

VALIDACIÓN DE LOS CAMPOS DE VELOCIDADES DEL VIENTO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA SIMULADOS POR LOS MODELOS CLIMATICOS DEL PROYECTO ESCENA

Guillermo Gómez(1), William Cabos(1), Giovanni Liguori(1), Sergio Lozano(2)

(1) Departamento de Física, Universidad de Alcalá. guillermo.gomez@insa.es

(2) Departamento de Energía Eólica, CENER

Resumen

En este trabajo se ha analizado la capacidad que tiene un emsemble, formado por cinco modelos climáticos regionales distintos centrados sobre la Península Ibérica de reproducir las variables climáticas más importantes que se usan para obtener el recurso eólico de una zona. Para ello se compararon entre sí los resultados obtenidos por los distintos modelos, y con bases de datos climatológicas, de reanálisis ERA_Interim y de mediciones ECA&D. Los modelos climáticos regionales elegidos fueron los del proyecto ESCENA (PROMES, dos versiones de WRF, MM5 y REMO) los cuales representan un buen ejemplo del estado del arte en modelización climática regional.

Palabras Clave: Velocidad media viento, ráfagas viento, modelos climáticos regionales, Península Ibérica.

1. Introducción

El impacto de la actividad humana en la evolución del clima ha sido refrendado por numerosísimos estudios realizados por distintas disciplinas científicas, cuyos resultados han sido resumidos en las conclusiones de los informes de evaluación del IPCC. Y aunque la mayoría de los esfuerzos de la comunidad científica se han centrado en el estudio del impacto de los distintos escenarios de cambio climático en los campos de precipitación y temperatura, existe cierto número de publicaciones que estudian el efecto del cambio climático sobre el campo de vientos. Además de un interés puramente científico, estos estudios también tienen gran importancia desde el punto de vista energético, ya que un mejor conocimiento de la variabilidad del campo de vientos permitirá conocer mejor el potencial eólico de una zona y por lo tanto optimizar el uso del recurso eólico de la misma. Así aplicando distintas técnicas de Downscaling a las salidas de diversos AOGCM's (Athmosphere-Ocean General Circulation Models), se han realizado diversos estudios de las previsiones de variación del potencial eólico que se prevé para el S. XXI en diversas zonas del mundo. Para

Brasil, distintas proyecciones climáticas sugieren incrementos importantes en el recurso eólico en zonas costeras y en la región noroeste del país [1], así como en la costa Oeste de Sudamérica [2]. Para Estados Unidos determinados estudios parecen indicar que el recurso eólico en Estados Unidos podría sufrir un descenso medio (<3%) en los próximos 50 años [3], así como un descenso de la densidad energética eólica durante los meses de verano, y sin cambio o muy ligero durante el invierno [4].

Räisänen et al. (2004) evaluó los efectos del cambio climático en Europa para el periodo (2071-2100), según los escenarios de emisiones de gases invernadero A2 y B2. Sus estudios mostraron un aumento en la velocidad del viento del 8% en el norte de Europa, y una disminución en el Mediterráneo centro, además de un incremento moderado en el Sureste de Europa. Estos resultados han sido corroborados por otros estudios centrados en distintas regiones europeas. Así, para la zona del Mediterráneo Oriental, se prevé una disminución de la potencia eólica sobre el mar Mediterráneo, pero un incremento del mismo sobre el continente [5]. Para el Norte de Europa, especialmente la Península Escandinava, se prevé incrementos de hasta el 10% en el suroeste de la Península Escandinava y el centro del mar Báltico [6]. Otros estudios, muestran una disminución significativa de la velocidad del viento en la zona del Mediterráneo Oeste [7]

Entre los estudios del recurso eólico en la Península Ibérica cabría destacar las realizadas por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), el cual ha finalizado en 2011 un estudio del recurso eólico para todo el territorio nacional de la Península Ibérica; Islas Canarias, Islas Baleares; Ceuta y Melilla y la zona marítima hasta 24 millas náutica desde la línea base. Para realizar este estudio se utilizó una combinación de modelos mesoescalares, para reproducir los patrones de viento a gran escala, y modelos microescalares, para incorporar en los resultados el efecto sobre el viento de las características del terreno y la orografía [8]. La UM (Universidad de Murcia) ha desarrollado herramientas estadísticas que permiten obtener una estimación del potencial eólico y su incertidumbre asociada para una localización concreta o un área. El CENER (Centro Nacional de Energías Renovables) ha obtenido un mapa del recurso eólico de alta resolución para la Península Ibérica y Baleares para el presente [9].

La influencia de la Oscilación del Atlántico Norte en el campo de vientos de la península en primavera ha sido analizada en un trabajo conjunto llevado a cabo por grupos de la Universidad de Segovia, de la Universidad de Murcia y la Universidad Complutense [10].

Por otro lado, se sabe que los ensembles de modelos climáticos regionales son actualmente la mejor herramienta para estudiar con alta resolución la evolución del clima de una región determinada, ya que permiten disminuir las incertidumbres inherentes de cada uno de los modelos que lo conforman. Por lo que tal como se dice en el resumen, en este trabajo se evalúa la idoneidad de usar un ensemble de modelos climáticos regionales (proyecto ESCENA), para estudiar la evolución del viento en la Península Ibérica. Para lo cual se validarán los vientos simulados por los modelos con datos de reanálisis y observaciones las variables climáticas más importantes que se usan para obtener el recurso eólico (velocidad media anual, estacional, mensual, vientos máximos, frecuencias,...) en la Península Ibérica para los modelos del proyecto ESCENA en el periodo 1989-2008.

2. Modelos y Bases de Datos Usadas

A continuación se describen los modelos del proyecto ESCENA, y las bases de datos climatológicos usadas para validar el campo de velocidades de viento de los RCM.

2.1 Modelos Climáticos Regionales

El ensemble utilizado en este trabajo está compuesto por cinco modelos distintos (PROMES, dos versiones del modelo WRF, MM5 y REMO). Los modelos utilizados han sido desarrollados en distintas instituciones y cada uno de ellos trata de forma distinta las ecuaciones que describen la física de la atmósfera[11].

- **PROMES:** El RCM PROMES (Castro et al, 1993; Sánchez et al, 2004). Desarrollado por el grupo de investigación MOMAC (Modelización para el Medio Ambiente y el Clima) de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).
- **WRF (Weather Research and Forecasting):** Desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) y otras instituciones colaboradoras. El grupo de investigación Santander Meteorology Group (SMG) de la Universidad de Cantabria (UC) utiliza la versión 3.1.1 del modelo con modificaciones que permiten obtener valores de variables climatológicas en superficie (CLWRF; Fita et al, 2010). Las dos versiones de WRF utilizadas en el proyecto corresponden a dos configuraciones distintas de la Capa Límite Planetaria, la configuración WRF-A que usa un esquema local, mientras que la configuración WRF-B usa un esquema no local.

- **MM5_UM:** (Dudhia, 1993; Grell et al, 1994; Gómez-Navarro et al, 2010). MM5-UM es la versión climática de la quinta generación del modelo “Mesoscale Model” del centro Pennsylvania-State University National Center for Atmospheric Research. La configuración utilizada en este trabajo se ha elegido de forma que se minimice el coste computacional.
- **REMO:** (Jacob, 2001 y Jacob et al, 2001). El modelo REMO, es un modelo atmosférico climático regional tridimensional hidrostático, desarrollado por el Max-Planck-Institute de Meteorología en Hamburgo.

Todos los modelos tienen una zona de relajación de 8-10 puntos en el borde. Las simulaciones realizadas cubrieron parte de Europa y África del Norte, con el dominio centrado sobre la Península Ibérica y una resolución de *25km x 25 km*. Se eligió esta resolución espacial debido a que permite representar correctamente la variabilidad espacial de las variables analizadas, siendo suficiente para tener en cuenta de una manera razonablemente precisa los efectos de la orografía en las simulaciones. La orografía usada en los modelos se obtuvo a partir de la interpolación de los datos GTOPO30 (Verdin and Greeblee, 1996). El número de niveles implementados en cada uno de los modelos varía ligeramente, así el modelo PROMES usa 37 niveles verticales, WRF y MM5 usan 33 y 30 niveles respectivamente y REMO 31 niveles.

