

UniversidadeVigo

Estudio del potencial eólico en la Península Ibérica

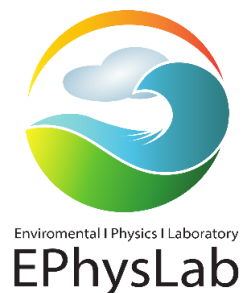


Iván Domínguez Serantes

Grado en Ciencias Ambientales

Departamento de Física Aplicada

Julio, 2016



Dra. M^a Teresa de Castro Rodríguez y Dr. Ramón Gómez Gesteira, profesores titulares del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo

INFORMAN:

Que el trabajo titulado "**Potencial eólico en la península Ibérica**" presentado por **D. Iván Domínguez Serantes, con D.N.I.: 39456900D**, ha sido realizado bajo nuestra dirección en el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y se autoriza su presentación como **Trabajo Fin de Grado** del **Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense, 20 de Julio de 2016

Dra. M^a Teresa de Castro Rodríguez

Dr. Ramón Gómez Gesteira

ÍNDICE

Índice

INTRODUCCIÓN	3
1. Consumo energético mundial	3
2. Energías renovables	4
2.1 Potencial eólico	4
3. Potencial eólico en tierra (onshore).....	5
3.1 Panorama actual	5
4. Potencial eólico en el mar (offshore).....	7
4.1 Panorama actual	7
5. Potencial eólico en el Océano Atlántico de la Península Ibérica	7
6. Impacto del cambio climático en el potencial eólico	8
6.1 En Europa	9
6.2 En la Península Ibérica.....	11
JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	15
MATERIAL Y MÉTODOS	19
1. Materiales	19
1.1 CORDEX ("Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment").....	19
1.2 MatLab	20
2. Métodos	20
2.1 Potencial eólico	20
2.2 Elección de modelos.....	21
2.2.1 Modelos descartados	22
2.3 Periodos Temporales.....	24
2.4 Tendencia anual y mensual	24
2.5 Consenso modelos	24
RESULTADOS	27
1. Diferencia de periodos	27
1.1 Futuro próximo – Periodo referencia.....	27
1.2 Futuro lejano – Periodo referencia	28
2. Tendencia	29
2.1 Tendencia anual	30
3. Consenso	31
3.1 Periodo 2030 – 2059	32
3.1.1 Incremento	32
3.1.2 Decrecimiento	32

3.2 Periodo 2070 - 2099	33
3.2.1 Incremento	33
3.2.2 Decrecimiento	33
4. Consenso mensual.....	33
4.1 Periodo 2030 – 2059	34
4.1.1 Incremento	34
4.1.2 Decrecimiento	34
4.2 Periodo 2070 - 2099	36
4.2.1 Incremento	36
4.2.2 Decrecimiento	36
DISCUSIÓN.....	41
CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS.....	49

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

1. Consumo energético mundial

La situación energética actual hace indispensable la búsqueda de maneras más eficientes y sostenibles de obtener energía a partir del entorno que nos rodea. La opinión pública, cada vez más concienciada sobre el grave deterioro de las condiciones del medio, brinda la posibilidad a las empresas de invertir en tecnologías limpias, mejorando su imagen de cara al exterior y de obtener beneficios derivados del sector energético. El aprovechamiento de los recursos renovables supone grandes ventajas competitivas frente a los tradicionales combustibles fósiles; la disminución total en la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI's), la disminución de la dependencia energética (lo que conlleva al aumento de la seguridad energética de un país) y a un aumento del desarrollo tecnológico.

A nivel global la demanda energética por parte de los países desarrollados y en gran medida por parte de los países emergentes aumenta anualmente y se prevé que esta subida sea sostenida en el tiempo o incluso aumente drásticamente (un 40% respecto a la actualidad según la "World Wind Energy Association, (WWEA)". A día de hoy las fuentes fósiles siguen predominando la producción energética y la tendencia indica que no va a variar considerablemente en las próximas décadas, debido a los continuos avances tecnológicos para su extracción, transporte y procesamiento ("WORLD ENERGY COUNCIL", Resumen 2013). El panel intergubernamental por el cambio climático (IPCC) prevé que las políticas adoptadas por los distintos gobiernos no contrarrestarán en ningún nivel o serán insuficientes para detener la subida de concentración de los GEI de las últimas décadas, sino se apuesta fuerte por energías sostenibles con el medio y se deja paulatinamente la dependencia de las economías globales de las energías tradicionales nocivas con el medio ambiente.

En el ámbito europeo, la explotación de energías renovables puede ser un gran factor para el cumplimiento de las políticas comunitarias e internacionales encaminadas hacia la disminución de los GEI's y el aumento de la producción y consumo de energías sostenibles. Políticas que derivaron en el objetivo 20 - 20 - 20 (marzo, 2007). Esto se traduce en que para el año 2020 se espera que dentro del *mix* energético comunitario, el 20% provenga de fuentes limpias, un descenso del 20% en las emisiones efecto invernadero, y, por último, mejorar la eficiencia energética un 20%. Todas estas políticas son de dudoso cumplimiento por parte de la mayoría de los países adheridos.

A nivel nacional, España produce 2/3 del total de la energía a partir de combustibles fósiles; importados en su mayoría y quemados en centrales termoeléctricas, seguido de la energía nuclear, con el gran problema del almacenamiento de los residuos y, finalmente, sólo el 16% se produce a partir de energías renovables (“Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía”, (IDAE)) de los cuáles 23000 MW corresponden a la energía eólica. Sin embargo, el país es pionero tanto en la producción como exportación de tecnología relacionada con energías limpias.

2. Energías renovables

Las energías renovables son todas aquellas cuyos recursos permanecen inagotables en el tiempo y su aprovechamiento puede ser duradero; siguen siendo tecnologías de continua expansión y perfeccionamiento. Actualmente representan el 10% del mix energético total global y para el año 2035 la Agencia Internacional de Energía (IEA) prevé que el sector renovable ocupe el 30% del *mix* total, sobrepasando al gas natural y situándose a la par con el carbón en la producción de la energía eléctrica.

Dentro de las energías renovables destacan las que usan la energía cinética del viento para la producción de electricidad; sistema limpio, asequible y respetuoso con el medio, así como las que aprovechan la radiación solar (centrales fotovoltaicas) o el potencial del agua (centrales hidroeléctricas).

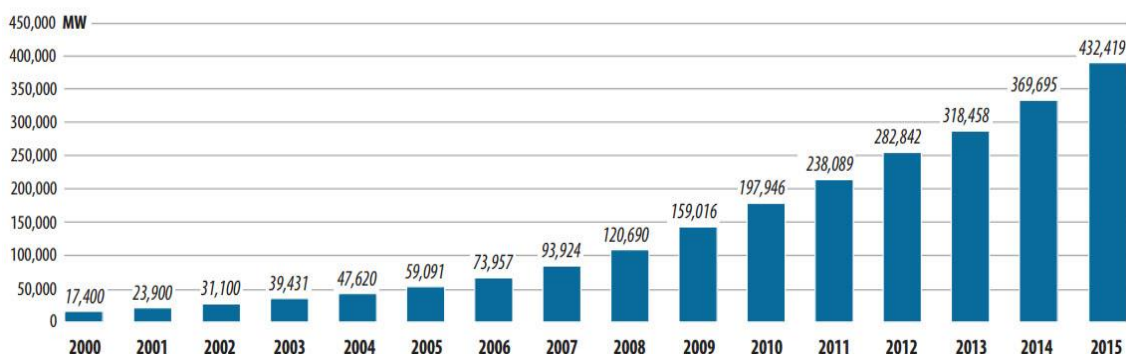
2.1 Potencial eólico

La energía que proporcionan las masas de aire en movimiento es altamente aprovechable en determinadas regiones y condiciones temporales. Los movimientos expansivos y convectivos de las masas de aire calentadas por la radiación proveniente del Sol generan gradientes de presión, lo que da resultado a los movimientos del aire, el viento. Al ser un recurso sujeto a variaciones climáticas, su estudio resulta fundamental para prever su variación en décadas futuras y anticiparse para desarrollar infraestructuras capaces de aprovechar la energía que ofrece en aquellos emplazamientos más idóneos en un futuro inmediato.

Según datos del “*Global Wind Energy Council (GWEC)*” la energía eólica instalada en el mundo se sitúa en torno a los 433 MW (Figura 1) cubriendo un 4% de la demanda total de energía, y se espera que esta cantidad aumente a mediados de siglo XXI (WWEA). La mayor parte de países productores se sitúa en la franja de los países denominados desarrollados o emergentes, situando a China como su gran exponente y seguido por Estados Unidos, algunos países de la Unión Europea (Alemania, España, ...) e India en la producción de energía eléctrica a partir del

viento. Zonas como África y América Latina se consideran en gran parte poco desarrollados; con tecnología e infraestructuras poco maduras respecto a los países punteros.

Potencia eólica acumulada instalada en el mundo (2000-2015)



Fuente: GWEC

3. Potencial eólico en tierra (onshore)

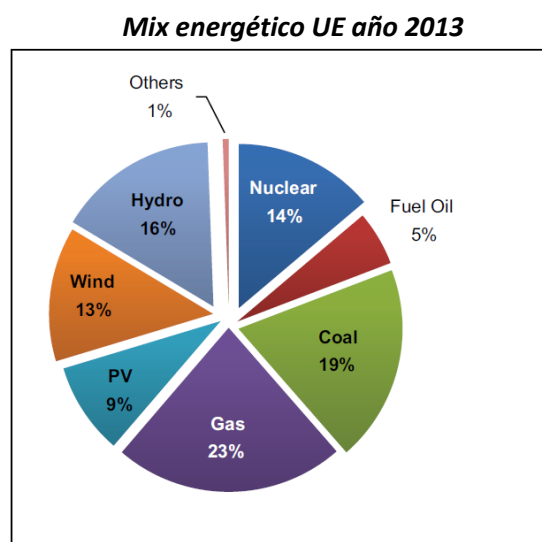
A raíz de la crisis del petróleo de principios de 1970, las grandes potencias mundiales se dieron cuenta de la inseguridad energética que sufrían por la exclusiva dependencia de los hidrocarburos. Esto llevó a las compañías eléctricas a fijar su atención en los aerogeneradores para el abastecimiento eléctrico. Aunque los aerogeneradores primitivos ya llevaban funcionando desde finales del siglo XIX, se empezaron a desarrollar los primeros aerogeneradores para la producción de electricidad en grandes cantidades (Nibede 630 kW), estos resultaron ser costosos y limitados en cuanto a su productividad, pero dieron pie a la investigación y desarrollo de modelos cada vez más sofisticados y rentables, reduciendo costes de operación, y por consiguiente mejorando su competitividad frente a los hidrocarburos.

3.1 Panorama actual

Hoy en día los parques eólicos abundan en los países que apostaron por implementar el uso del viento para complementar su *mix* energético, y los aerogeneradores se consideran ya una tecnología casi en su límite de desarrollo, abasteciendo una fracción del total de la energía requerida para la sustentación económica del país.

En el mundo, China es de lejos el país que cuenta con más instalaciones eólicas, sumando una capacidad aproximada de 97 GW, seguida por los Estados Unidos e India (WWEA), y se prevé que la capacidad instalada se magnifique considerablemente hacia mediados de siglo para paliar el continuo aumento de la demanda energética.

Las políticas medioambientales llevadas a cabo por la Unión Europea, tanto legislativas como económicas, impulsaron el crecimiento del sector eólico en todos los niveles, transformando el continente en la región del planeta con mayor concentración de parques eólicos. En el año 2013 la UE contaba con una potencia total instalada de 110.7 GW *onshore* lo que representa alrededor del 8% del total en el consumo energético (WWEA). Países como Alemania, Dinamarca y España encabezan el ranking de producción eléctrica a partir del viento.



