siguientes: (i) obtener series de velocidad del viento de alta calidad mediante un exhaustivo proceso de control de calidad, reconstrucción y homogeneización; y (ii) evaluar la variabilidad espacio-temporal de las tendencias de la velocidad del viento.

## 2. DATOS

### 2.1. Datos observados de velocidad del viento

Las series medias mensuales de velocidad del viento (en  $\text{m s}^{-1}$ ) se obtuvieron como promedio de los datos observados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) a las 00, 07, 13 y 18 UTC en el caso de España, y de los datos del recorrido del viento facilitados por el *Instituto Português do Mar e da Atmosfera* (IPMA) de 09 a 09 UTC en el caso de Portugal. A partir de la base original de datos de velocidad del viento, se seleccionaron: (i) las series más largas con datos abarcando el período 1961-2011 y sin más de 5 años de lagunas, (ii) las series con datos abarcando el subperíodo 1979-2008 (para poder ser comparados con los resultados de Vautard *et al.*, 2010) y sin más de 3 años de lagunas, y (iii) las series con menos

de 30 años de datos debido a la relocalización del observatorio meteorológico. Teniendo en cuenta estos criterios, 76 series de velocidad del viento (68 en España y 8 en Portugal) fueron sometidas al proceso de homogeneización que se describe en la sección 3.

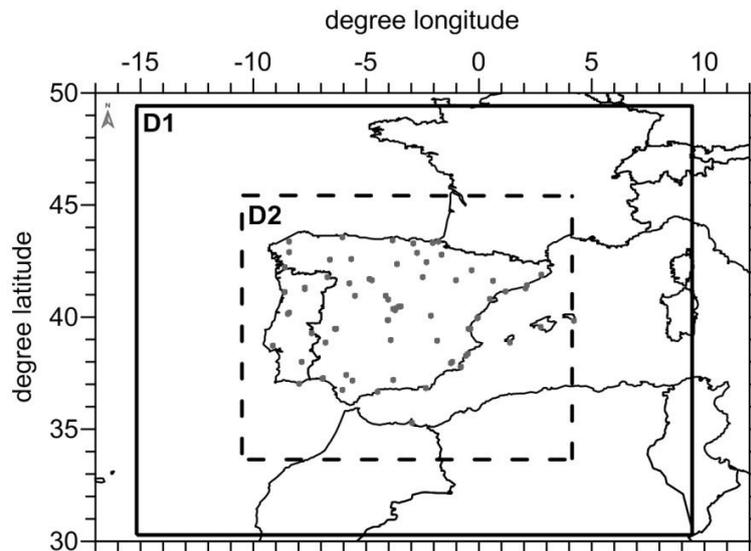


Fig. 1: Mapa del área de estudio con la localización (puntos grises) de las 67 estaciones meteorológicas con datos homogeneizados de velocidad del viento, y configuración de los dominios del modelo MM5 (D1 30-km, línea continua; D2 10-km, línea discontinua).

## 2.2. Datos modelizados de velocidad del viento

Un aspecto novedoso de este estudio es la aplicación de un modelo climático regional, el *Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research mesoscale model MM5* (Grell *et al.*, 1994), para simular el campo de velocidad del viento. La capacidad del modelo MM5 para reproducir las tendencias de velocidad del viento a largo plazo, las circulaciones de mesoescala y los diferentes regímenes de viento ha sido demostrado por varios estudios (Lorente-Plazas *et al.*, 2012; Jerez *et al.*, 2013). Por lo tanto, en este trabajo se utilizó la velocidad del viento simulada con MM5 como serie de referencia para identificar y ajustar las discontinuidades (*breaks points*) detectadas en las 76 series originales de la red de observación. En la Figura 1 se presentan los dominios utilizados en el modelo MM5.

## 3. HOMOGENEIZACIÓN DE LAS SERIES DE VELOCIDAD DEL VIENTO

Las series de velocidad del viento están sujetas a discontinuidades resultantes de: (i) cambios en el observatorio meteorológico; (ii) en la altura del anemómetro; (iii) mal funcionamiento del anemómetro; (iv) cambios en el tipo de anemómetro; (v) cambios en los intervalos de muestreo; y (vi) cambios artificiales/naturales en el entorno de la estación meteorológica (Pryor *et al.*, 2009). Debido a la escasez de metadatos, el proceso de homogeneización de las 76 series de velocidad del viento abarcó las siguientes fases: (i) control de calidad; (ii) reconstrucción; y (iii) homogeneización de las series.