2.2 Bases de datos usadas

Para cuantificar mediante comparación, la bondad del campo de velocidades de viento sobre la Península Ibérica simulados por cada uno de los RCM del ensemble de ESCENA, se utilizaron con distintos propósitos los recursos que se describen a continuación:

ERA-Interim: Para la validación global del campo de vientos de los modelos del ensemble de ESCENA se tomó como referencia los datos de ERA-Interim. En un estudio preliminar se compararon los reanálisis de ERA-Interim, MERRA y GODAS con la base de dato CENER y se vió que ERA-Interim era la que mejor reproducía los vientos en la península. ERA-Interim es el conjunto de datos de reanálisis más actual del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF). El reanálisis ERA-Interim se usó como forzamiento de los modelos del ensemble de ESCENA

Base de datos de viento CENER: Debido a la baja resolución de los modelos y las distintas parametrizaciones y metodologías de asimilación utilizados para los reanálisis

globales, estos producen campos de vientos en la península que difieren sensiblemente entre si, por lo que se hizo necesario validar los campos de viento de reanálisis globales con una base de datos centrada en la península y creada específicamente para estudiar el potencial eólico de la Península Ibérica, como es la base de datos del CENER. Con ayuda del modelo de mesoscala SKIRON, el CENER ha producido un reanálisis de la península Ibérica con una resolución de $4.5 \times 4.5 \text{ km}$ a partir de la cual se han obtenido mapas de viento para una altitud de 10 m de la superficie terrestre, validados con 50 estaciones meteorológicas repartidas a todo lo largo de la geografía española, que representan los distintos tipos de terreno de la orografía Peninsular. El reanálisis reproduce con fiabilidad la velocidad media, las direcciones principales y la distribución de velocidades de viento, aumentando las discrepancias con las observaciones según se incrementa la complejidad del terreno.

European Climate Assessment & Dataset (ECA&D): El objetivo del proyecto ECA&D es formar una base de datos climatológicos reales medidos con frecuencia diaria y que cumplan unos estándares mínimos de calidad, a partir de una red de estaciones meteorológicas distribuidas por toda la superficie de Europa, Norte de África y Oriente Próximo. La base de datos de viento de ECA&D contiene mediciones diarias de viento de más de 100 estaciones repartidas por toda la Península. El proyecto ECA&D viene respaldado por el European Climate Support Network del GIE-EUMETNET.

3. Metodología

Para estudiar la capacidad que tienen los RCM para reproducir el campo de velocidades de la Península Ibérica llevaremos a cabo dos estudios:

1. Cuantificar si los RCM son capaces de simular las velocidades de viento medias en la PI, y las regiones con mayor y menor potencial eólico, usando como referencia la base de datos ERA-Interim.
2. Cuantificar si los RCM son capaces de reproducir la serie temporal de velocidades de viento para un punto determinado de la geografía de la Península Ibérica con ayuda de la base de datos de viento ECA&D.

Validación del campo medio de viento en la PI

Para la validación global del campo de vientos de los modelos del ensemble de ESCENA se tomó como referencia los datos de ERA-Interim. Como se indicó más arriba, de los tres reanálisis globales considerados, ERA-Interim dio los vientos mas

parecidos a los vientos de CENER. Además, ERA_Interim se usó como forzamiento de los modelos del ensemble de ESCENA.

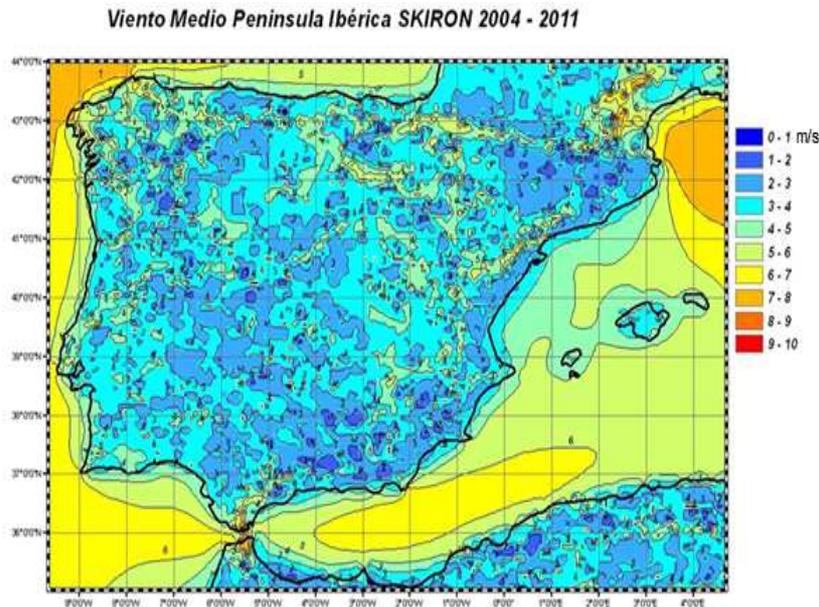


Figura 1: Viento Medio Anual de la Península Ibérica para el periodo de tiempo 2004-2011. Datos obtenidos por el CENER usando el modelo SKIRON

En la Figura 1 se representa el viento medio anual para la Península Ibérica de la base de datos CENER

Según los datos proporcionados por el CENER, la velocidad media para el territorio peninsular, exclusivamente tierra, es:

$$\bar{V}_{CENER} = 3,0 \pm 1,5 \frac{m}{s}$$

En la figura 2 se representan los datos de viento medio anual para la Península Ibérica para ERA-Interim

La velocidad media anual para la superficie terrestre de la Península Ibérica es igual a

$$\bar{V}_{ERA_{Interim}} = 3,0985 \frac{m}{s}$$

EL valor obtenido es muy próximo al que da el modelo SKIRON, con una diferencia menor del 3%. Aún así este resultado hay que tomarlo con precaución, ya que el error asociado a la velocidad de viento del modelo SKIRON es del 50%

Para validar globalmente los RCM del ensemble ESCENA se calculó el valor medio anual del campo de vientos de la Península Ibérica para el periodo de tiempo que va

desde 1989 a 2008 para todos los modelos y la desviación estándar de ese campo de vientos, tomando la desviación como el error del viento medio.

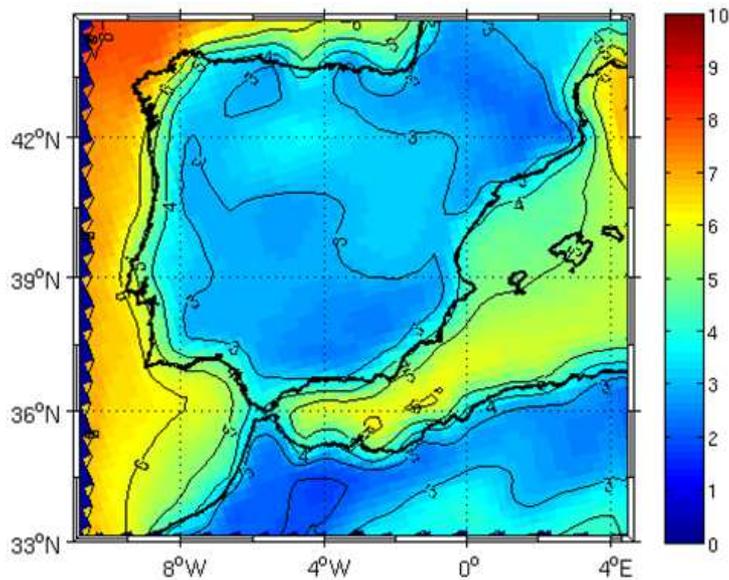


Figura 2: Viento Medio Anual de la Península Ibérica para el periodo de tiempo 1979-2011. Base de Datos de ERA_Interim

También se comprobó si los modelos eran capaces de identificar las zonas de mayor y menor potencial eólico. Para esto en ERA-Interim y cada uno de los modelos se restó al campo medio de velocidades de el promedio espacial de éste y se comprobó punto por punto si tanto en el modelo como en ERA-Interim la velocidad del viento del punto era superior o inferior a la media.