Fuente: WWEA

A nivel nacional, España fue uno de los países pioneros en la instalación y desarrollo de los parques eólicos, ya hace más de 30 años. Cuenta con una potencia total acumulada de aproximadamente 23 GW repartidos en 1077 parques por toda la península en el año 2015 (Asociación Empresarial Eólica, AEE). Todo esto hace que el potencial eólico en España cubra el 20% de la demanda total del país, convirtiéndose en la tercera fuente de energía, por detrás de los combustibles fósiles, limitando su fuerte dependencia, y detrás de la energía nuclear.

Como se ha mencionado anteriormente, las grandes ventajas del sector eólico *onshore* es la limpieza con el medio que derivan de su uso, la creación de riqueza en el país, el coste cada vez menor de su explotación, el aumento de la competitividad frente a otras fuentes más nocivas, y se presenta como un claro indicador del grado de desarrollo de un país.

Los principales inconvenientes del aprovechamiento del recurso eólico en tierra es la falta de disponibilidad constante del viento, las limitaciones en su funcionamiento (la imposibilidad de mover las palas de los aerogeneradores a muy bajas y muy altas tasas de viento), así como el alto coste de producción y la falta de almacenamiento energético. Esto hace que las ubicaciones rentablemente idóneas (zonas geográficas altas con fuertes movimientos de aire) sean cada vez más escasas.

Ante esta situación las investigaciones actuales se centran en el aprovechamiento del potencial eólico del mar (tecnologías *offshore*), parques eólicos en emplazamientos marinos, dónde la presencia del viento sea alta y continua en el tiempo. Diferentes estudios constatan su viabilidad y rendimiento económico a largo plazo frente a las estaciones terrestres.

4. Potencial eólico en el mar (offshore)

4.1 Panorama actual

A nivel mundial la tecnología *offshore* está en estudio permanente, en busca de los emplazamientos más adecuados en las costas de los países interesados. Actualmente las zonas constatadas como más idóneas para la colocación de parques marinos se sitúan en el Mar Negro, en la costa Atlántica de la península Ibérica, en el norte de Norte América, zonas focalizadas en el mar Mediterráneo, norte de Europa y en las costas noreste de Asia (WWEA).

En Europa el aprovechamiento del mar para la producción de energía está en auge desde finales del siglo XX; países como Reino Unido, Dinamarca, Holanda y Suecia se posicionaron como líderes en la producción eléctrica *offshore* a partir de parques eólicos situados en sus dominios marinos. En total la Unión Europea cuenta con 6 GW de potencia acumulada *offshore*; y se espera que para el año 2020 la energía eólica *offshore* en Europa sea alrededor del 30% del total de las eólicas instaladas ("*European Association Wind Energy*", EAWE).

En España por el contrario es una tecnología escasamente implementada a pesar de contar con zonas con alta probabilidad de ser viables, como es el caso de la costa gallega, las Islas Canarias o el golfo de Cádiz. Los inconvenientes del litoral español se basan en la elevada profundidad de sus 8000 km de costas, limitando la instalación de los aerogeneradores en el lecho marino.

Las ventajas que ofrece la colocación de los aerogeneradores en la costa frente a los situados en tierra es la mayor disponibilidad constante de viento, lo que deriva en una producción eléctrica bruta mayor y por consiguiente un mayor rendimiento económico a largo plazo, también cabe destacar la mejora en la distribución de la electricidad hacia zonas con más demanda eléctrica (puertos y ciudades costeras).

Sin embargo, los escollos para su implementación son muy variados, destacando las dificultades técnicas de la tecnología actual (anclaje de aparatos, vida útil, condiciones marinas, etc.), el impacto en los ecosistemas marinos, el elevado coste de inversión y retorno de beneficios a largo plazo, y por último cambios del potencial eólico en los decenios venideros. Esto hace pensar que la tecnología *offshore* se debe tener muy en cuenta más en un futuro inmediato que en el presente, esperando que los avances en el sector, así como la previsión temporal y espacial, permitan asegurar el rendimiento y la eficiencia necesaria para su instalación (WWEA).

5. Potencial eólico en el Océano Atlántico de la Península Ibérica

La costa Atlántica de la península Ibérica está compuesta por Portugal y la comunidad autónoma de Galicia. La plataforma continental tiene como característica principal su estrechez y el

aumento brusco de profundidad pasado unas decenas de kilómetros, lo que complica la instalación de aerogeneradores anclados al lecho marino.

La comunidad autónoma de Galicia está situada al noroeste de la Península Ibérica. Con un clima oceánico y una superficie de 29.574 km², cuenta con más de 160 parques eólicos terrestres distribuidos por toda la geografía gallega con una producción total de 3.000 MW. y alrededor del 14,5% de la producción eólica total a nivel nacional.

La costa gallega se extiende a lo largo de 1500 km y la subdivisión Noroeste-Atlántico abarca 8.316 km² (Proyecto MEC, Universidad de Sevilla), sin embargo, el potencial eólico marino esta escasamente desarrollado e implementado.

Portugal está situado en el resto de la franja Atlántica, ocupando una extensión de 1800km de costa y una superficie de 92.391 km². Posee un clima mediterráneo, aunque con fuertes variaciones en función de la zona. En su haber, cuenta con más de 270 parques eólicos terrestres con más de 4.000 MW de capacidad. En cuanto al mar se refiere, posee el único parque eólico *offshore* de la península Ibérica, situado frente a la costa de Viana do Castelo. Este parque *offshore* cuenta con aerogeneradores con una potencia total 25 MW, a 10 km de la costa y anclados a 100 m de profundidad. Próximamente se estudia la viabilidad para abrir más plantas a lo largo de la costa portuguesa.

Como conclusión a los datos anteriores podemos destacar el escaso aprovechamiento para la instalación de parques eólicos *offshore* a lo largo del litoral Atlántico y la búsqueda de otros puntos de especial interés.

6. Impacto del cambio climático en el potencial eólico

Los distintos estudios acerca de los cambios del comportamiento del potencial eólico en los futuros inmediatos y próximos, se basan en el análisis de datos de modelos de predicción proporcionados por las distintas instituciones a partir de la extrapolación de los modelos de clima global (GCM's) a modelos de clima regional (RCM's), discretizando espacialmente con celdas de menor tamaño.

En la Unión Europea el proyecto PRUDENCE nació con el objetivo de generar datos a escala regional a partir de los modelos de clima global, usando periodos discontinuos de 30 años. Con una escala espacial horizontal de 50x50 km, pretende proveer datos climáticos por cada 50 km y de ahí su principal inconveniente, la escala espacial resulta ser demasiado grande para zonas y regiones pequeñas dónde se necesite una mayor precisión y cantidad de datos. Finalizó en el año 2004 y su sucesor es el denominado ENSEMBLES. El proyecto ENSEMBLES usa periodos

continuos de hasta 150 años y varía la escala espacial hasta un tamaño de 25x25 km de condiciones de contorno, mejorando la precisión y obtención de datos.

ENSEMBLES consiste en una técnica de regionalización dinámica donde se aplican un conjunto de multimodelos de simulaciones, analizando características comunes dentro de varios RCM's. Un ejemplo se da en comparar distintos RCM's con el modelo AOGCM (*"Atmosphere-Ocean Global Climate Model"*) base, con las mismas condiciones de emisiones y variables, la diferencia resultante muestra el grado de incertidumbre asociado al modelo.

Sin embargo, ENSEMBLES presenta un grado de incertidumbre inherente en función de la concordancia con los datos de origen derivados por los conjuntos de modelos de donde provienen, es decir, a mayor concordancia entre los valores originales de los modelos con el AOGCM menor es el grado de incertidumbre. Así se da que fenómenos meteorológicos excepcionales plasmados en un modelo, a la hora de ensamblarlos con los demás, da un grado de incertidumbre más elevado. Una manera de evitar un grado mayor de incertidumbres la correcta elección del AOGCM o bien considerar el anidamiento en un conjunto de diferentes AOGCMs para tener en cuenta la incertidumbre asociada a éstos (*"Escenarios regionales de cambio climático"*). El recurso eólico es en gran medida susceptible a la variación de las escalas temporales y espaciales utilizadas, esto es, la circulación atmosférica varía en función de la región estudiada. Una elección equívoca en la resolución espacial del modelo, provocará resultados finales distorsionados e inútiles a la hora de analizar el potencial eólico futuro en una determinada región.

Actualmente el proyecto CORDEX se crea con la finalidad de integrar los modelos RCM en aquellos puntos aun no estudiados del planeta. Patrocinado por el programa WCRP (*"World Climate Research Program"*), el proyecto CORDEX pretende generar escenarios climáticos globalmente, mejorando su resolución espacial (hasta casi llegar a los 10km de malla en Europa), avanzar en el desarrollo y aplicación de modelos climáticos regionales con acoplamiento atmósfera-océano sobre la región mediterránea (desarrollo de los modelos regionales del Sistema – Tierra) y reducir incertidumbres asociadas a los GCM's.

6.1 En Europa

Dentro del marco PRUDENCE, Pryor et al. (2005) realizaron el estudio del impacto del cambio climático en la variación de la energía y del potencial eólico en el norte de Europa, utilizando para ello un modelo de clima regional (RCAO) y usando condiciones de contorno derivados de los GCM's ECHAM4/OPYC3 y HadAM3H. En este estudio se consideraron los escenarios de emisión A2 y B2 del IPCC, se tomó un periodo de control que abarca desde 1961 hasta el año

1990 y se hizo una proyección de futuro entre los años 2071 – 2100. Los resultados obtenidos reflejaron un aumento en la velocidad del viento con respecto al periodo control, así como un incremento en el recurso eólico para el periodo estudiado, más notorio en el escenario de emisión A2.

Bloom et al. (2008) a partir del modelo climático regional PRECIS estudiaron la variación de la disponibilidad energética eólica para finales de siglo XXI en las zonas del mar Mediterráneo. Dentro del escenario A2 y con una resolución horizontal de 25 km, compararon una muestra control (periodo 1960 – 1990) y la cotejaron con el periodo 2071 – 2100. Los resultados obtenidos mostraron un aumento en la velocidad del viento alrededor de las zonas terrestres, y un decrecimiento en el este del mar Mediterráneo, a excepción del mar Egeo. Cabe destacar que el estudio encontró una importante estacionalidad en los resultados, en los meses de Diciembre Enero y Mayo se puede apreciar la disminución en los valores obtenidos y un notable aumento durante los meses de Abril, Agosto y Diciembre en el mar Egeo.

A partir de ENSEMBLES Kjellstrom et al. (2011) analizó, entre otros parámetros, la estacionalidad de la velocidad del viento utilizando 16 modelos de clima regional, para evaluar el clima simulado en el periodo 1961 – 1990 y el futuro 2071 – 2100. En este análisis se ilustraron las incertidumbres en el cambio climático a partir de las condiciones naturales de emisiones en Europa bajo el escenario A1B. Como conclusión destacaron la disminución de la velocidad del viento en las estaciones de invierno a lo largo del mar Mediterráneo y el aumento durante los meses de verano. El factor a tener en cuenta en los resultados finales fue la elección del GCM, demostrando significantes variaciones en la velocidad del viento en función del GCM escogido.