### 3.1. Control de calidad

Las series de velocidad del viento se registraron en estaciones meteorológicas de primer orden, y la mayoría de estas estaciones se ubican en aeropuertos, lo que a priori asegura la calidad de las series en cuanto a inspección diaria y escasos cambios artificiales / naturales alrededor de la estación. Los datos brutos de velocidad del viento pasaron en primer lugar los correspondientes controles de calidad por la AEMET y el IPMA, y posteriormente en este trabajo aplicamos un control de calidad (Aguilar *et al.*, 2003) para eliminar errores debido al archivo, transcripción y digitalización de los datos (El Kenawy *et al.*, 2013). Este proceso consistió en descartar los valores sospechosos de la velocidad del viento (*outliers*), es decir,  $\leq 0.1 \text{ m s}^{-1}$  o  $\geq 10.0 \text{ m s}^{-1}$ , ya que se verificó que los promedios mensuales no pueden exceder ambos límites en ninguno de los observatorios meteorológicos analizados.

### 3.2. Reconstrucción

Este proceso consistió en la unión de series de velocidad del viento para aquellos observatorios que fueron reubicados. Esto ocurrió en 5 estaciones españolas, y en 2 estaciones portuguesas (véase el ejemplo de la estación de Coimbra Aeródromo en la Figura 2). En todos estos casos se tomó nota de la fecha de unión de las series a fin de comprobar su posible inhomogeneidad durante el proceso de homogeneización que describimos a continuación.

### 3.3. Homogeneización

Para probar la homogeneidad de las 76 series mensuales de velocidad del viento se aplicó el *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT) (Alexandersson, 1986) mediante el software AnClim (<http://www.climahom.eu/software-solution/anclim>); desarrollado por Stepanek (2004). El SNHT es probablemente la prueba más utilizada para la detección de inhomogeneidades en series climáticas. En este proceso utilizamos como series de referencia los datos simulados con MM5, ya que el uso del viento geostrófico (Wan *et al.*, 2010) o del viento del observatorio más próximo (Wang, 2008) no son buenas series de referencia en zonas de topografía compleja como la Península Ibérica, donde el viento es el resultado de la conjunción de varias fuerzas y la dependencia espacial entre observatorios se puede degradar notablemente en distancias cortas. En este sentido, el coeficiente de correlación de Pearson muestra una relación positiva más fuerte con las series MM5 en comparación a las series más cercanas, siendo generalmente superior a 0.6 en la mayoría de observatorios.

La Figura 2 ejemplifica la detección de una discontinuidad en la serie mensual de velocidad del viento de Coimbra (Portugal) por medio del test SNHT. La estación de Coimbra Geofísico (141 metros sobre el nivel del mar) funcionó entre enero de 1961 y abril de 1996 y luego se trasladó a Coimbra Aeródromo (170 metros sobre el nivel del mar). Además, la altura del anemómetro pasó de 5.1 a 4.0 metros y el anemógrafo 1482 (tipo Woelfe) Lambrecht fue sustituido por el anemómetro Casella W1208 / 2. Todos estos cambios artificiales fueron responsables de la discontinuidad estadísticamente significativa (5%) detectada en casi todos los meses entre 1993 y 1999, según revela el valor de  $T$ . La pendiente de la regresión lineal de la serie de velocidad del viento en Coimbra disminuyó de  $-0.140 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  de la serie original a  $-0.024 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  de la serie homogeneizada, lo cual confirma la importancia del proceso de homogeneización.

Tras aplicar este proceso de homogeneización y también aplicar un relleno de lagunas (no más de 5 años) utilizando las series mensuales del MM5, un total de 54 estaciones (46 en España y 8 en Portugal) y 67 estaciones (59 en España y 8 en Portugal) fueron utilizadas para

el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la velocidad del viento para los períodos 1961-2011 y 1979-2008, respectivamente. Por tanto, de las 76 series de viento iniciales, 9 de ellas fueron descartadas debido a la gran cantidad de inhomogeneidades y lagunas detectadas en los datos.