Validación del campo de viento con datos observados

Para evaluar la capacidad de los RCM de simular la evolución de la velocidad media del viento en puntos geográficos determinados en la Península Ibérica se eligieron 10 de entre las más de 100 estaciones meteorológicas españolas incluidas en la base de datos ECA&D, representativos de la geografía española. La distribución de estaciones fue la siguiente:

- Zona 1 según Figura 3, dos estaciones: Santiago de Compostela (Lon: 42,8878; Lat: -8,4108) y Huelva (Lon: 37,2800; Lat: -6,9097)
- Zona 2, una estación: Granada (Lon: 37,1369; Lat: -3,6314)
- Zona 3, una estación: Ávila (Lon: 40,6592; Lat: -4,6800)
- Zona 4, una estación: León (Lon: 42,5889; Lat: -5,6494)
- Zona 5, dos estaciones: Soria (Lon: 41,7750; Lat: -2,4831) y Cuenca (Lon: 40,0667; Lat: -2,1381)
- Zona 6, una estación: Huesca (Lon: 42,0833; Lat: 0,3264)

Los puntos de la malla de los modelos no coinciden exactamente con la ubicación de las estaciones de la base de ECA&D por lo que se interpolaron los valores de los cuatro puntos del grid de los modelos más próximos a la ubicación de la estación meteorológica aplicando distintas técnicas de interpolación y también se obtuvo el error medio y la desviación típica del error de la serie temporal de velocidades de viento de ECA&D y la serie temporal interpolada para cada uno de los puntos de estudio

Distancia mínima: Para la interpolación se supuso que el valor del viento simulado en la ubicación de una estación es combinación lineal de las series temporales de datos de los cuatro puntos del modelo más próximos a la de la estación. Los parámetros de la combinación lineal se toman inversamente proporcionales a la distancia que separa la estación meteorológica de los cuatro puntos de la series temporales de los datos del modelo.

Mínimos cuadrados: Al igual que para el caso del método distancia mínima, para obtener la serie temporal de los valores de velocidad del viento para el mismo punto que la estación meteorológica de ECA&D usando los valores de un RCM, se supuso que esta es combinación lineal de las series temporales de datos de los cuatro puntos del modelo más próximos a la de la estación. Aplicando la técnica de mínimos cuadrados se obtuvo los valores de los parámetros que minimizaran la diferencia entre la serie temporal de datos de ECA&D y la combinación lineal de las series temporales de los puntos del modelo escogido. Una vez calculados los parámetros se obtiene la serie temporal del punto resolviendo el polinomio de la combinación lineal de datos de los cuatro puntos del modelo más próximos a la estación.

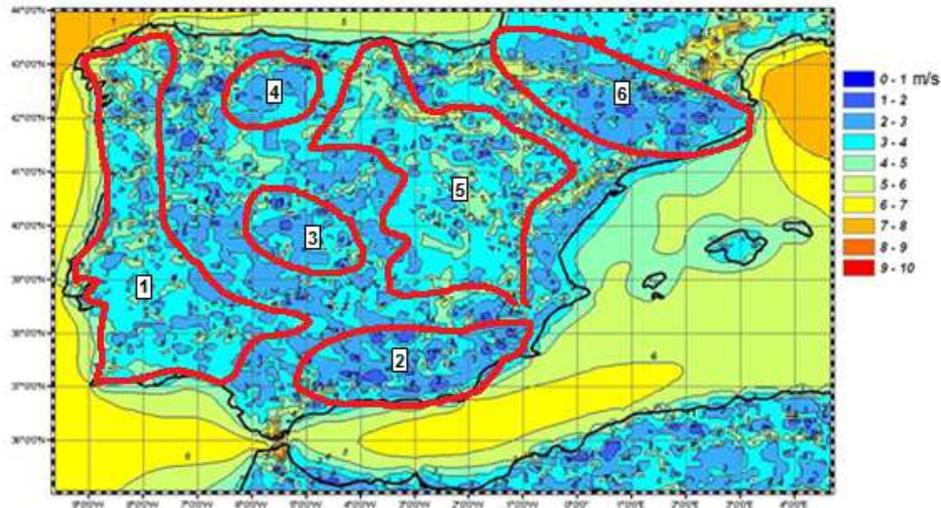
4. Resultados

Validación del viento medio en la PI. En las figuras 1 y 2 se pueden identificar patrones de viento similares en las mismas regiones, tal como se ilustra en la figura 3.

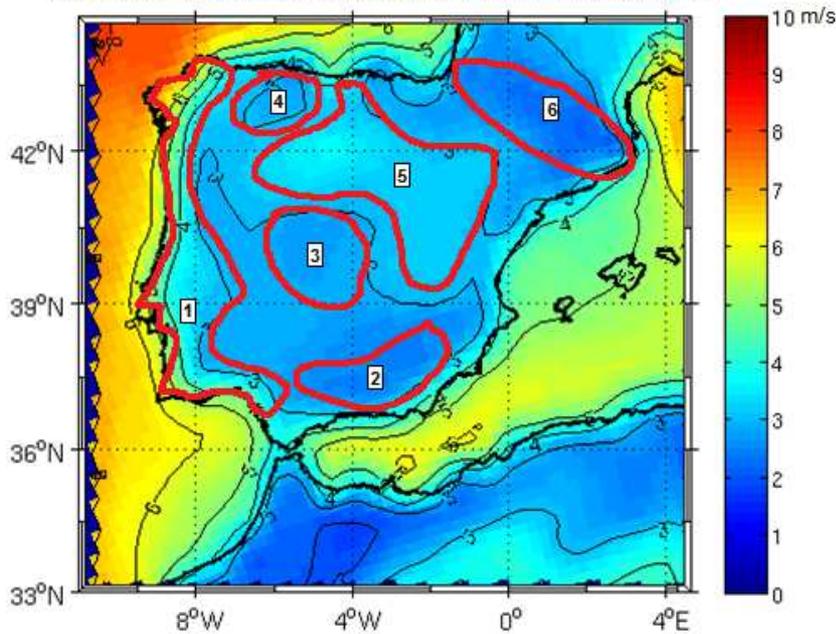
En ambos casos:

- Las zonas 1 y 5 representan vientos altos entre (3-6 m/s)
- Las zonas 2, 3, 4 y 6 representan vientos bajos, entre (0-3 m/s)
- Si consideramos que los resultados de SKIRON son representativos del campo de viento medio de la PI, podemos concluir que ERA-Interim también reproduce satisfactoriamente este campo, ya que los valores medios de

SKIRON y ERA-Interim se diferencian en menos del 3% y ERA-Interim y CENER tienen una distribución espacial parecida y las diferencias entre ambos son fácilmente explicables si se tiene el cuenta que SKIRON tiene resolución de 4,5 Km y la resolución de ERA-Interim es de 25 Km.



Viento anual medio Península Ibérica - ERA Interim 1979-2011



- **Figura 3: Viento Medio Anual de la Península Ibérica. Panel superior: CENER, panel inferior: ERA_Interim**

Estos resultados nos permitieron usar como referencia para validar los modelos la base de datos de ERA-Interim.