Koletsis et al. (2016) analizaron datos a partir de 6 modelos de clima regional, 5 de ellos en el escenario A1B y uno en el escenario de emisión A2. Estos modelos estaban basados en 3 RCM's diferentes y a su vez de 4 modelos de clima global. La región de estudio se concretó en el sur de Europa, el mar Mediterráneo y el mar Negro. Los periodos temporales escogidos se dividieron en dos futuros próximos, el futuro inmediato (2021-2050) y el futuro lejano (2061 – 2090) y por último se compararon con el periodo de referencia (1961-1990). Los resultados arrojaron el incremento del potencial eólico en la mayoría de las zonas a excepción de la parte central y regiones del este del mar Mediterráneo; un aumento del potencial eólico en el mar de Alborán; concretamente en la zona del estrecho de Gibraltar, también un aumento de los valores en el mar Egeo (más pronunciados en los meses de verano), no se observaron cambios significativos en el Golfo de León ni en el Mar Negro, y por último un descenso en el potencial eólico en las zonas marítimas del Oriente Medio y alrededores de Chipre.

Hueging et al. (2013) estudiaron el potencial eólico en Europa considerando el conjunto de dos RCM's (COSMO CLM, y REMO), proporcionados por el modelo de clima global ECHAM y validado con ERA-40 en condiciones similares. Los periodos de estudio abarcaron 1961 – 2000 y 2061-2100. Los resultados desprenden una alta estacionalidad en los valores de viento, con una gran variación de los datos en función de la zona. A rasgos generales se aprecia un aumento en el norte y centro de Europa, en especial en las estaciones de otoño e invierno, en contraste con el sur de Europa, donde los valores parecen indicar una disminución del potencial eólico en todas las estaciones, a excepción del mar Egeo.

Tobin et al. (2015) analizaron la variación en la producción energía de los parques eólicos construidos en el año 2012 y los de construcción prevista de cara al 2020, en el futuro inmediato. Para ello usaron 15 RCM's basándose en los datos de 6 GCM's. Las conclusiones obtenidas fueron que bajo el escenario de emisión A1B, las variaciones en el potencial eólico eran ínfimas o no significantes y bajo en el escenario A2 (escenario con mayores emisiones que el A1B), el potencial eólico obtenido era menor.

6.2 En la Península Ibérica

Santos et al. (2015) estudiaron el potencial eólico a lo largo de la península Ibérica, con más énfasis en 8 zonas ubicadas estratégicamente; norte de Galicia, Burgos, Valle del Ebro, norte de Portugal, sureste de Cataluña, oeste de la península Ibérica, Albacete y sureste de Andalucía. Para ello analizaron el aprovechamiento energético teórico derivado de la instalación de un aerogenerador básico en esas regiones en el periodo referencia 1961 – 2000 y en el futuro 2041-2070. A partir del modelo de clima regional CCLM (con las condiciones de contorno basadas en ECHAM5/MPI-OM) analizaron los cambios en la velocidad del viento bajo el escenario A1B del IPCC y con una escala espacial de 20km. Los resultados obtenidos muestran una gran estacionalidad en los resultados del potencial eólico en el pasado inmediato, con máximos en las estaciones de invierno y mínimos en las estaciones veraniegas (con gran variabilidad en la dirección del viento), excepto en el oeste y en el valle del Ebro, que presentan valores altos durante las estaciones de invierno, verano y primavera. En el futuro próximo, en comparación con los valores del periodo referencia, las medias anuales del potencial eólico disminuyen, con fuerte variabilidad interanual, siendo en conjunto menor para todas las regiones. Las zonas más proclives en cuánto al potencial eólico se situaron en Galicia, montañas de Cantabria, en el estrecho de Gibraltar y en el valle del Ebro.

El presente trabajo pretende hacer un estudio de la variación del potencial eólico a lo largo de las regiones marítimas de la península Ibérica. En los sucesivos apartados se explicarán los

materiales y métodos, así como los resultados obtenidos. En el apartado de material y métodos se elaborará un informe detallado de las condiciones de estudio, el equipo, los modelos estudiados, los datos utilizados y las fórmulas necesarias para la obtención de los resultados, y, por último, en el apartado de resultados, se comentarán y valorarán las distintas proyecciones obtenidas, las gráficas descriptivas y las regiones de interés en cuanto a la variación de la cantidad de viento.

*JUSTIFICACIÓN Y
OBJETIVOS*

JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

La búsqueda de formas más eficientes y sostenibles con el medio ambiente para la producción de energía hacen del sector eólico una alternativa sólida, limpia y barata frente a las energías convencionales. El sector eólico, consagrado desde mitad del s. XX y en la cúspide de su desarrollo, depende de la idoneidad en el emplazamiento de los parques eólicos, esta idoneidad se mide exclusivamente en la cantidad de viento que fluye por una determinada zona. Ante la escasez de ubicaciones favorables para la instalación de estos parques en tierra, el dominio marino se propone como alternativa viable y duradera para evitar los posibles impactos generados por los molinos eólicos en tierra y asegurar una producción mayor y constante debido a la alta consistencia del viento en el mar. El viento al ser una variable dependiente de la circulación atmosférica, es en gran parte susceptible al cambio climático futuro tan pronosticado. Para encontrar zonas costeras adecuadas para el emplazamiento de estos parques eólicos *offshore*, son necesarias herramientas para la adecuada previsión en los cambios del potencial eólico de una determinada región. Estas herramientas son los denominados modelos de clima global (GCM's) y a menor escala los modelos de clima regional (RCM's), que mediante su adecuado estudio podrán facilitar la labor en la búsqueda de ubicaciones con alta viabilidad tanto presente como futura en la producción de energía en emplazamientos marinos. En el presente trabajo se realiza un estudio de las regiones marinas de la península Ibérica, utilizando para ello distintos modelos de clima global y regional, obteniendo una visión futura en la previsión de los cambios en el potencial eólico.

*MATERIALES Y
MÉTODOS*

MATERIAL Y MÉTODOS

1. Materiales

1.1 CORDEX ("Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment")

Como se ha mencionado anteriormente, el proyecto CORDEX nace en el año 2009 auspiciado por el World Climate Research Programme (WRCP) con la finalidad de proporcionar modelos regionalizados en todos los puntos del planeta, mejorando la generación de proyectos regionales de cambio climático a nivel mundial, la resolución espacial (disponibles en 11, 22 y 44km de malla), y reduciendo las incertidumbres inherentes asociadas a los GCM's, dentro del periodo temporal establecido por el AR5 (Fifth Assessment Report) del IPCC. Actualmente el proyecto cuenta con un total de 12 dominios.

Los modelos utilizados en el presente trabajo para la simulación del potencial eólico se basan en los escenarios de emisión RCP 8.5 ("Trayectorias de Concentración Representativas", RCP), caracterizándose por unas escasas medidas por parte de los gobiernos para paliar los efectos del cambio climático y/o aunque se impongan algunas restricciones en las emisiones, los GEI almacenados en la atmósfera a lo largo de los últimos decenios, darán como resultado un aumento en la emisión de los gases de efecto invernadero de cara al final del siglo con una tendencia de forzamiento radiactivo (FR) creciente.

	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	creciente	936 ppm

Fuente: IPCC.WGI. "Cambio Climático: Bases Físicas", 2013

Bajo este escenario, la región Mediterránea para finales del siglo XX experimentará unos incrementos en las temperaturas medias de entre 3°C y 6°C en los meses invernales y estivales respectivamente, con una reducción entre un 12% y un 24% de las precipitaciones para los mismos periodos. Por último, destacar la previsión de un aumento de los extremos relacionados con las precipitaciones de origen tormentoso (IPCC.WGI. "Cambio Climático: Bases Físicas", 2013).

1.2 MatLab

Matrix Laboratory es una herramienta computacional de alto nivel. Ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje propio (lenguaje M). Sus campos de aplicación son muy variados debido a su elevada capacidad de tratamiento y manipulación de datos. Entre las prestaciones básicas que ofrece destacan la resolución de matrices, implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la posible comunicación con otros lenguajes y otros dispositivos *hardware*. A mayores cuenta con herramientas más sofisticadas como *Simulink*, indispensable para la simulación de sistemas dinámicos, fraccionados en bloques de codificación independientes e interrelacionados entre sí ayudados por los *Toolboxes* que ofrece (herramientas de apoyo). Está disponible para todas las plataformas de sistemas operativos (Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux).

2. Métodos

2.1 Potencial eólico

La fórmula de partida para la resolución de todos los métodos de análisis se basa en el cálculo del potencial eólico. Una vez obtenido, a partir de ahí se realizan cálculos a mayores en función de los resultados y las metas deseadas.

El potencial eólico se compone de 2 variables; densidad del aire y velocidad del viento (módulo de los vectores de velocidad), ambas unidas por la fórmula:

$$Pflux = \frac{1}{2} \rho V^3$$

Dónde:

ρ = Valor estándar de la densidad del aire (1,225 kg/m³)

V = Velocidad del viento

A su vez, a la velocidad del viento hay que aplicarle un factor de corrección, ya que el perfil del viento varía con el aumento de la altura desde el suelo:

$$V_H = V_{10} \frac{\ln\left(\frac{H}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{Z_0}\right)}$$

Dónde:

Z_0 = Valor de la rugosidad del terreno (0.001 m mar abierto en calma)

V_{10} = Velocidad del viento a una altura de 10 m

V_H = Velocidad del viento resultante

El módulo del viento a 10 m se calcula a partir de las componentes meridional (W_y) y zonal (W_x) del viento obtenidas a través del proyecto CORDEX.

H = Altura deseada (120 m)

2.2 Elección de modelos

Se parte inicialmente de 11 modelos de clima global y 6 modelos de clima regional, bajo el escenario RCP 8.5. Para un correcto tratamiento de datos, éstos deben ser significativamente homogéneos, para evitar grandes desacuerdos y valores anómalos de uno o varios modelos en comparación con el resto.

En la siguiente tabla se presentan los modelos GCM utilizados con sus respectivos RCM's:

		RCM				
		CCLM4-8-17	RCA4	HIRHAM5	RACMO22E	WRF331F
GCM	1 CNRM-CM5_CLMcom	x				
	2 CNRM-CM5_SMHI		x			
	3 ICHEC-EC-EARTH_CLMcom	x				
	4 ICHEC-EC-EARTH_DMI			x		
	5 ICHEC-EC-EARTH_KNMI				x	
	6 ICHEC-EC-EARTH_SMHI		x			
	7 IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS					x
	8 IPSL-CM5A-MR_SMHI		x			
	9 HadGEM2-ES_SMHI		x			
	10 MPI-ESM-LR_CLMcom	x				
	11 MPI-ESM-LR_SMHI		x			

Los modelos destacados en rojo, representan los descartes efectuados, debido a la discordancia resultante de sus valores con el resto de los modelos. Para efectuar dichos descartes se siguió el siguiente procedimiento:

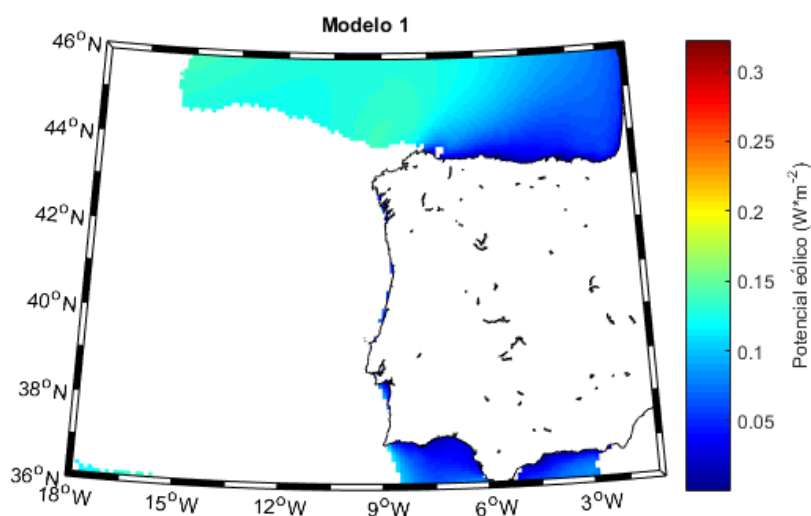
1. Cálculo de la media del potencial eólico para todos los RCM's.
2. Desviación estándar de la media obtenida.
3. Se imponen condiciones tanto superiores como inferiores para comprobar la concordancia de los valores de cada modelo individual respecto al conjunto de valores:
 - Por arriba: Media + Desviación
 - Por abajo: Media - Desviación
4. Se compara para cada punto los datos de cada modelo respecto al conjunto de valores, los valores salientes de las condiciones impuestas se suprimen (*NaN's*) y se contabilizan.
5. Si el número de valores identificados como *NaN's* supera el 33% del total de los puntos del modelo, éste es descartado.