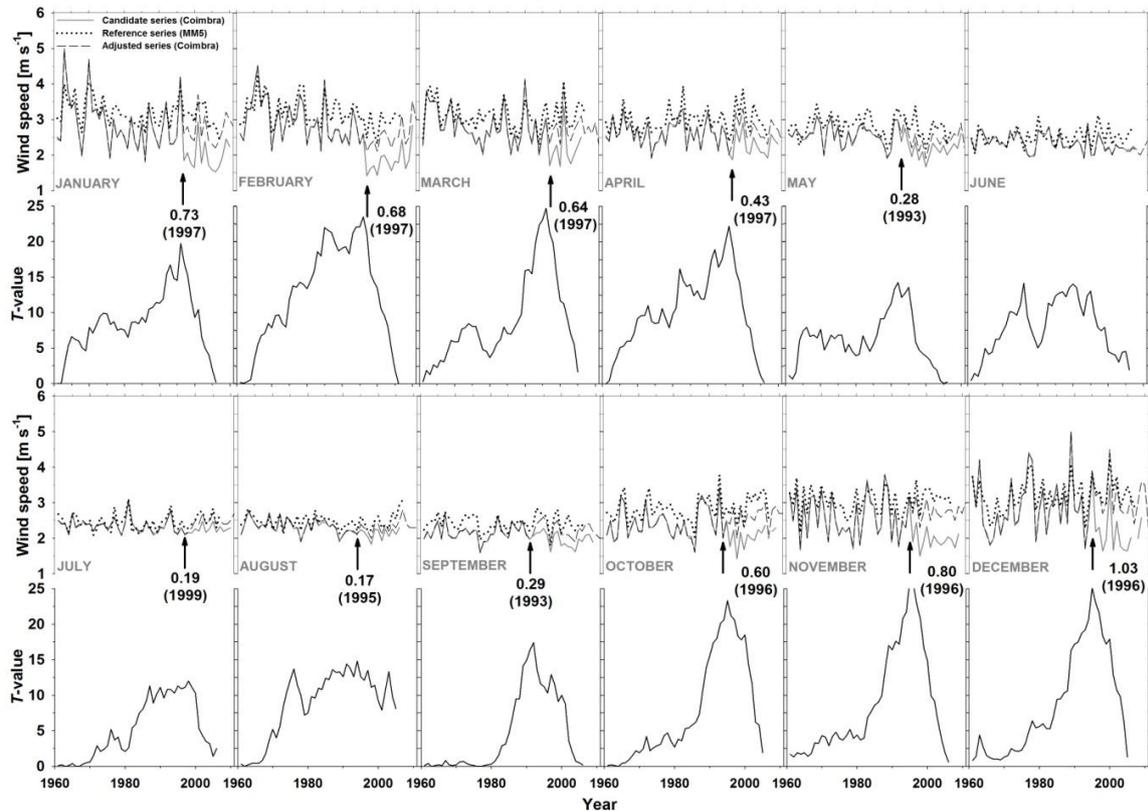


Fig. 2: Serie original (candidata; línea gris continua), serie MM5 (referencia; línea negra punteada) y serie homogeneizada (línea negra discontinua) de velocidad del viento en la estación de Coimbra, y los correspondientes *T-values* tras aplicar el SNHT. Los cambios añadidos y años de cada discontinuidad se representan con una flecha, excepto en junio que no mostró ningún *breakpoint*.

#### 4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS

En primer lugar, calculamos las series de anomalías (como desviaciones respecto a la media del período 1981-2010) de velocidad del viento a nivel de estación así como para el conjunto de España y Portugal. Seguidamente aplicamos un análisis de regresión lineal entre la serie temporal (variable independiente) y la serie de anomalías de velocidad del viento (variable dependiente) a fin de calcular el signo y magnitud de la tendencia de la velocidad del viento. La pendiente del modelo de regresión representa la magnitud de la tendencia de la velocidad del viento; en  $\text{m s}^{-1} \text{dec}^{-1}$ . La significación estadística de las tendencias lineales anuales, estacionales y mensuales se calculó utilizando el coeficiente de correlación no paramétrico de Mann-Kendall tau-b (Kendall y Gibbons, 1990), que mide el grado en que una tendencia está aumentando o disminuyendo, aplicando previamente la función de autocorrelación (von Storch, 1995) puesto que las autocorrelaciones significativas incrementan la probabilidad de

que el tau-b detecte tendencias significativas; sin encontrar una autocorrelación más allá del lag-0 al nivel de significación  $p < 0.05$ . En este trabajo se presentan las tendencias de la velocidad del viento considerando tres umbrales de significación estadística (McVicar *et al.*, 2010): (i) significativas a  $p < 0.05$ ; (ii) significativas a  $p < 0.10$ ; y (iii) no significativas a  $p < 0.10$ .