PROMES. En la figura 8 se representa el campo de vientos medio anual para la PI durante el periodo 1989-2008 para WRF_A. El promedio espacial es

$$\overline{V_{PROMES}} = 3,6610 \pm 0,4863 \frac{m}{s}$$

Este valor es un 18% más alto que el de ERA-Interim y los intervalos de error de las PROMES y ERA-Interim se solapan. El 49% del rango de error del valor de la velocidad media del modelo PROMES cae dentro del rango de error del valor de la velocidad media de la base de referencia ERA-Interim

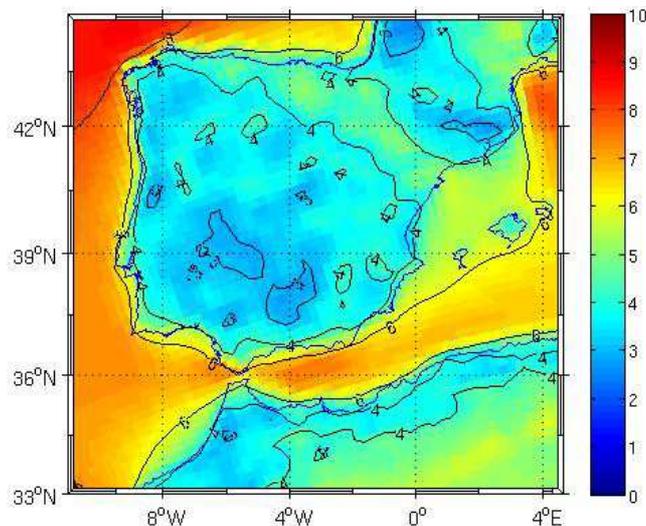


Figura 4: Viento Medio Anual de la Península Ibérica para el periodo de tiempo 1989-2008. Modelo Climático Regional PROMES

La figura 5 muestra la distribución espacial de los vientos simulados por PROMES. El 59% de los puntos ERA-Interim y PROMES están de acuerdo. Es decir si el punto en el modelo es inferior a la media también lo es para ERA_Interim, y lo mismo si el valor del punto es superior a la media. Pero esto no ocurre en el 41% restante.

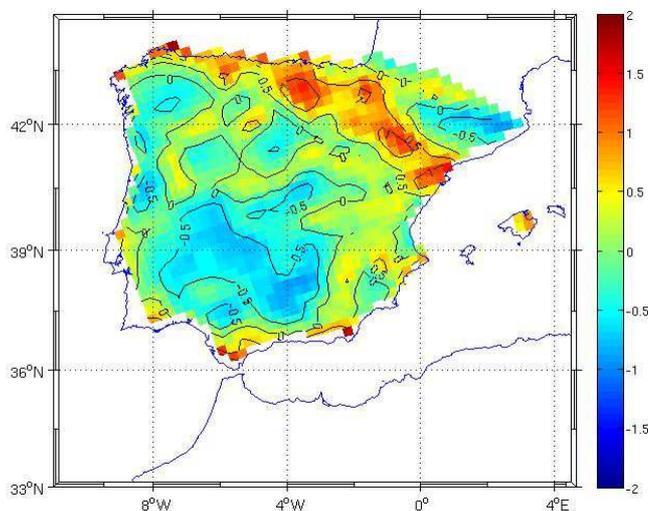


Figura 5: Comportamiento anual medio del campo de velocidades de viento respecto a la velocidad media en la Península Ibérica. PROMES

La Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** permite identificar las zonas de mayor y menor potencial eólico en la Península Ibérica según el modelo PROMES, estas zonas serían:

- Mayor potencial eólico: El valle del Ebro, cornisa Cantábrica, junto con parte de las tierras de Castilla la Mancha, Castilla León, Galicia, costa Atlántica Portuguesa y puntos de la costa mediterránea.
- Menor potencia Eólico: Pirineos Catalanes, zona de Andalucía y Extremadura e interior de Portugal.

WRFA. En la figura 6 se representa el campo de vientos medio anual para la PI durante el periodo 1989-2008 para WRF_A y promedio espacial es

$$\overline{V_{WRFA}} = 4,6579 \pm 0,7025 \frac{m}{s}$$

Los intervalos de error de las medidas de velocidad media del viento del modelo WRF_A y de ERA-Interim no coinciden.

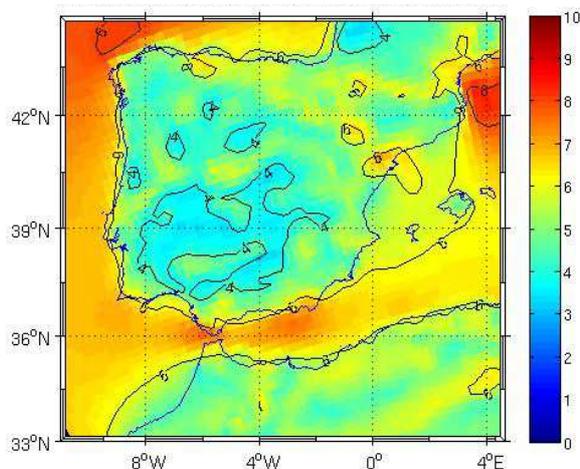


Figura 6: Viento Medio Anual de la Península Ibérica para el periodo de tiempo 1979-2011. Modelo Climático Regional WRF_A

El modelo WRF_A da un campo de vientos anual en promedio en la Península Ibérica de un 50% superior al campo de velocidades de ERA-Interim.

La distribución espacial del campo medio de vientos para WRF_A se ilustra en la figura 7. Para WRF_A el 52% de los puntos coinciden con ERA_Interim.

- Mayor potencial eólico: El valle del Ebro, cornisa Cantábrica, Pirineos, y las costas de la Península Ibérica, excepto la costa atlántica norte de Portugal.
- Menor potencia Eólico: Interior de la Península Ibérica, excepto algún punto del Sistema Central.

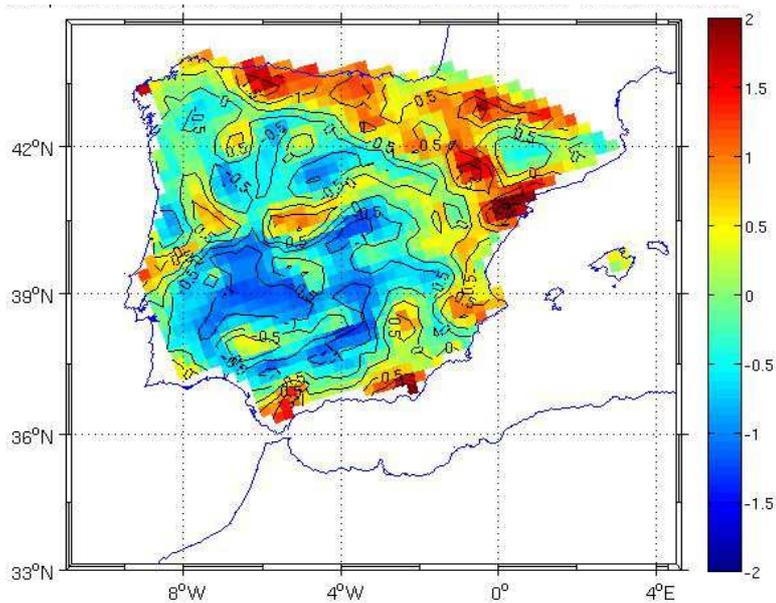


Figura 7: Comportamiento anual medio del campo de velocidades de viento respecto a la velocidad media en la Península Ibérica. WRF_A

WRF_B. El campo de vientos medio anual para la PI durante el periodo 1989-2008 para WRF_B se representa en la figura 8 y su valor medio es

$$\overline{V_{WRF_B}} = 4,2324 \pm 0,6285 \frac{m}{s}$$

a diferencia de WRF_A, los intervalos de error de las medidas de velocidad media del viento del modelo WRF_B y de ERA-Interim sí se solapan, aunque el porcentaje del intervalo de error de la medida del modelo WRF_B que cae dentro del intervalo de error de la medida de la base de datos de referencia ERA_Interim, es de solo un 4%.