2.2.1 Modelos descartados

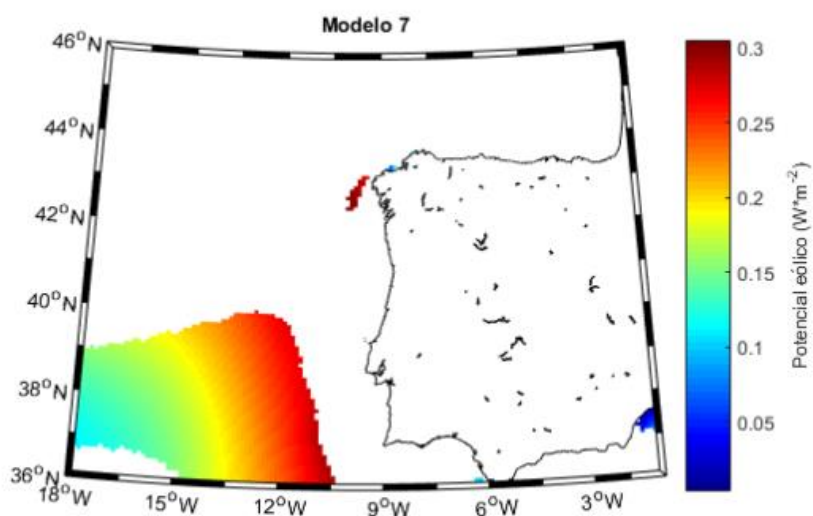
Los resultados obtenidos muestran claramente aquellos modelos con datos que difieren significativamente con respecto al conjunto. Se puede comprobar que los modelos 1, 7 y 8 poseen un porcentaje total de puntos fuera del rango superior al establecido (>33%). El modelo más discordante y con amplio margen pertenece al GCM 7 (IPSL-CM5A-MR_IPSL-INERIS) con más del 80% de puntos fuera del intervalo.

Modelo	% NaN's
1	49,22
2	0,19
3	7,17
4	17,93
5	8,84
6	19,65
7	83,26
8	50,47
9	28,63
10	24,37
11	0,82

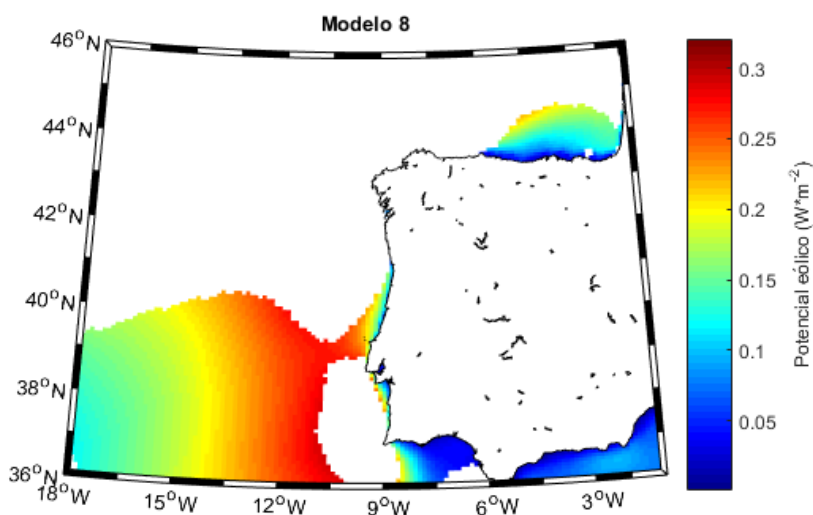
En las figuras siguientes, se muestra gráficamente los datos pertenecientes a cada modelo dentro y fuera del rango (zonas coloreadas y zonas en blanco, respectivamente);



En el primer modelo estudiado, *CNRM-CM5_CLMcom* conducido por el RCM *CCLM4-8-17*, (49,22% NaN's), las zonas fuera del intervalo pertenecen a la costa atlántica de la península Ibérica, así como a la región oeste del mar de Alborán. Los puntos que cumplen las condiciones se pueden apreciar en la totalidad del mar Cantábrico y el estrecho de Gibraltar.



El modelo *WRF331F* conducido por *IPSL – CM5A-MR_IPSL-INERIS* (número 7, >80% NaN's), posee el mayor número de puntos anómalos con gran diferencia. Se puede apreciar como las zonas con puntos válidos se sitúan en el noreste de la península y puntos aislados en la costa atlántica gallega.



Por último, el modelo global *IPSL – CM5A-MR_SMHI* ejecutado con el modelo de clima regional *RCA4* (número 8) se muestra irregular en el reparto de zonas fuera y dentro del intervalo. El dominio marítimo gallego es el que abarca mayor cantidad de puntos discordantes.

2.3 Periodos Temporales

A la hora de identificar las zonas con incremento o decrecimiento en los valores del potencial eólico futuro, es indispensable cotejar los distintos periodos de futuro escogido (en este caso, futuro inmediato corresponde al periodo 2030 – 2059 y futuro lejano al periodo 2070 – 2099) con los valores de la serie histórica del mismo modelo, correspondientes al periodo 1976 – 2005.

Para ello se calcula el potencial eólico medio para los tres intervalos temporales del mismo modelo, y se resta cada uno de los futuros con el potencial medio del periodo de referencia. El resultado obtenido mostrará aquellas zonas donde el potencial eólico sufrirá cambios significativos, tanto en sus aumentos como en sus disminuciones. Esto nos proporcionará una idea general del panorama futuro esperado y nos indicará aquellas zonas con mayor cambio en el valor del potencial.

2.4 Tendencia anual y mensual

Las tendencias nos indican la variación de los valores que sufre el potencial eólico en un intervalo de tiempo escogido (anualmente, mensualmente...). El cálculo se realiza mediante la correlación de dos columnas de pares de valores (un conjunto de valores de la serie y un valor determinado perteneciente a la serie), obteniendo la correlación que hay entre el valor y la serie, y una significancia, que nos indicará la probabilidad de que ocurra ese fenómeno. Si se aplican condiciones de significancia elevados (>95%) y se representan gráficamente los resultados, podremos obtener un mapa visual con aquellos puntos donde la magnitud de ese potencial eólico va a ocurrir con casi toda certeza para el modelo estudiado.

2.5 Consenso modelos

La medida de consenso es una buena forma de ver la concordancia de valores entre distintos modelos. Mediante la realización de mapas de porcentaje de consenso, podremos ver zonas o focos dónde los modelos presentan mayor idoneidad de datos, coincidiendo en la previsión de incrementos o decrecimientos del potencial eólico.

Los mapas de consenso muestran el porcentaje de modelos que están de acuerdo en un incremento o un decrecimiento del potencial eólico superior al 5% para cada punto del dominio. Estos mapas de consenso se han calculado tanto para el futuro próximo (2030- 2059) como para el futuro lejano (2070- 2099) respecto al periodo histórico (1976-2005), así como, consensos mensuales para comprobar la concordancia de los modelos para periodos estivales e invernales.

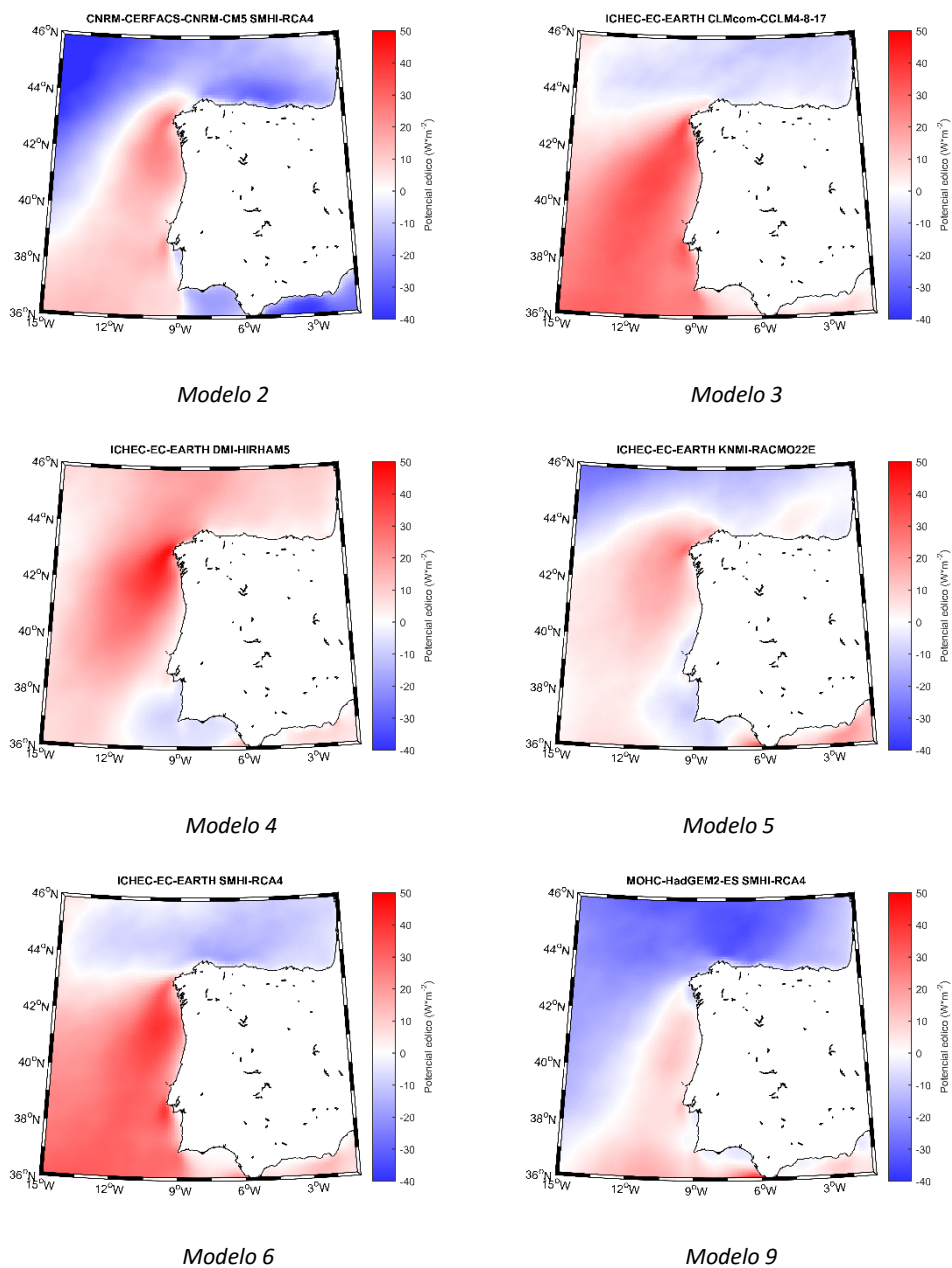
RESULTADOS

RESULTADOS

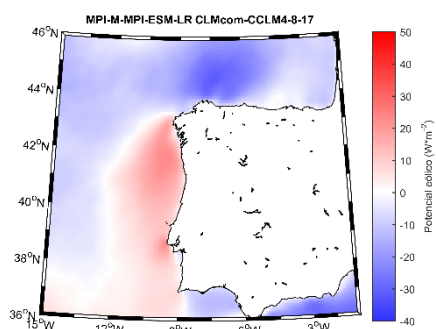
1. Diferencia de periodos

En este apartado se evaluarán los distintos futuros estudiados, futuro próximo, correspondiente al periodo 2030 – 2059, y futuro lejano, periodo 2070 – 2099, menos el periodo de referencia (1976 – 2005). El resultado obtenido mostrará la previsión en la variación del potencial eólico de cada modelo, con respecto a su periodo de referencia.