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Tendencias anuales y estacionales de la velocidad del viento

La tabla 1a resume las tendencias de la velocidad del viento para el período 1961-2011 y el subperíodo 1979-2008; mientras en la tabla 1b se detallan las tendencias de la velocidad del viento de las series MM5 para su comparación. Anualmente, se detecta una tendencia negativa de la velocidad del viento de  $-0.016 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  para el período 1961-2011 ( $-0.010 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  para 1979-2008; ninguna significativa a  $p < 0.10$ ). En cambio, estacionalmente se observan dos patrones contrastados, con descensos en la velocidad del viento en invierno (DEF;  $-0.054 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ; no significativo a  $p < 0.10$ ; y  $-0.125 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  significativo a  $p < 0.10$  para el subperíodo 1979-2008) y primavera (MAM;  $-0.022 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ; y  $-0.031 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  para el subperíodo 1979-2008, no significativo a  $p < 0.10$  en ambos casos), y por el contrario leves ascensos en verano (JJA;  $0.009 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ; y  $0.037 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  para el subperíodo 1979-2008) y otoño (SON;  $0.006 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ ; y  $0.053 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  para el subperíodo 1979-2008), sólo significativos a  $p < 0.10$  en verano para el subperíodo 1979-2008.

(a)	Todos los observatorios		España		Portugal	
	1961-2011	1979-2008	1961-2011	1979-2008	1961-2011	1979-2008
Anual	-0.016	-0.010	-0.014	-0.006	(-0.032)	(-0.038)
Invierno	-0.054	-0.125	-0.047	-0.115	(-0.096)	(-0.193)
Primavera	-0.022	-0.031	-0.018	-0.028	(-0.044)	-0.058
Verano	0.009	0.037	0.010	0.041	0.000	0.008
Otoño	0.006	0.053	0.003	0.052	0.021	0.061
(b)	Todos los observatorios		España		Portugal	
	1961-2011	1979-2008	1961-2011	1979-2008	1961-2011	1979-2008
Anual	-0.004	0.003	-0.002	0.003	-0.015	0.005
Invierno	-0.054	-0.088	-0.053	-0.089	-0.059	-0.079
Primavera	-0.007	-0.037	-0.004	-0.034	-0.025	-0.058
Verano	0.025	0.050	0.027	(0.050)	0.015	(0.049)
Otoño	0.024	0.076	0.025	0.073	0.016	(0.094)

Tabla 1: TENDENCIAS ANUALES Y ESTACIONALES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO PARA TODOS LOS OBSERVATORIOS, ESPAÑA Y PORTUGAL DURANTE EL PERÍODO 1961-2011 Y 1979-2008 PARA (a) SERIES OBSERVADAS, Y (b) SERIES MODELIZADAS CON MM5. LOS VALORES SE EXPRESAN EN  $\text{m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$ . SE RESALTAN LAS TENDENCIAS ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS AL NIVEL  $p < 0.10$  (NEGRITA) y  $p < 0.05$  (NEGRITA Y PARÉNTESIS)

En la Figura 3 se observa una correlación estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) entre las series de anomalías anuales y estacionales de España (46 observatorios) y Portugal (8 observatorios); 0.64 anual (Figura 3a), 0.81 en invierno (Figura 3b), 0.71 en primavera (Figura 3c), 0.49 en verano (Figura 3d) y 0.70 en otoño (Figura 3e), lo cual confirma la calidad de los datos y del proceso de homogeneización al tratarse de datos proporcionados por diferentes servicios meteorológicos. En general, la velocidad del viento descendió  $-0.014 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  ( $-0.006 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  para 1979-2008) y  $-0.032 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  ( $-0.038 \text{ m s}^{-1} \text{ dec}^{-1}$  para 1979-2008) para España y Portugal, respectivamente. Por tanto, esta disminución de la velocidad del viento fue tres veces mayor en Portugal, resultando además estadísticamente significativa a  $p < 0.05$  en ambos periodos. El filtro gaussiano de paso bajo (15-años) revela que la velocidad del viento descendió gradualmente hasta el año 2000 en ambos países, siendo esta tendencia más marcada en la década de 1990, mientras que la velocidad se ha incrementado muy ligeramente durante la última década. Por último, también se detectan diferencias estacionales en los cambios de velocidad del viento en ambos países, observándose los descensos más significativos en invierno, particularmente en Portugal, siendo de menor magnitud y significación estadística en primavera; mientras que se detectaron leves ascensos en las tendencias de velocidad del viento, pero de menor significación estadística en verano y otoño.