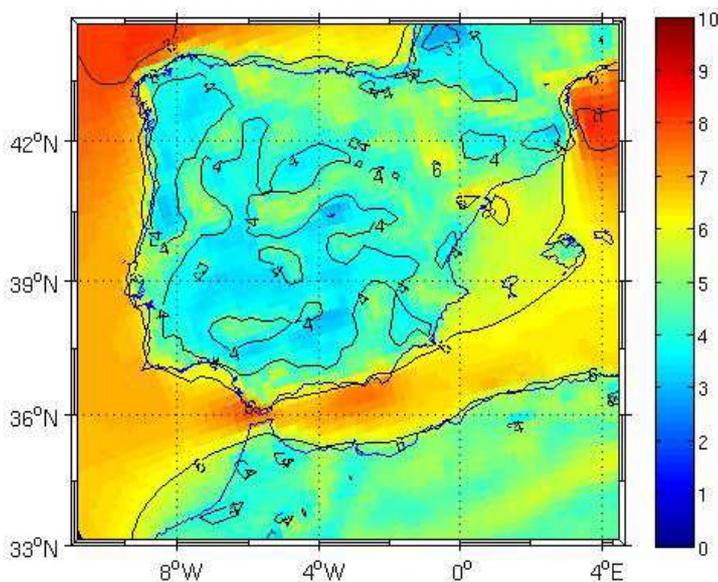


Figura 8: Viento Medio Anual de la Península Ibérica para el periodo de tiempo 1979-2011. Modelo Climático Regional WRF_B

El modelo WRF_B da un campo de vientos anual en promedio en la Península Ibérica superior en un 37% al campo de velocidades de ERA-Interim.

La distribución espacial del viento para el modelo WRF_B prácticamente coincide con la del modelo WRF_A. Hay un 52% de los puntos que coinciden con ERA_Interim.

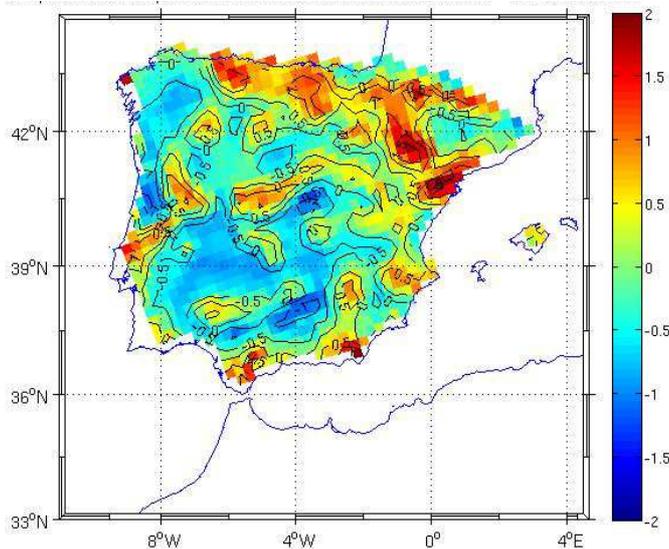


Figura 9: Comportamiento anual medio del campo de velocidades de viento respecto a la velocidad media en la Península Ibérica. WRF_B y ERA-Interim

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver que las zonas de mayor y menor potencial coinciden mayormente con las del modelo WRF_A, teniendo mayor potencial eólico el valle del Ebro, la cornisa Cantábrica, los Pirineos, y las costas de la Península Ibérica, excepto la costa atlántica Gallega y norte de Portugal. En tanto que tiene menor potencia Eólico el interior de la Península Ibérica, excepto algún punto del Sistema Central.

MM5. El campo de vientos medio anual para la PI durante el periodo 1989-2008 para WRF_B se representa en la figura 10 y su valor medio es

$$\overline{V_{MM5}} = 3,8799 \pm 0,4348 \frac{m}{s}$$

En este caso intervalos de error de las medidas de velocidad media del viento del modelo MM5 y de ERA-Interim se solapan, siendo un 24% el porcentaje del intervalo de error de la medida de la velocidad medida del modelo MM5 que cae dentro del intervalo de error de la medida de la base de datos de referencia ERA_Interim. La velocidad del viento medio anual de la Península Ibérica que da el modelo MM5 es un 25% superior al de ERA-Interim.

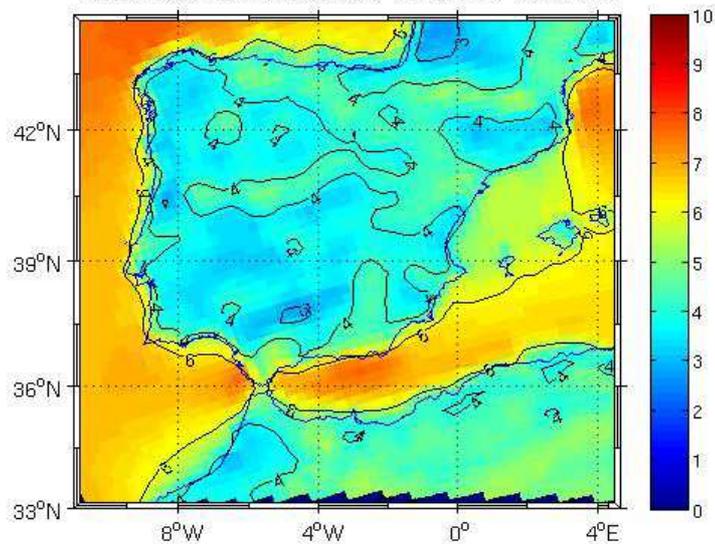
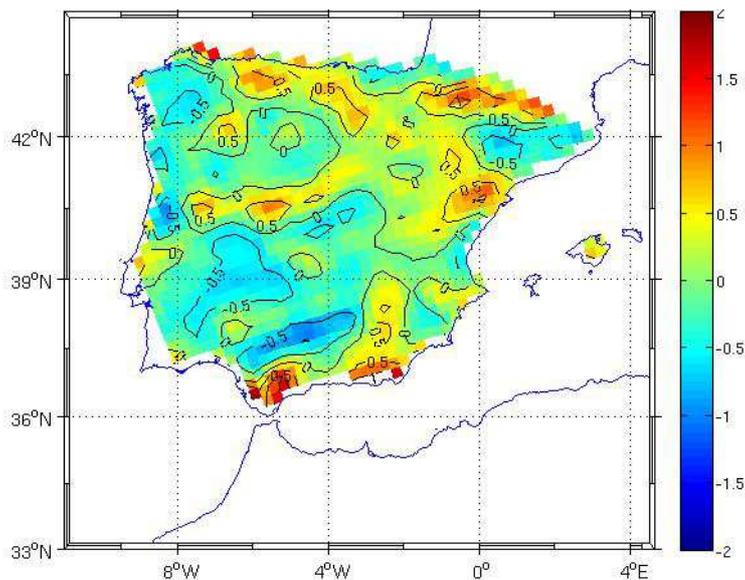


Figura 10: Viento Medio Anual de la Península Ibérica para el periodo de tiempo 1979-2011. Modelo Climático Regional MM5

El comportamiento espacial de MM5 se ilustra en la Figura 11. Para el modelo MM5 el 54% de los puntos coinciden con ERA_Interim

Según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el modelo MM5 permite clasificar distintas zonas de la Península Ibérica según su potencial eólico.

- Mayor potencial eólico: El valle del Ebro, cornisa Cantábrica, Pirineos centrales, y las costas del Sur de la Península Ibérica.
- Menor potencia Eólico: Interior de la Península Ibérica, Galicia, parte de Cataluña.



- **Figura 11:** Comportamiento anual medio del campo de velocidades de viento respecto a la velocidad media en la Península Ibérica. MM5 y ERA-Interim

REMO. La velocidad media del viento anual sobre el territorio peninsular y Baleares durante el período 1989-2008 para REMO es:

$$\overline{V_{\text{REMO}}} = 3,0951 \pm 0,4349 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para este caso el 100% del intervalo de error de la media de la velocidad del viento de la Península Ibérica que da el modelo REMO cae dentro del intervalo de error de la medida de ERA_Interim. Para el modelo REMO la media anual del campo de velocidades del viento Peninsular es un 0,1% inferior a la de ERA-Interim.