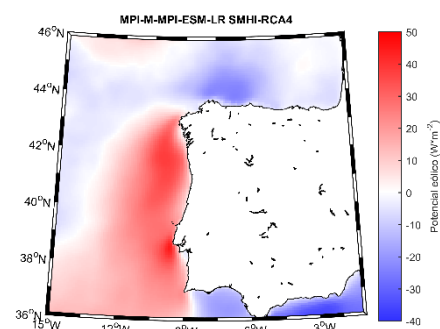
1.1 Futuro próximo – Periodo referencia



Resultados



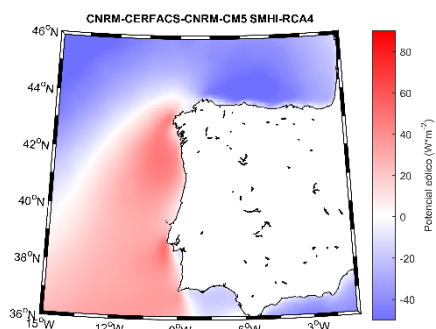
Modelo 10



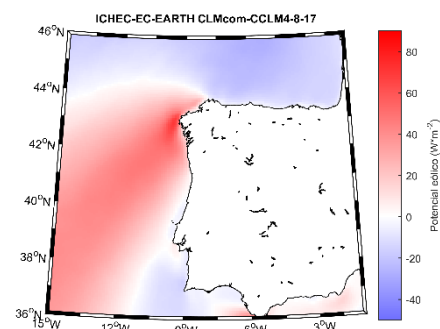
Modelo 11

Las figuras anteriores muestran para un futuro próximo, un aumento generalizado en mayor o menor medida en la región de la costa atlántica. Únicamente los modelos 4 y 5 muestran un ligero descenso del potencial eólico en la costa atlántica al sur de Lisboa. Se observa un descenso del potencial eólico en el mar Cantábrico excepto el modelo 4. En el estrecho de Gibraltar y el mar de Alborán, los valores entre los distintos modelos varían sustancialmente; dando aumentos en los modelos 3, 4, 5, 6 y 9, y un descenso en los modelos 2, 10 y 11.

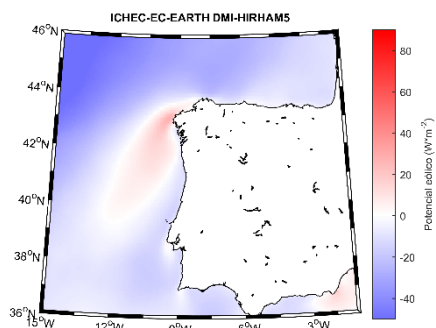
1.2 Futuro lejano – Periodo referencia



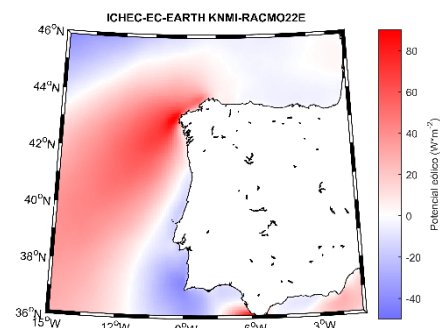
Modelo 2



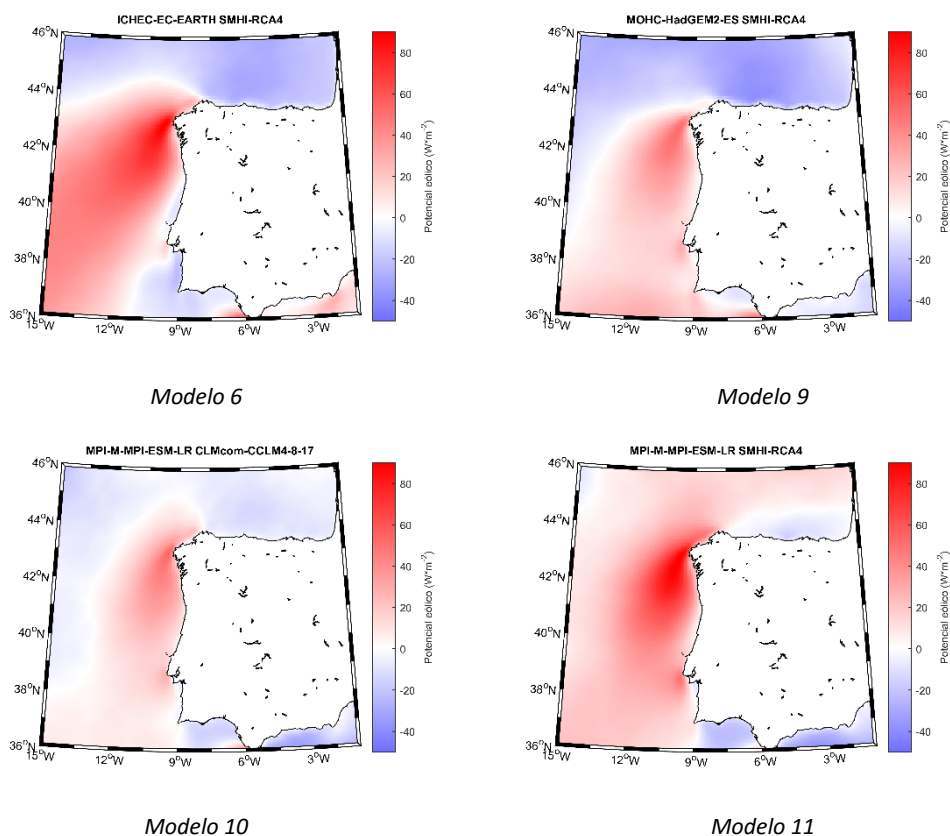
Modelo 3



Modelo 4



Modelo 5



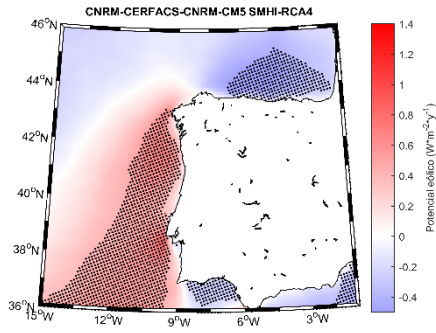
A diferencia de lo observado para el futuro próximo, cuando se analiza el futuro lejano se observa un aumento considerable en toda la región de la costa atlántica para la mitad de los modelos (modelos 1, 6, 7, 8). Los modelos 2, 4 y 5 muestran un aumento considerable del potencial eólico en la región atlántica situada al norte de Lisboa y una ligera disminución del mismo al sur, especialmente cerca de costa. El modelo 4, únicamente da un crecimiento del potencial eólico en Finisterre. La región de la costa Cantábrica se muestra irregular, con descensos notorios (modelos 2, 6, 9) y zonas difusas en el resto de los modelos, sin grandes aumentos o bajadas en los valores del potencial eólico, dándose casos en los que la variación será inexistente (modelo 5). En este periodo, la costa gallega se presenta con los valores más altos del potencial eólico, llegando a valores de 80 W/m² en los modelos 5, 6 y 11.

2. Tendencia

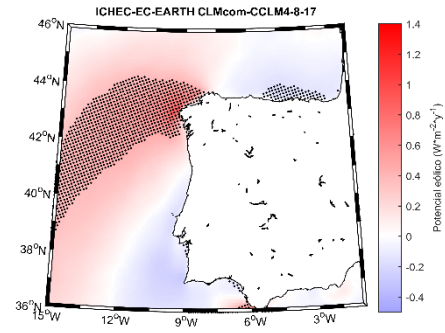
El cálculo de las tendencias para cada modelo reflejará la variación temporal que sufren los valores del potencial eólico respecto a un intervalo de tiempo dado. El periodo temporal abarcado en el presente estudio incluye toda la predicción futura de cada modelo (2017 – 2099). Los puntos en cada figura, indican la significancia (>95%) si la hubiera, de los datos en ese punto, entendiéndose como zona de alta probabilidad en la ocurrencia del fenómeno (en cada modelo en particular).

2.1 Tendencia anual

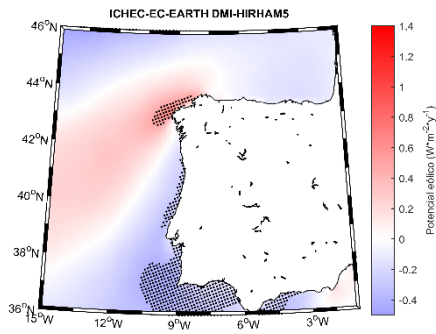
La tendencia anual representa la variación anual del potencial eólico en cada punto proyectada por cada modelo para el periodo 2017- 2099. Las coordenadas con una fiabilidad estadística >95% se representan mediante puntos. Las tendencias anuales se calcularon mediante las anomalías anuales del potencial eólico.