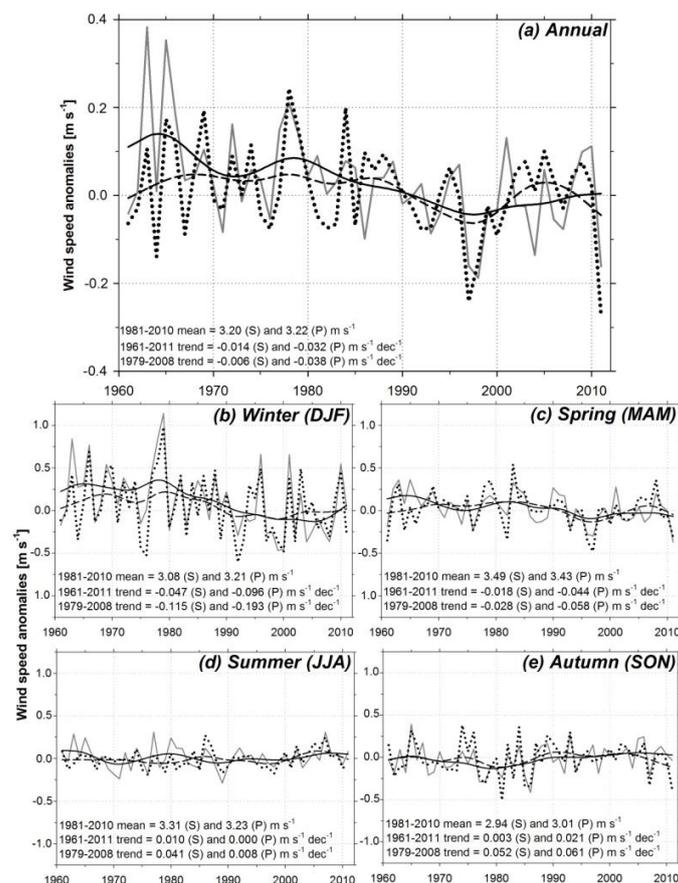


Fig. 3: Anomalías anuales y estacionales de la velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) de las series de España (línea de puntos negros) y Portugal (línea gris) a lo largo del período 1961-2011. El filtro gaussiano de paso bajo (15-años) se dibuja en trazo discontinuo para España y continuo para Portugal.

## 5.2. Distribución espacial de las tendencias de viento

La Figura 4 muestra la distribución espacial del signo, magnitud de cambio y significación estadística de las tendencias de velocidad del viento para 1961-2011 (54 observatorios), que además se resumen en la tabla 2. En general, la heterogeneidad es un rasgo característico ya que las tendencias positivas y negativas aparecen entre observatorios próximos. Anualmente, la velocidad del viento disminuyó en un 63.0% de las estaciones, siendo esta disminución estadísticamente significativa en el 38.2% ( $p < 0.05$ ) y el 44.1% ( $p < 0.10$ ). Estacionalmente, se observa una clara disminución de la velocidad del viento en invierno (Fig. 4b) afectando a un 77.8% de las estaciones (31.0% y 38.1% de sus series son significativas al  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente); y la primavera (Fig. 4c) con un 66.7% de las estaciones (27.8% y 38.9% de sus series son significativas al  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente). En cambio, el fenómeno «stilling» es menor en verano (Fig. 4d) y otoño (Fig. 4e), con sólo un 48.1% y 42.6%, respectivamente. Como se ha señalado, en estas dos últimas estaciones del año el dominio correspondió al signo débilmente positivo en las tendencias de la velocidad del viento, con el 51.9% de éstas en verano (46.4% de éstas son estadísticamente significativas en ambos niveles de significación), y el 57.4% de éstas en otoño (16.1% y 25.8% de éstas son estadísticamente significativas al  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente).