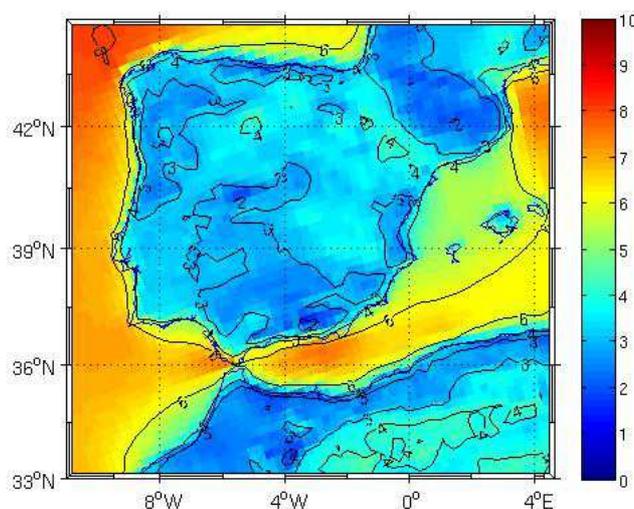


Figura 12: Viento Medio Anual de la Península Ibérica para el periodo de tiempo 1979-2011. Modelo Climático Regional REMO

El comportamiento espacial de REMO se ilustra en la Figura 11. Para REMO el 66% de los puntos coinciden con ERA_Interim.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** permite identificar las zonas de mayor y menor potencial eólico en la Península Ibérica según el modelo REMO, estas zonas serían:

- Mayor potencial eólico: El valle del Ebro, junto con parte de las tierras de Castilla la Mancha, Castilla León, Costa Gallega, costa Atlántica Sur Portuguesa.
- Menor potencia Eólico: Pirineos, zona de Andalucía y Extremadura, e interior del Norte de Portugal, y gran parte de la costa mediterránea de España.

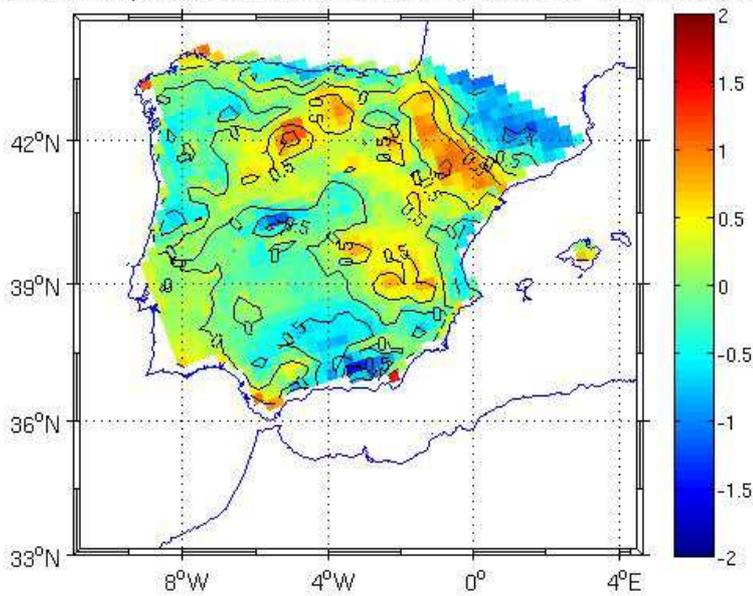


Figura 13: Comportamiento anual medio del campo de velocidades de viento respecto a la velocidad media en la Península Ibérica. REMO y ERA-Interim

Validación del campo de viento con datos observados

Distancia mínima: La media del error medio y la desviación estándar del error medio para cada uno de los modelos se representan en la Tabla 1. El promedio para las diez estaciones es el siguiente

- PROMES: $\overline{\text{err}} = 1,36 \frac{m}{s}$; $\sigma_{\overline{\text{err}}} = 1,17 \frac{m}{s}$
- WRF_A: $\overline{\text{err}} = 1,88 \frac{m}{s}$; $\sigma_{\overline{\text{err}}} = 1,36 \frac{m}{s}$
- WRF_B: $\overline{\text{err}} = 1,60 \frac{m}{s}$; $\sigma_{\overline{\text{err}}} = 1,29 \frac{m}{s}$
- MM5: $\overline{\text{err}} = 1,55 \frac{m}{s}$; $\sigma_{\overline{\text{err}}} = 1,26 \frac{m}{s}$
- REMO: $\overline{\text{err}} = 1,27 \frac{m}{s}$; $\sigma_{\overline{\text{err}}} = 1,12 \frac{m}{s}$

	Santiago Compostela (m/s)	Huelva (m/s)	Granada (m/s)	Ávila (m/s)	León (m/s)	Soria (m/s)	Cuenca (m/s)	Huesca (m/s)
PROMES	0,94±0,82	1,22±0,99	1,40±1,22	1,31±1,10	1,30±1,10	1,36±1,08	1,63±1,26	1,72±1,82

WRF_A	1,48±1,11	1,20±0,97	2,12±1,58	2,40±1,51	1,69±1,22	1,98±1,46	2,41±1,52	1,78±1,52
WRF_B	1,00±0,82	1,14±0,93	1,69±1,45	2,13±1,50	1,52±1,26	1,77±1,38	2,03±1,45	1,52±1,52
MM5	0,96±0,82	1,38±1,08	1,81±1,52	1,72±1,23	1,43±1,13	1,52±1,20	1,92±1,38	1,64±1,69
REMO	0,90±0,78	1,21±0,94	1,09±0,89	1,02±0,82	1,22±1,10	1,26±1,04	1,42±1,20	2,09±2,17

Tabla 1: Error medio y desviación estándar entre las series temporal de valores de velocidades de viento de cada uno de los modelos RCM y la serie temporal de velocidades de viento de la base de datos ECA&D, aplicando el método de *distancia mínima*.

A la vista de los resultados de arriba, y de la Tabla 1 se puede apreciar que el error medio y su desviación estándar asociada son del mismo orden. De media, el valor de la desviación estándar es un 81% del valor del error medio.

Si se compara la media del error medio obtenido para cada uno de los modelos, con la velocidad media anual del viento también para cada uno de los modelos se obtiene:

- PROMES: $\overline{V_{anual}} = 3,6610 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,36 \frac{m}{s}$ → un error relativo=37%
- WRF_A: $\overline{V_{anual}} = 4,6579 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,88 \frac{m}{s}$ → un error relativo=40%
- WRF_B: $\overline{V_{anual}} = 4,2324 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,60 \frac{m}{s}$ → un error relativo=38%
- MM5: $\overline{V_{anual}} = 4,8799 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,55 \frac{m}{s}$ → un error relativo=32%
- REMO: $\overline{V_{anual}} = 3,0951 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,27 \frac{m}{s}$; → un error relativo=41%

Es decir, el error relativo medio asociado a la velocidad del viento anual medio para modelos tipo RCM, es de un **38%**

Los parámetros utilizados para esta interpolación son independientes de los RCM y del tiempo y tienen únicamente un sentido geométrico

Mínimos cuadrados:

	Santiago Compostela (m/s)	Huelva (m/s)	Granada (m/s)	Ávila (m/s)	León (m/s)	Soria (m/s)	Cuenca (m/s)	Huesca (m/s)
PROMES	0,89±0,79	1,06±0,85	1,06±0,89	0,84±0,70	1,21±1,07	1,15±0,98	1,05±1,10	1,48±1,29
WRF_A	0,89±0,76	1,02±0,83	1,01±0,85	0,78±0,65	1,11±0,94	1,12±0,97	1,02±1,07	1,50±1,29
WRF_B	0,88±0,75	1,09±0,86	1,05±0,87	0,79±0,65	1,13±0,98	1,12±0,97	1,02±1,08	1,40±1,25
MM5	0,93±0,80	1,05±0,85	1,10±0,90	0,81±0,67	1,21±1,03	1,22±1,05	1,09±1,13	1,58±1,43
REMO	0,85±0,75	1,00±0,79	1,03±0,86	0,82±0,67	1,17±1,00	1,18±1,02	1,09±1,12	1,50±1,30

Tabla 2: como en la tabla 1 aplicando el método de *distancia mínima*.