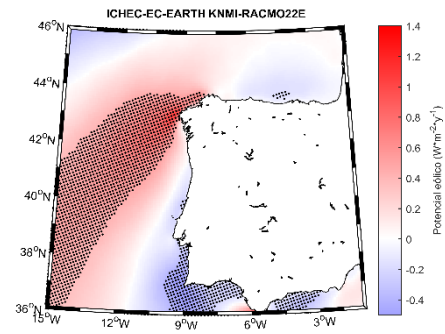
Modelo 2



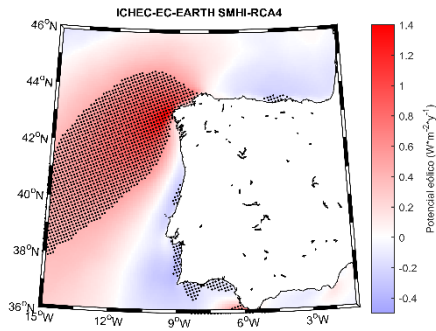
Modelo 3



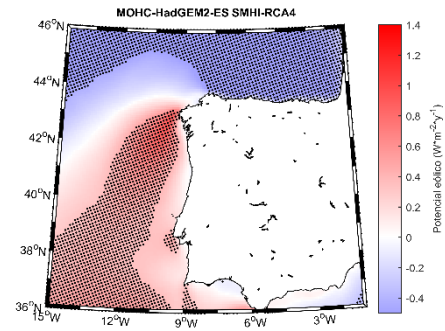
Modelo 4



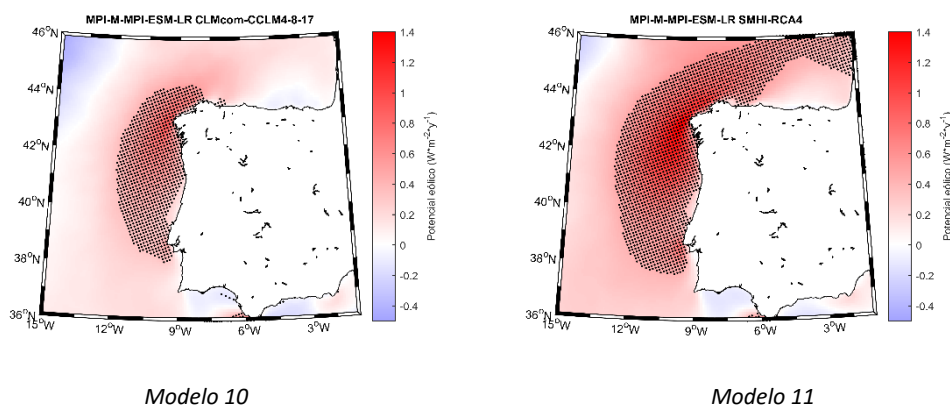
Modelo 5



Modelo 6



Modelo 9



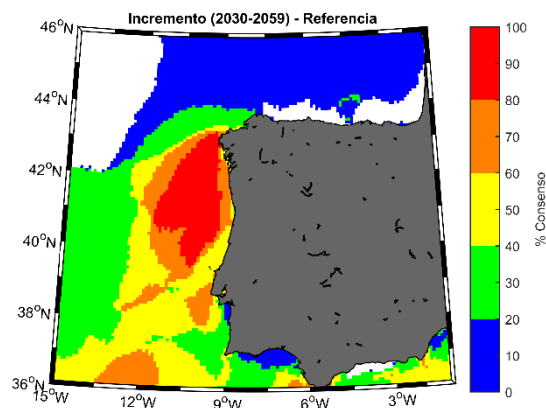
Los puntos de mayor significancia se presentan mayoritariamente repartidos a lo largo de la costa atlántica y el golfo de Vizcaya. Los valores de la tendencia anual en la costa gallega para los modelos 11 y 6 son sustancialmente más elevados que los modelos restantes para la misma región, llegando a valores que oscilan entre $1,3 - 1,4 \text{ Wm}^{-2} \text{ y}^{-1}$, todos ellos con alta significancia. En el resto de la costa atlántica la tendencia anual es menos pronunciada llegando incluso a puntos donde no hay un incremento anual en la cantidad del potencial eólico. Únicamente los modelos 2, 3 y 9 dan decrecimientos significativos en el Mar Cantábrico, llegando a valores negativos de $-0,4 \text{ Wm}^{-2} \text{ y}^{-1}$. Este decrecimiento es sumamente significativo en todo el Golfo de Vizcaya en el modelo 9. En el sur de la península, concretamente en el golfo de Cádiz, a excepción del modelo 9, la tendencia anual resultante es negativa, con cotas de significancia elevadas en los modelos 2, 4, 5 y en menor medida el 6. Para la costa lusa, la mayor parte de las figuras representadas, dan valores moderadamente positivos en 3 de los 11 modelos (concretamente 2, 10 y 11), quedando el modelo 9 con valores neutros a excepción de la zona oeste de Lisboa.

3. Consenso

La medida del consenso entre los distintos modelos se divide en dos periodos, futuro medio o próximo y futuro lejano. En cada uno de estos periodos se estudiará el consenso tanto de los incrementos como decrecimientos, en forma de porcentaje de acuerdo existente entre los modelos. A mayor porcentaje en estos, mayor es el consenso de los modelos para la ocurrencia de ese fenómeno.

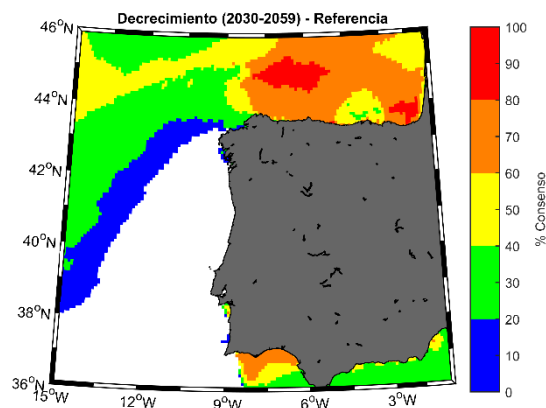
3.1 Periodo 2030 – 2059

3.1.1 Incremento



Como se muestra en la figura, y a la vista de los resultados anteriores, tanto en los valores de tendencia, como en las representaciones del potencial eólico futuro esperado para el mismo periodo, el mayor porcentaje de consenso se ubica en costa atlántica gallega, y la costa atlántica en general, con tasas de consenso que van desde el 60% llegando al 100%. Las regiones en blanco indican ninguna coincidencia en ese punto de los modelos en el incremento, por lo que cada modelo prevé distintas situaciones. En la región cantábrica son modelos aislados los que prevén un incremento del potencial eólico para dicho periodo.

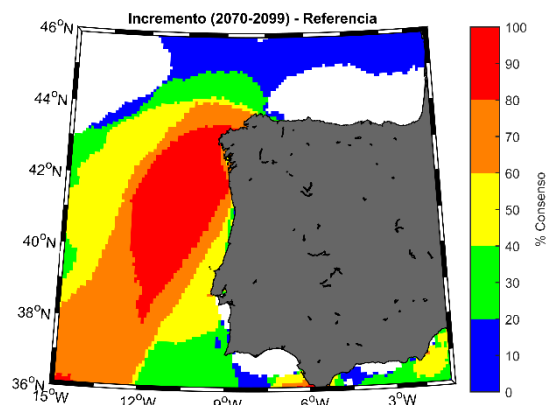
3.1.2 Decrecimiento



Como era de esperar las zonas en blanco de la región atlántica indican que no hay ningún modelo que prevé bajadas en el potencial eólico, o si lo hay es único o son mínimos (zonas azules). En la costa cantábrica hay focos aislados con una alta tasa de consenso (>80%) en la disminución de los valores del potencial eólico, y en general en mayor o menor medida el potencial eólico se prevé que disminuya.

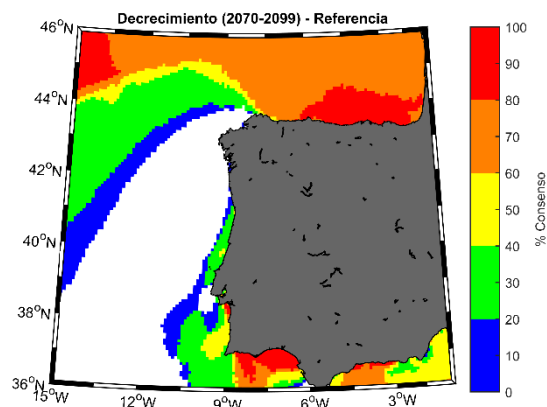
3.2 Periodo 2070 - 2099

3.2.1 Incremento



En este caso las altas tasas del consenso para el futuro lejano abarcan una mayor región, pero siempre focalizándose en la misma zona de la costa atlántica. La región cantábrica no presenta zonas de incremento próximas a la costa, pero pueden aparecer en puntos más alejados.

3.2.2 Decrecimiento



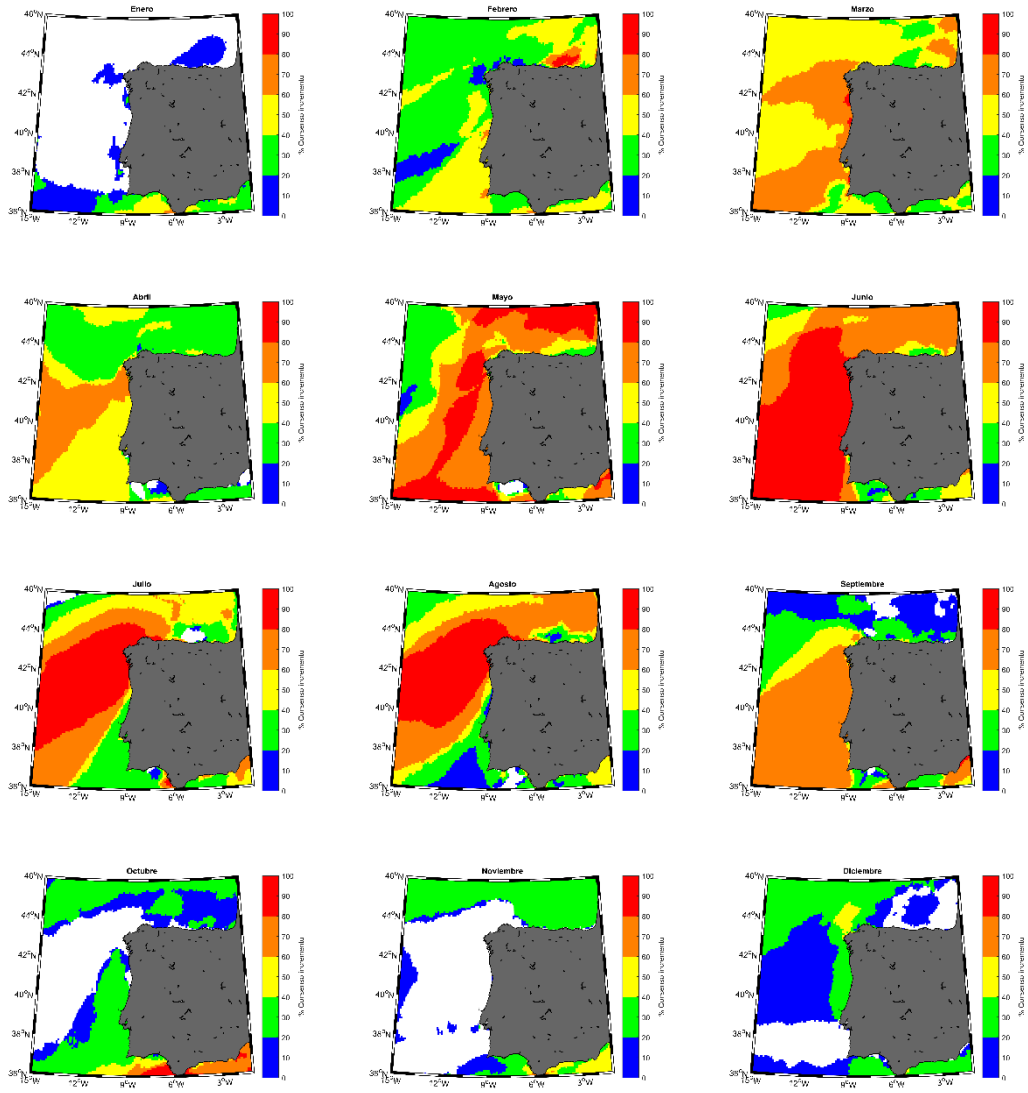
El decrecimiento en los valores del potencial eólico es inequívoco para las zonas próximas a la costa cantábrica, con tasas de consenso elevadas que no bajan del 80%; casi la totalidad de los modelos prevén un decrecimiento en estos puntos. Destacan también las altas tasas de consenso en el golfo de Cádiz para la disminución de dichos valores.