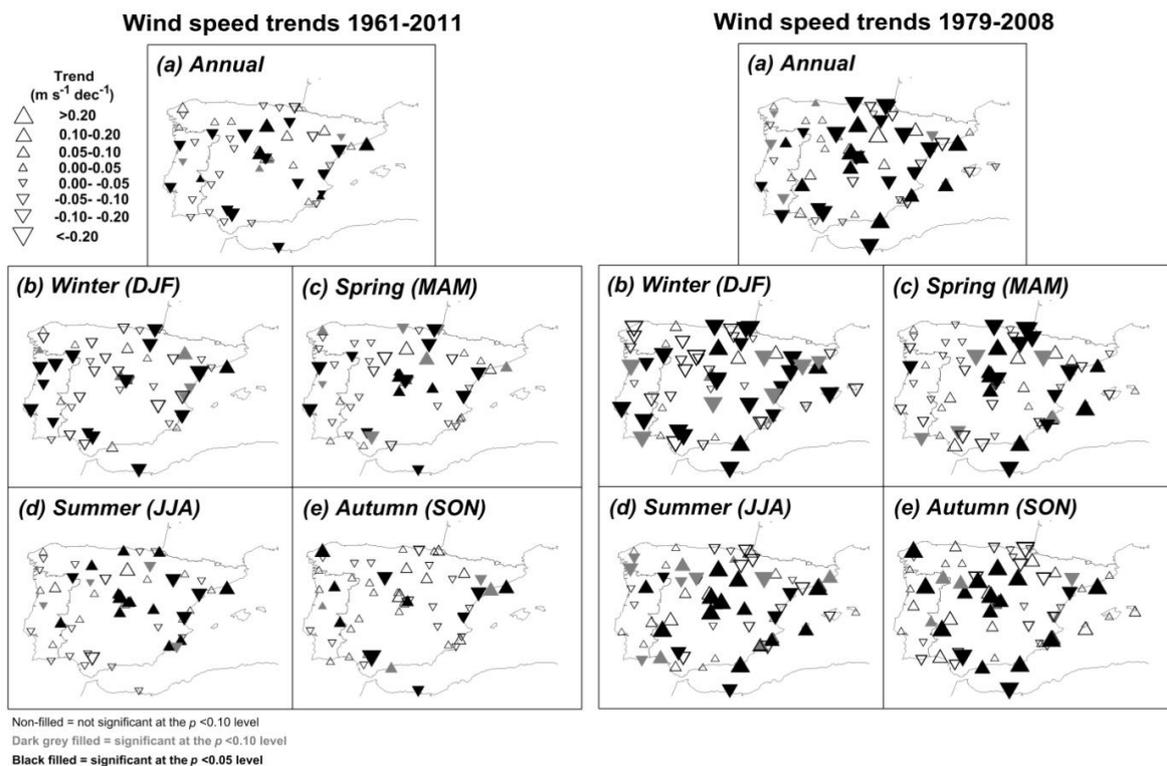


Fig. 4 (izquierda): Distribución espacial del signo, magnitud de la tendencia (en  $\text{m s}^{-1} \text{dec}^{-1}$ ) y significación estadística (triángulos rellenos en negro indican significación al  $p < 0.05$ ; en gris indican significación al  $p < 0.10$ ; y sin relleno implica que no hay significación al  $p < 0.10$ ) de las tendencias de velocidad del viento para 54 estaciones (1961-2011). Fig. 5 (derecha): Ídem que la anterior, para 67 estaciones (1979-2008).

En el caso del subperíodo 1979-2008 (67 observatorios), la magnitud de estos cambios es mayor tal como se resume en la figura 5 y la tabla 2. En cambio, el porcentaje de estaciones mostrando un descenso de la velocidad del viento fue menor (55.2%; Fig. 5a), pero de mayor significación estadística ya que el 43.2% y 54.1% de estos observatorios ofrecieron en sus series descensos estadísticamente significativos al  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente. Estacionalmente, el fenómeno «stilling» se observó en un mayor porcentaje de estaciones (82.1%) en invierno (Fig. 5b), mientras en primavera se mantuvo o descendió ligeramente al 62.7% (Fig. 5c), al 41.8% en verano (Fig. 5d) y 37.3% en otoño (Fig. 5e). Por tanto, durante estas dos últimas estaciones del año también se observó un aumento de la velocidad del viento para este subperíodo, con un 58.2% (verano) y 62.7% (otoño).

1961-2011								
	-	- $p < 0.05$	- $p < 0.10$	- $p > 0.10$	+	+ $p < 0.05$	+ $p < 0.10$	+ $p > 0.10$
Anual	63.0	38.2	44.1	55.9	37.0	25.0	35.0	65.0
Invierno	77.8	31.0	38.1	61.9	22.2	8.3	33.3	66.7
Primavera	66.7	27.8	38.9	61.1	33.3	22.2	38.9	61.1
Verano	48.1	15.4	30.8	69.2	51.9	46.4	46.4	53.6
Otoño	42.6	21.7	26.1	73.9	57.4	16.1	25.8	74.2
1979-2008								
Anual	55.2	43.2	54.1	45.9	44.8	33.3	40.0	60.0
Invierno	82.1	32.7	45.5	54.5	17.9	25.0	33.3	66.7
Primavera	62.7	26.2	35.7	64.3	37.3	32.0	36.0	64.0
Verano	41.8	17.9	39.3	60.7	58.2	33.3	46.2	53.8
Otoño	37.3	12.0	16.0	84.0	62.7	33.3	40.5	59.5

Tabla 2: FRECUENCIA RELATIVA (%) DE OBSERVATORIOS CON TENDENCIAS NEGATIVAS Y POSITIVAS Y ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS (AL NIVEL  $p < 0.05$  Y  $p < 0.10$ ) Y NO SIGNIFICATIVAS (AL NIVEL  $p > 0.10$ ) ANUAL Y ESTACIONALMENTE PARA EL PERÍODO 1961-2011(54 OBSERVATORIOS) Y 1979-2008 (67 OBSERVATORIOS). LOS % ESTÁN CALCULADOS CON RESPECTO AL NÚMERO TOTAL DE ESTACIONES QUE PRESENTAN TENDENCIAS NEGATIVAS Y POSITIVAS.