La media del error medio y la desviación estándar media del error medio para cada uno de los modelos obtenida a partir de los datos de la Tabla es:

- PROMES: $\overline{\text{err}} = \frac{1,09m}{s}$; $\overline{\sigma_{\text{err}}} = 0,95 \frac{m}{s}$
- WRF_A: $\overline{\text{err}} = 1,05 \frac{m}{s}$; $\overline{\sigma_{\text{err}}} = 0,92 \frac{m}{s}$
- WRF_B: $\overline{\text{err}} = 1,06 \frac{m}{s}$; $\overline{\sigma_{\text{err}}} = 0,93 \frac{m}{s}$
- MM5: $\overline{\text{err}} = 1,12 \frac{m}{s}$; $\overline{\sigma_{\text{err}}} = 0,98 \frac{m}{s}$
- REMO: $\overline{\text{err}} = 1,08 \frac{m}{s}$; $\overline{\sigma_{\text{err}}} = 0,94 \frac{m}{s}$

A la vista de los resultados de arriba, y de la Tabla se puede apreciar que el error medio y su desviación estándar asociada son de la misma magnitud. En promedio, el valor de la desviación estándar es un 87% del valor del error medio.

Ahora si se compara la media del error medio con la velocidad media anual del viento para cada uno de los modelos se tiene lo siguiente:

- PROMES: $\overline{V_{anual}} = 3,6610 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,09 \frac{m}{s}$ → un error relativo=30%
- WRF_A: $\overline{V_{anual}} = 4,6579 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,05 \frac{m}{s}$ → un error relativo=23%
- WRF_B: $\overline{V_{anual}} = 4,2324 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,06 \frac{m}{s}$ → un error relativo=25%
- MM5: $\overline{V_{anual}} = 4,8799 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,12 \frac{m}{s}$ → un error relativo=23%
- REMO: $\overline{V_{anual}} = 3,0951 \frac{m}{s}$; $\overline{err} = 1,08 \frac{m}{s}$; → un error relativo=35%

Es decir, el error relativo medio asociado a la velocidad del viento anual medio para RCM, es de un **27%**, si se aplica la técnica de **mínimos cuadrados usando los datos de los cuatro primeros vecinos** para interpolar la serie temporal de velocidades de viento en un punto.

	Santiago Compost	Huelva	Granada	Ávila	León	Soria	Cuenca	Huesca								
PROM	λ_1	0,0338	λ_1	0,6600	λ_1	0,7951	λ_1	0,0911	λ_1	0,1759	λ_1	0,4539	λ_1	0,2816	λ_1	-2,8187
	λ_2	0,6571	λ_2	-0,6916	λ_2	-0,1603	λ_2	0,7034	λ_2	0,9466	λ_2	-0,1261	λ_2	-0,2515	λ_2	2,2883
	λ_3	0,1116	λ_3	0,6177	λ_3	0,9261	λ_3	-0,3989	λ_3	-0,4956	λ_3	0,1565	λ_3	0,2989	λ_3	-0,1784
	λ_4	0,1447	λ_4	0,4529	λ_4	-0,8539	λ_4	0,3637	λ_4	0,2380	λ_4	0,3676	λ_4	0,3362	λ_4	1,7953
WRF_A	λ_1	-0,1281	λ_1	0,9709	λ_1	-0,0041	λ_1	0,1051	λ_1	0,8028	λ_1	0,1160	λ_1	0,3134	λ_1	-0,7128
	λ_2	0,8818	λ_2	-1,0143	λ_2	0,6383	λ_2	0,5284	λ_2	1,0758	λ_2	0,2036	λ_2	-0,0285	λ_2	1,3479
	λ_3	0,4190	λ_3	-0,1553	λ_3	-0,0399	λ_3	-0,2410	λ_3	-0,7143	λ_3	0,4372	λ_3	0,1541	λ_3	-0,6834
	λ_4	-0,4577	λ_4	0,9507	λ_4	-0,0149	λ_4	0,1986	λ_4	0,3923	λ_4	-0,0783	λ_4	0,0806	λ_4	0,9722
WRF_B	λ_1	0,2124	λ_1	0,9120	λ_1	0,0689	λ_1	0,1219	λ_1	0,3582	λ_1	0,1122	λ_1	0,3590	λ_1	-0,2825
	λ_2	0,8657	λ_2	-0,8732	λ_2	0,6469	λ_2	0,6766	λ_2	1,3438	λ_2	0,0074	λ_2	-0,2566	λ_2	1,0622
	λ_3	0,4559	λ_3	-0,0294	λ_3	-0,0763	λ_3	-0,3641	λ_3	-0,9597	λ_3	0,4722	λ_3	0,2585	λ_3	-0,7671
	λ_4	-0,6685	λ_4	0,7932	λ_4	-0,0030	λ_4	0,2191	λ_4	0,0507	λ_4	0,1491	λ_4	0,2022	λ_4	1,0301
MM5	λ_1	-0,8044	λ_1	1,8182	λ_1	0,3408	λ_1	0,3121	λ_1	1,4007	λ_1	0,6752	λ_1	0,3213	λ_1	-0,3946
	λ_2	1,6816	λ_2	-1,7137	λ_2	0,3926	λ_2	0,6068	λ_2	1,4215	λ_2	-0,5250	λ_2	-0,3609	λ_2	1,5024
	λ_3	0,7024	λ_3	-0,6657	λ_3	0,4280	λ_3	-0,5794	λ_3	-1,3953	λ_3	0,0790	λ_3	0,3403	λ_3	-1,0876
	λ_4	-0,5770	λ_4	1,4336	λ_4	-0,5193	λ_4	0,3127	λ_4	-0,4439	λ_4	0,6040	λ_4	0,3242	λ_4	1,1389
REMO	λ_1	0,7296	λ_1	1,0633	λ_1	0,3746	λ_1	-0,0486	λ_1	0,8970	λ_1	0,1973	λ_1	0,5913	λ_1	-2,1719
	λ_2	0,4586	λ_2	-1,0066	λ_2	0,6995	λ_2	0,7813	λ_2	1,9071	λ_2	0,0032	λ_2	-0,1302	λ_2	2,7643
	λ_3	0,2963	λ_3	-0,7222	λ_3	-0,2549	λ_3	-0,3413	λ_3	-1,1538	λ_3	0,5260	λ_3	0,0977	λ_3	-1,4107
	λ_4	-0,3726	λ_4	1,0038	λ_4	0,2550	λ_4	0,4137	λ_4	-0,6451	λ_4	0,2176	λ_4	0,1588	λ_4	2,5916

Tabla 2: Valores de los coeficientes de la combinación lineal al aplicar el método de mínimos cuadrados a los cuatro primeros vecinos del punto a interpolar, para cada uno de los modelos RCM.

Los parámetros utilizados para esta interpolación son independientes del tiempo pero dependen de los RCM.

5. Conclusiones

Los RCM reproducen adecuadamente, sobre todo REMO, el patrón espacial de viento, lo cual les hace útiles para estudiar la evolución del potencial eólico en las regiones

interesantes en un futuro condicionado por el cambio climático, ya que son capaces de identificar las regiones con mayor potencial eólico. Por ejemplo, el estrecho de gibraltar es una zona a priori muy interesante para la implantación de la energía eólica sea cual sea el modelo empleado. Luego para conocer el potencial eólico con mayor detalle ya se emplearán otras técnicas y modelos.

Los errores de los modelos, también se puede decir que dependen enormemente de la complejidad del terreno. Así por ejemplo los modelos WRF y MM5 presentan mayor diferencia con lo otros en zonas como los Pirineos. Es decir zona de terreno muy complejo.