4. Consenso mensual

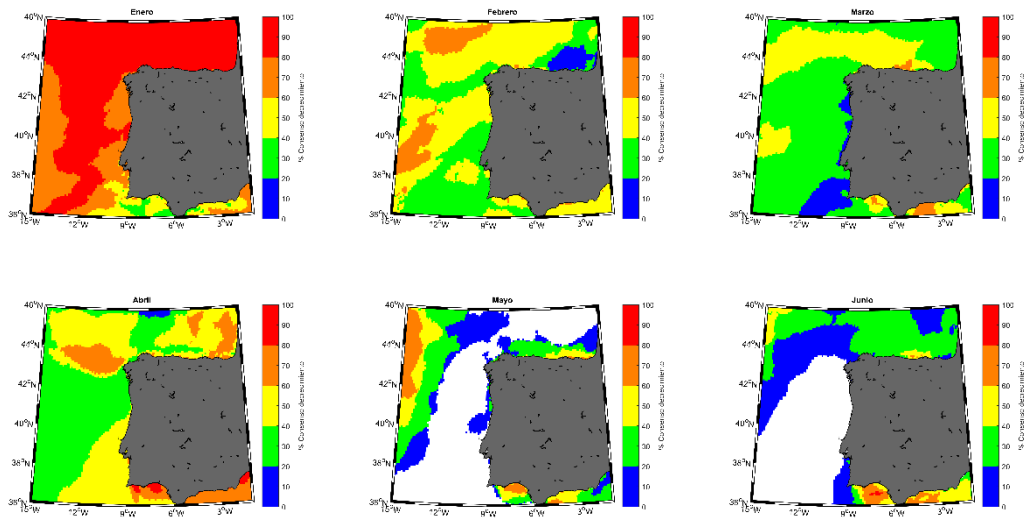
Si se realiza el estudio anterior a escala mensual podremos determinar para que meses se proyecta el incremento o decrecimiento del potencial eólico tanto en el futuro próximo como en el futuro lejano.

4.1 Periodo 2030 – 2059

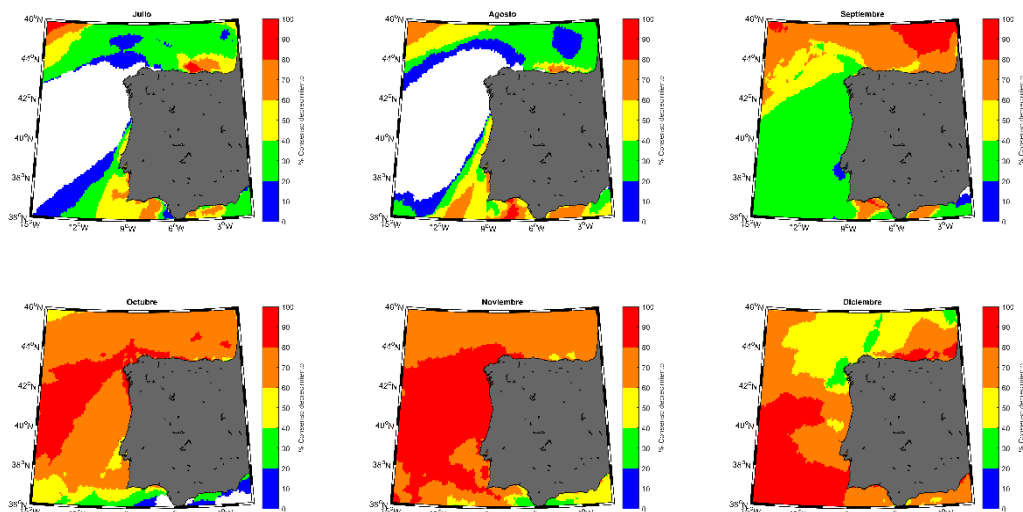
4.1.1 Incremento



4.1.2 Decrecimiento



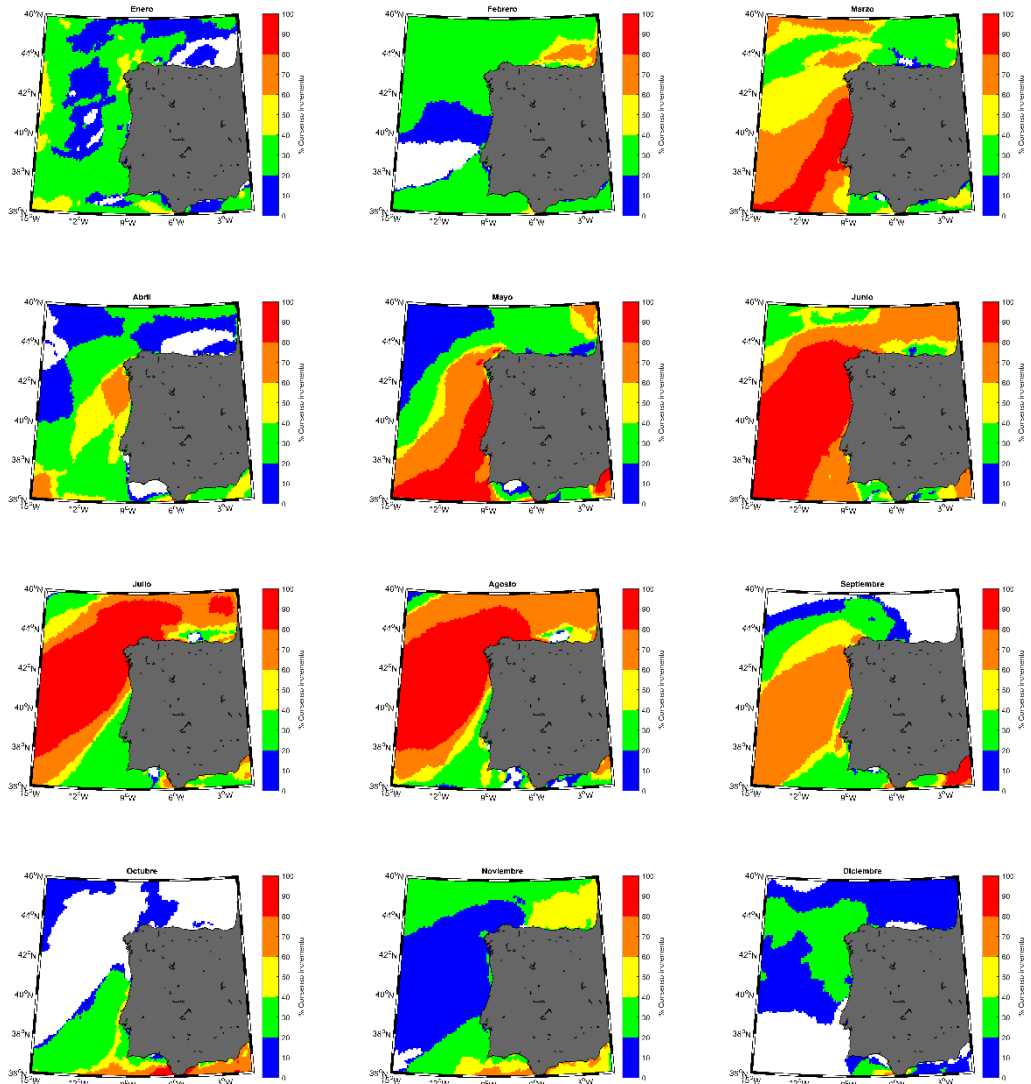
Resultados



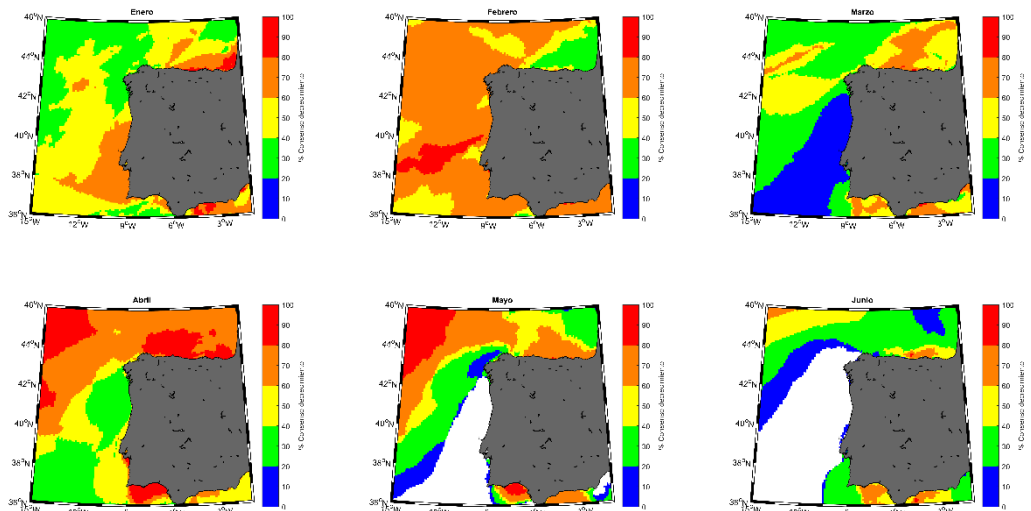
Para el periodo denominado futuro próximo se puede constatar una alta estacionalidad en los consensos de incremento y decrecimiento. En los mapas de consenso mensual, los meses que predominan con incrementos se corresponden con la estación estival. Para el litoral gallego, los consensos en el incremento se encuentran uniformes en los meses que abarcan desde Mayo hasta Agosto (>80%), sin embargo, los meses Marzo, Abril y Septiembre poseen una porcentaje intermedio de consenso para el incremento, mayoritario en las *Rías Baixas* e irregular en las *Rías Altas*. En el golfo de Vizcaya, tasas de consenso elevadas para el incremento son escasas, concretamente en la región central en el mes de Febrero y puntos alejados de la costa en los meses de Mayo y Junio. El golfo de Cádiz no presenta valores elevados de consenso, únicamente en el mes de Julio y Octubre en una región mínima en el estrecho de Gibraltar. El mar de Alborán posee tasas de incremento en la región más oriental en los meses de Mayo, Julio y valores intermedios para toda la zona en el mes de Octubre. Por último, los mapas de consenso para la costa portuguesa arrojaron un incremento elevado en los meses de Marzo, Mayo, Junio (más destacado) y Septiembre. Por el contrario, en el litoral gallego, los meses con mayores consensos de decrecimiento pertenecen a los meses de Enero, Octubre y Noviembre. En la región cántabra destacan los consensos para el decrecimiento, como es el caso del mes de Enero y Diciembre, y en menor medida los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre.