## 6. CONCLUSIONES

Este estudio evalúa por primera vez las tendencias de velocidad del viento en territorio español y portugués, y revela nuevas evidencias sobre el «global stilling» en una región situada en la transición entre el cinturón de altas presiones subtropicales y los vientos del oeste de latitudes medias. En este trabajo se ha evidenciado un ligero descenso de la velocidad del viento a escala anual, y diferentes patrones estacionales, con disminuciones en la velocidad del viento en invierno y primavera, y por el contrario, leves ascensos en verano y otoño. El descenso en la velocidad del viento afectó a gran parte de los observatorios en invierno y en menor medida en primavera, siendo estadísticamente significativo al nivel  $p < 0.10$  en aproximadamente el 40% de los observatorios en ambas estaciones del año. Por el contrario, el incremento de la velocidad del viento detectado en verano y otoño afectó a poco más del 50% de los observatorios, siendo también cerca del 40% de estas tendencias positivas y estadísticamente significativas al nivel  $p < 0.10$ . La causas de este descenso de la velocidad del viento son inciertas (Vautard *et al.*, 2010; McVicar *et al.*, 2012) y pocos estudios han

investigado la contribución de los cambios en la circulación atmosférica a gran escala (Bichet *et al.*, 2012). En este sentido, Azorin-Molina *et al.* (2014) atribuyeron las tendencias presentadas en este trabajo a la variabilidad decadal de algunos índices de circulación atmosférica, y al papel que ejerce el crecimiento urbano en algunos observatorios analizados.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por (i) el contrato de C. A-M (JCI-2011-10263) y de A. S-L (2011 aC-B 00078); (ii) los proyectos CGL2011-27574-C02-02, CGL2011-27536/HID, CGL2011-29263-C02-01 y PSE.120000.2007.14, financiados por la CICYT, y el FEDER; el proyecto ACQWA (FP7-ENV-2008-1-212250), financiado por la CE; el proyecto CTP1/12 financiado por la CTP; y ENAC (PTDC/AAC-CLI/103567/2008), financiado por la Fundación Portuguesa de Ciencias; y (iii) el Grupo de Climatología (2014 SGR 300, Generalitat de Catalunya). Los autores desean agradecer a la AEMET y el IPMA por la cesión de datos de viento, y en particular a José Antonio Guijarro (AEMET-Baleares) y Juan-José Vizcaíno (AEMET-Valencia) por sus comentarios e información; a Ptr Stepanek por la utilización del software AnClim; y al Departamento de Física de la Universidad de Murcia, por la cesión de las series de velocidad del viento simuladas con MM5, en particular a Raquel Lorente-Plazas y Juan Pedro Montávez por la ayuda prestada.

## 8. REFERENCIAS

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C., y Wieringa, J. (2003) *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization*. World Meteorological Organization.
- Alexandersson, H. (1986) "A homogeneity test to precipitation data". *International Journal of Climatology*, 6 (6), pp. 661-675.
- Azorin-Molina, C., Vicente-Serrano, S.M., McVicar, T.R., Jerez, S., Sanchez-Lorenzo, A., López-Moreno, J.I., Revuelto, J., Trigo, R. M., Lopez-Bustins, J.A., y Espirito-Santo, F. (2014). "Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961-2011." *Journal of Climate*, 27 (10), pp. 3692-3712.
- Bichet, A., Wild, M., Folini, D., y Schär, C. (2012) "Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model". *Geophysical Research Letters*, 39, L11701, doi:10.1029/2012GL051685.
- Brázdil, R., Chromá, K., Dobrovolný, P., y Tolasz, R. (2009). "Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961-2005". *International Journal of Climatology*, 29 (2), pp. 223-242.
- El Kenawy, A., López-Moreno, J.I., Stepanek, P., y Vicente-Serrano, S.M. (2013). "An assessment of the role of homogenization protocol in the performance of daily temperature series and trends: application to northeastern Spain". *International Journal of Climatology*, 33 (1), pp. 87-108
- Grell, G.A., Dudhia, J., y Stauffer, D.R. (1994) *A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. NCAR Tech. Note 398+STR, Natl. Cent. For Atmos. Res, Boulder, Colorado.
- Jerez, S., Trigo, R.M., Vicente-Serrano, S.M., Pozo-Vázquez, D., Lorente-Plazas, R., Lorenzo-Lacruz, J., Santos-Alamillos, F., y Montávez, J.P. (2013). "The impact of the North Atlantic Oscillation on the renewable energy resources in southwestern Europe. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(10), pp. 2204-2225.
- Kendall, M.G., y Gibbons, J.D. (1990). *Rank Correlation Methods*. Oxford University Press.