Los resultados obtenidos para el viento medio en la península se pueden resumir en la siguiente tabla

ERA-Interim	PROMES	WRFA	WRFB	MM5	REMO
Velocidad_media (m/s)					
3,0985±0,5539	3,6610±0,4863	4,6579±0,7025	4,2324±0,6285	3,8799±0,4348	3,0951±0,4349

Tabla 3: Velocidades medias anuales del viento para la Península Ibérica y Baleares, según RCM y ERA-Interim

Según la Tabla 3 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Excepto para WRFA, para todos los demás RCM del Ensemble del proyecto ESCENA, el intervalo de error de su velocidad media intercepta, como mínimo en parte, el intervalo de error de la velocidad media anual de ERA-Interim para la Península Ibérica y Baleares.
- El error relativo asociado a la velocidad media anual del viento para la Península Ibérica para cada RCM del Ensemble de ESCENA oscila entre el 11% y el 15%.

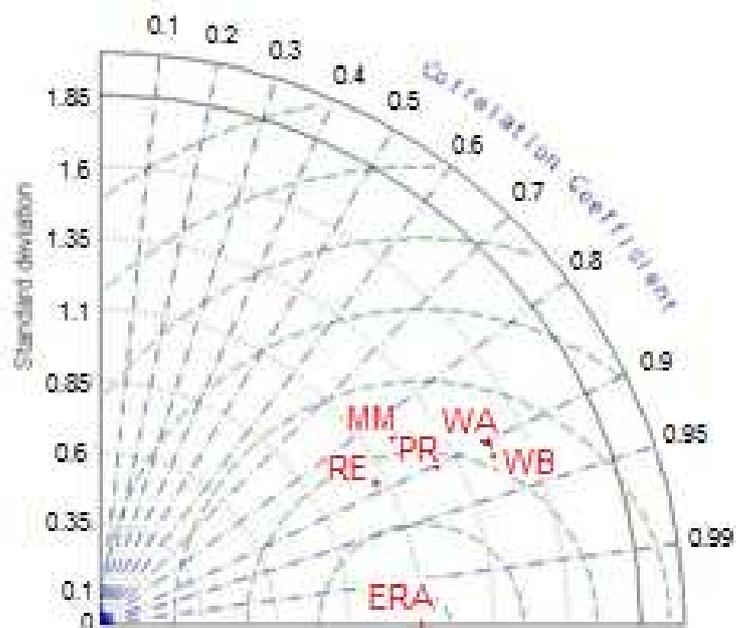


Figura 14: Diagrama de Taylor de vientos diarios para el periodo 1989-2008 de la velocidad del viento para la Península Ibérica para los RCM de Ensemble ESCENA tomando como referencia ERA-Interim

En la Figura 14 se representa el diagrama de Taylor de las medias diarias de la velocidad del viento para el periodo 1989-2008 en la Península Ibérica para los RCM del Ensemble ESCENA tomando como referencia ERA-Interim en la que se puede apreciar que la correlación entre los distintos modelos y ERA-Interim es alta, superior a 0,8, con una desviación estándar del mismo orden que la de referencia.

Por otro lado si se estudia si los RCM son capaces de identificar las zonas de mayor y menor potencial eólico, se tiene para la Península Ibérica y para los RCM del proyecto ESCENA se obtiene lo siguiente.

Modelo: PROMES		
Mayor potencial eólico	El valle del Ebro, junto con parte de las tierras de Castilla la Mancha, Castilla León	Coincide Figura 3
	Cornisa Cantábrica	No Coincide Figura 3
	Puntos de la costa mediterránea	No Coincide Figura 3
	Costa Atlántica Portuguesa y Galicia	Coincide Figura 3
Menor potencia eólico	Pirineos Catalanes	Coincide parcialmente Figura 3
	Andalucía y Extremadura	Coincide Figura 3
	Interior de Portugal	Coincide Figura 3

Modelo: WRFA

Mayor potencial eólico	El valle del Ebro,	Coincide Figura 3
	Cornisa Cantábrica	No Coincide Figura 3
	Pirineos	No Coincide Figura 3
	Costas Península Ibérica, excepto costa Norte Portuguesa	Coincide Figura 3
Menor potencia eólico	Interior Península Ibérica	Coincide parcialmente Figura 3

Modelo: WRFB		
Mayor potencial eólico	El valle del Ebro,	Coincide Figura 3
	Cornisa Cantábrica	No Coincide Figura 3
	Pirineos	No Coincide Figura 3
	Costas Península Ibérica, excepto costa Norte Portuguesa	Coincide Figura 3
Menor potencia eólico	Interior Península Ibérica	Coincide parcialmente Figura 3

Modelo: MM5		
Mayor potencial eólico	El valle del Ebro,	Coincide Figura 3
	Cornisa Cantábrica	No Coincide Figura 3
	Pirineos Centrales	No Coincide Figura 3
	Costas del Sur de la Península Ibérica	Coincide parcialmente Figura 3
Menor potencia eólico	Interior Península Ibérica	Coincide parcialmente Figura 3

Modelo: REMO		
Mayor potencial eólico	El valle del Ebro, junto con parte de las tierras de Castilla la Mancha, Castilla León	Coincide Figura 3
	Costa Gallega	Coincide Figura 3
	Costa Atlántica Sur Portuguesa	Coincide Figura 3
Menor potencia eólico	Pirineos	Coincide Figura 3
	Zona de Andalucía y Extremadura, e interior del Norte de Portugal	Coincide parcialmente Figura 3

	Costa mediterránea de España.	Coincide Figura 3
--	-------------------------------	-------------------

Se puede concluir que los modelos RCM son herramientas útiles para determinar los potenciales eólicos medios de una zona, con periodicidad anual. Dan valores medios razonables que caen dentro del rango de error de las bases de datos que habitualmente se toman como referencia, por ejemplo ER-Interim. Y el error asociado a estas velocidades medias no supera el 15%. Son capaces de discernir las zonas de mayor y menor potencial eólico, aunque con determinadas limitaciones. Así para el caso estudiado, todos los modelos identifican el valle del Ebro como una zona de gran potencial eólico, pero cometen errores en otras zonas. Luego como se dijo antes los RCM son herramientas útiles para determinar el potencial eólico medio anual de una zona pero con limitaciones y con margen de mejora.

6. Bibliografía.

- [1] A.F. Pereira de Lucena et Al. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. *Renewable Energy* 2010; 35:904-912.
- [2] Gerraud RD, Falvey M. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *International Journal of Climatology*. 2009; 29:543-54.
- [3] Brewslow PB, Sailor DJ. Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States. *Renewable Energy* 2002;27:585-98.
- [4] SailorDJ, Smith M, Hart M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Renewable Energy* 2008;23:393-406.
- [5] Bloom A., Kotroni V., Laguardos K. Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2008; 8(6):1249-57.
- [6] S.C. Pryor, R.J. Barthelmie, E. Kjellstrom. Analyses of the potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe using output from a Regional Climate Model. *Climate Dynamics* 2005; 25:815-35.
- [7] Julien Najac, Julien Boé, Laurent Terray A multi-model ensemble approach for assessment of climate change impact on surface winds in France. *Climate Dynamics* 2009; 32:615-634.

[8] Joan Aymamí, Alejandro García, Oriol Lacave, Llorenç Lledó, Miguel Mayo, Santi Parés de Météosim Truewind. Análisis del Recurso. Atlas eólico de España. IDAE.

[9] Martín Gastón, Edurne Pascal, Laura Frías, Ignacio Martí, Uxue Irigoyen, Elena Cantero, Sergio Lozano, Yolanda Loureiro Wind resources map of Spain mesoscale. Methodology and validation. Wind Energy Department, National Renewable Energy Center (CENER)

[10] M. L. Martín, F. Valero², A. Morata, M. Y. Luna³, A. Pascual . Springtime coupled modes of regional wind in the Iberian Peninsula and large-scale variability patterns. I.J. of Climatology. 2010, DOI: 10.1002/joc.2127

[11] Marta Domínguez, Raquel Romera¹, Enrique Sánchez, Lluís Fita, Jesús Fernández, Pedro Jiménez-Guerrero, Juan Pedro Montávez, William David Cabos, Giovanni Liguori, and Miguel Ángel Gaertner. Present climate precipitation and temperature extremes over Spain from a set of high resolution RCMs.