4.2 Periodo 2070 - 2099

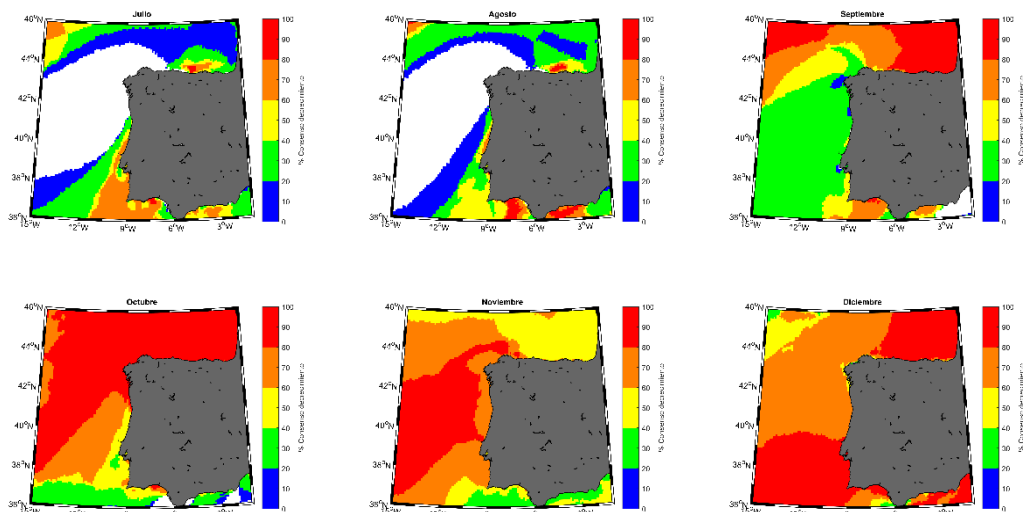
4.2.1 Incremento



4.2.2 Decrecimiento



Resultados



Los mapas de consenso mensual del futuro lejano, al igual que en el intervalo temporal anterior, muestran estacionalidad en los valores de incremento y decrecimiento (estación estival y estación invernal). La mayoría de los MRC (>60%) mostraron un incremento en las regiones siguientes: en el litoral gallego desde los meses desde Mayo hasta Septiembre, con meses más focalizados; Marzo y Abril en las *Rías Baixas*, el golfo de Vizcaya en los meses de Junio, Julio y Agosto en la región oeste, el estrecho de Gibraltar únicamente en el mes de Octubre y en menor medida Noviembre, en el mar de Alborán la región más oriental durante los meses de Mayo, Junio, Agosto, Septiembre y Octubre, finalmente la costa lusa en los meses de Marzo, Mayo, Junio y zonas alejadas de la costa en Agosto y Septiembre.

DISCUSIÓN

DISCUSIÓN

La variable del viento en una determinada zona esta intrínsecamente relacionada al cambio climático. Cambios en la circulación atmosférica repercutirán positivamente o negativamente en la cantidad de viento dependiendo la región de estudio. El viento es relativamente más sensible que otras variables climáticas en la proyección de modelos de clima regional debido a su inherente variabilidad tanto a escala espacial como temporal, pequeños cambios en el viento repercuten enormemente en el potencial eólico. Actualmente, mediante el estudio de los distintos modelos regionales proporcionados por las distintas instituciones se podrá prever cambios del potencial eólico con una resolución espacial elevada y con gran fiabilidad. Para el presente trabajo, se analizaron las proyecciones obtenidas a partir de 5 modelos de clima regional conducidos por 8 modelos de clima global bajo el escenario de emisión 8.5 (RCP 8.5) en la península Ibérica, subdividida a su vez, en 5 regiones claramente diferenciadas; litoral gallego, costa portuguesa, golfo de Vizcaya, golfo de Cádiz y mar de Alborán.

Los resultados obtenidos muestran al litoral gallego como la región más consistente en términos de subida del potencial eólico en todos los modelos estudiados, llegando a valores de 80 W/m^2 , y con altas tasas de consenso en el incremento para ambos futuros. A escala mensual se puede apreciar una gran estacionalidad en los valores del incremento obtenidos, Junio, Julio y Agosto poseen los consensos más elevados. La tendencia posee elevada significancia con valores al alza de $1,3 - 1,4 \text{ Wm}^{-2} \text{ y}^{-1}$. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el trabajo publicado por Koletsis et al. (2016) y en gran medida con Santos et al. (2015) en el cual la región gallega se situaba como una de las más proclives en el emplazamiento de parques eólicos marinos.

El golfo de Vizcaya se sitúa como la región con más pérdida del potencial eólico a nivel nacional, con elevado consenso para el decrecimiento en la región central para este fenómeno, concretamente en los meses de Noviembre, Diciembre y Enero. Las tendencias negativas presentan valores del orden de $-0.4 \text{ Wm}^{-2} \text{ y}^{-1}$. Al igual que en el caso anterior, los resultados obtenidos concuerdan con lo proyectado en el trabajo de Koletsis et al. (2016).

En la región del golfo de Cádiz, ambos futuros se muestran variables en función del modelo estudiado, pero predominan los valores negativos, en la franja que va desde los 0 hasta los -40 W/m^2 . El consenso es elevado para un decrecimiento del potencial eólico en ambos futuros, más claro en el futuro lejano. El consenso mensual se muestra homogéneo a lo largo de todos los meses del año para el decrecimiento. A su vez, el estrecho de Gibraltar arroja resultados inciertos, dónde los modelos en ambos futuros comparados respecto al periodo de referencia poseen valores tanto positivos como negativos. En los mapas de consenso esta región presenta

tasas intermedias de incremento, y las tasas de consenso mensuales otorgan el incremento exclusivamente en el mes de Octubre para ambos futuros, por el contrario, las tasas de consenso para el decrecimiento se presentan en el resto de los meses. Estos resultados difieren a lo proyectado en el trabajo efectuado por Santos et al. (2015), dónde la previsión situaba a la región como una clara ganadora en términos del potencial eólico.

En el mar de Alborán, tanto para el futuro próximo como para el futuro lejano se muestra un descenso en la cantidad del potencial eólico a excepción de las zonas más orientales, dónde la mitad de los modelos prevén una subida sustancial, del orden de $20 - 40 \text{ W/m}^2$. Las figuras de tendencia poseen escasos puntos de coordenadas con alta significancia y si los hubiera, están mayoritariamente concentrados en la región más próxima del estrecho de Gibraltar. Los mapas de consenso se muestran repartidos sin altas tasas de consenso para la ocurrencia de ningún fenómeno en particular, destaca la pequeña franja con un consenso elevado para el incremento en el futuro lejano en la zona más pegada a la costa de la región central. A escala mensual, los meses poseen alta estacionalidad, valores con tasas de incremento elevadas en la región oriental para los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre, y tasas de decrecimiento elevadas en los meses de Diciembre, Enero y Febrero para la misma región. En el trabajo de Koletsis et al. (2016), la zona presenta cierta similitud en los resultados obtenidos para los mapas de consenso; en el futuro próximo variabilidad de tasas sin ningún fenómeno predominante y para el futuro lejano tasas de consenso elevadas para el decrecimiento en la región central y tasas de consenso intermedias para el incremento en la región oriental.

Finalmente, la costa de Portugal se puede subdividir en dos zonas claramente diferenciadas, la primera zona de estudio abarca la región al norte de Lisboa, dónde los cambios en ambos futuros desprenden un aumento de los valores del potencial eólico, más notorios cuánto más alejados de la costa y con tendencia significativa de alrededor de $0.8 \text{ Wm}^{-2} \text{ y}^{-1}$. El consenso para el incremento es elevado en ambos periodos y la mayoría de los modelos de clima regional coinciden en el incremento del potencial eólico para las estaciones de primavera y verano, y un decrecimiento durante otoño e invierno. La región atlántica al sur de Lisboa se muestra más diversificada en cuánto a los valores del potencial eólico. En ambos futuros respecto al periodo de referencia se aprecian resultados adversos en función del modelo estudiado. Las tendencias más significativas se corresponden con el descenso en el potencial eólico, y los mapas de consenso muestran resultados intermedios para el incremento en ambos periodos. En cuánto la estacionalidad en los consensos mensuales, los meses en dónde el incremento es claro en esta región pertenecen a Marzo, Mayo y Junio.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

A partir de los 8 GCM's analizados con 5 RCM's bajo las condiciones de estudio expuestos en el apartado de "Métodos" se puede concluir que:

- **Litoral gallego:** Tanto en un futuro próximo como en un futuro lejano existe un elevado consenso (> 80%) en un aumento en el potencial eólico, con una tendencia al alza de $1,3 - 1,4 \text{ Wm}^{-2} \text{ y}^{-1}$. Además, existe un elevado consenso en que este incremento es notorio en los meses de verano; Junio, Julio y Agosto y en menor medida Septiembre.
- **Golfo de Vizcaya:** Los mapas de consenso anual en ambos periodos muestran altas tasas para el decrecimiento, más centralizado y notorio en el futuro lejano. Existe también un alto consenso en que este decrecimiento ocurrirá en Enero, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre (estación invernal predominantemente). Las tendencias anuales muestran valores negativos y con alta significancia, alcanzando los $-0.4 \text{ Wm}^{-2} \text{ y}^{-1}$.
- **Golfo de Cádiz:** Predomina el descenso generalizado en los valores del potencial eólico en los dos futuros. Los mapas de consenso indican valores elevados para el decrecimiento próximo a la costa, homogéneo a lo largo de todos los meses del año. Destaca el consenso para el incremento en el estrecho de Gibraltar en los meses de Julio y Octubre de los dos periodos. Las tendencias anuales negativas poseen alta significancia en la mayoría de los modelos.
- **Mar de Alborán:** Descenso en ambos periodos en la mayoría de los modelos, aunque, los aumentos en determinados modelos se acentúan en la región más oriental. Consenso para el decrecimiento elevado en la región más pegada a la costa en el futuro lejano. Existe un elevado consenso en que el incremento tendrá lugar en los meses de Mayo y Septiembre en la región más oriental, por el contrario, los consensos para el decrecimiento presentan altos valores en el mes de Diciembre.
- **Costa Portuguesa:** Aumento de los valores del potencial eólico en ambos futuros, mayor cuanto más alejado de la costa. Al igual que en los mapas de diferencias, consensos elevados se presentan en la región más al norte, y, mayor cuanto más alejado de la costa. Los consensos a escala mensual indican que los meses de incremento pertenecen a los meses estivales y los decrecimientos a los meses invernales.

Todas las situaciones estudiadas sugieren al litoral gallego como principal emplazamiento para la colocación de parques eólicos *offshore* en la península Ibérica, con datos consistentes de subida para la región en todos los modelos estudiados.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Asociación Empresarial Eólica, “La eólica en España”, www.aeeolica.org/es/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/

Bloom A, Kotroni V, Lagouvardos K. (2008) Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8, 1249–57.

España, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, “Plan de energías renovables 2011 – 2020”.

European Wind Energy Association. Deep Water. The next step for offshore wind energy. European Wind Energy Association Report; 2013. ISBN: 978-2-930670-04-1. www.ewea.org/report/deep-water

Hossain J. (2015) Wind Energy 2050: On the shape of near 100% RE grid. A WWEA Technical Committee Report on Grid Integration.

Hueging H., Rabea H., Born K., Jacob D., Pinto J.G. (2013) Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections. *J Appl Meteorol Climatol* 52, 903-17.

IEA Wind 2012 Annual Report, July 2013, ISBN 0-9786383-7-9.

IPCC AR5 Report www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

Koletsis I., Kotroni V., Lagouvardos K., Soukissian T. (2016) Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. *Sustain Energy Rev* 60, 234-245.

Kjellstrom E, Nikulin G, Hansson U, Strandberg G, Ullestig A. (2011) 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional Climate model simulations *Tellus* 63, 24-40.

Pryor S, Barthelmie R, Kjellstrom E. (2005) Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. *Clim Dyn* 25, 815-35.

Santos J.A., Rochinha C., Liberato M.L.R., Reyers M., Pinto J.C. (2015) Projected changes in wind energy potentials over Iberia. *Renew Energy* 75, 68-80.

Suárez de Vivero J.L., Martínez I. (2015) La política marítima y la planificación espacial, aplicación metodológica al arco atlántico-mediterráneo (Golfo de Cádiz y mar de Alborán), Proyecto MEC (SEJ2007-66487/GEOG). Universidad de Sevilla.

Tobin I., Vautard R., Balog I., Breon F.M., Jerez S., Ruti P.M.,Thais F.,Vrac M., Yiou P. (2015) Assessing Climate change impacts on European Wind Energy from ENSEMBLES high-resolution Climate projections. Climatic Change 128, 99-112.

“World Energy Resources” 2013 Survey: Summary, ‘Used by permission of the World Energy Council’ www.worldenergy.org

“World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050” World Energy Council, 2013