- Klink, K. (1999). "Trends in mean monthly maximum and minimum surface wind speeds in the coterminous United States, 1961 to 1990". *Climate Research*, 13 (3), pp. 193-205.
- Lorente-Plazas, R., Montávez, J.P., Jerez, S., Gómez Navarro, J.J., Jiménez Guerrero, P., Jiménez, P.A., García-Valero, J.A., Gomáriz-Castillo, F., y Alonso-Sarría, F. (2012). "EOLMAP: A web tool to assess the wind resource over Spain". En: Proceedings International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ' 12), Santiago de Compostela, Spain, European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), pp. 95-105.
- Lu, J., Vecchi, G.A., y Reichler, T. (2007). "Expansion of the Hadley cell under global warming". *Geophysical Research Letters*, 34 (6), L06805, doi:10.1029/2006GL028443.
- Mazzarella, A. (2007) "The 60-year solar modulation of global air temperature: the Earth's rotation and atmospheric circulation connection". *Theoretical and Applied Climatology*, 88 (3-4), pp. 193-199.
- McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Li, L.T., Roderick, M.L., Rayner, D.P., Ricciardulli, L., y Donohue, R.J. (2008) "Wind speed climatology and trends for Australia, 1975-2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output." *Geophysical Research Letters*, 35 (20), L20403, doi:10.1029/2008GL035627.
- McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Roderick, M.L., Li, L.T., Mo, X.G., Zimmermann, N.E., y Schmatz, D.R. (2010) "Observational evidence from two mountainous regions that near-surface wind speeds are declining more rapidly at higher elevations than lower elevations: 1960-2006". *Geophysical Research Letters*, 37 (6), L06402, doi:10.1029/2009GL042255.
- McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., Mescherskaya, A.V., Kruger, A.C., Rehman, S., y Dinpashoh, Y. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation". *Journal of Hydrology*, 416-417, pp.182-205.
- Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., Young, D.T., Takle, E.S., Arritt, R.W., Flory, D., Gutowski Jr., W.J., Nunes, A., y Roads, J. (2009). "Wind speed trends over the contiguous United States". *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 114(D14), D14105, doi:10.1029/2008JD011416.
- Roderick, M.L., Rotstayn, L.D., Farquhar, G.D., y Hobbins, M.T. (2007). On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 34 (17), L17403, doi:10.1029/2007GL031166.
- Smits, A., Klein-Tank, A.M.G., y Können, G.P. (2005). "Trends in storminess over the Netherlands, 1962-2002". *International Journal of Climatology*, 25 (10), 1331-1344.
- Stepanek, P. (2004) "AnClim- software for time series analysis (for windows)". Department of Geography, Faculty of Natural Sciences. Masaryk University: Brno, 1.47 MB.
- Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., Thépaut, J.-N., y Ciais, P. (2010) "Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness". *Nature Geoscience*, 3 (11), pp. 756-761.
- von Storch, H. (1995). *Misuses of statistical analysis in climate research*. En: von Storch, H., y Navarra, A. (Eds.). *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*, Springer, pp. 11-26.
- Wan, H., Xiaolan, L.W., y Swail, V.R. (2010). "Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds". *Journal of Climate*, 23 (5), pp. 1209-1225.
- Wang, X.L. (2008). "Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal *t* or *F* test". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47 (9), pp. 2423-2444.
- Xu, M., Chang, C.P., Fu, C., Qi, Y., Robock, A., Robinson, D., y Zhang, H. (2006). "Steady decline of East Asian Monsoon winds, 1969-2000: evidence from direct ground

C AZORÍN-MOLINA, S M. VICENTE-SERRANO, T R. McVICAR, S JEREZ, A SÁNCHEZ-LORENZO,  
J I LÓPEZ-MORENO, J REVUELTO, R M. TRIGO, J A. LÓPEZ-BUSTINS, F ESPÍRITO-SANTO

measurements of wind speed". *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 111 (D24),  
D24111, doi:10.1029/2006JD007337.