



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# Evaluación de las simulaciones climáticas de CMIP6 sobre el Atlántico nor-oriental y estimación del impacto del cambio climático en los parques eólicos marinos de Europa

Trabajo realizado por:  
*Borja Bolado Álvarez*

Dirigido:  
*Melisa Menéndez García*  
*Stefano Susini*

Titulación:  
**Máster Universitario  
en Costas y Puertos**

Santander, mes de 2022

**TRABAJO FIN DE MASTER**



# Contenido

Resumen.....	1
Abstract .....	3
1 Introducción .....	6
1.1 Objetivos .....	7
1.2 Estructura .....	7
2 Bases de datos.....	8
2.1 Parques eólicos en estudio.....	8
2.1.1 London Array.....	10
2.1.2 Egmond and Zee.....	11
2.1.3 Dan Tysk .....	11
2.1.4 Noirmoutiere.....	11
2.1.5 San Cibrao.....	12
2.1.6 SanBorondón.....	12
2.2 ERA5 .....	13
2.3 CMIP6 .....	14
2.3.1 CMCC-CM2-SR5 .....	14
2.3.2 CMCC-ESM2.....	15
2.3.3 EC-Earth3.....	15
2.3.4 HadGEM3-GC31-MM .....	16
2.3.5 MPI-ESM1-2-HR.....	16
3 Metodología .....	17
3.1 Determinación de los tipos de tiempo (WT).....	19
3.2 Pericia de los modelos climáticos .....	21
3.3 Indicadores del recurso eólico .....	24
3.3.1 Densidad de potencia del viento (“Wind Power Density”).....	24
3.3.2 Percentil 99 de la velocidad del viento .....	24
3.3.3 Tiempo operacional.....	25
3.3.4 Rendimiento energético bruto.....	25
3.3.5 Factor de capacidad .....	25
4 Resultados.....	26
4.1 Clasificación de tipos de tiempo en el clima presente.....	26
4.2 Evaluación de la pericia de los modelos climáticos del CMIP6 .....	31
4.3 Evaluación de las variaciones a futuro en los modelos del CMIP6 .....	35
4.4 Variaciones en los indicadores del recurso eólico .....	39
5 Conclusión .....	42



## Resumen

---

<b>Título:</b>	Evaluación de las simulaciones climáticas de CMIP6 sobre el Atlántico nor-oriental y estimación del impacto del cambio climático en los parques eólicos marinos de Europa.
<b>Autor:</b>	Borja Bolado Álvarez.
<b>Director:</b>	Melisa Menéndez García & Stefano Susini.
<b>Convocatoria:</b>	Septiembre 2022.
<b>Palabras clave:</b>	Energías renovables, energía eólica, off-shore, cambio climático, ERA5, CMIP6, océano Atlántico, velocidad del viento, presión a nivel del mar.

Las energías renovables, entre ellas la eólica, son una fuente de energía limpia, inagotables y crecientemente competitivas, lo que las diferencia de los combustibles fósiles, ya que no producen gases de efecto invernadero. Dado que el cambio climático se ha convertido en una de las grandes preocupaciones de la comunidad internacional, estas fuentes de energía se encuentran en crecimiento, como reflejan las estadísticas aportadas anualmente por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), previendo un aumento en la participación de las energías renovables en un 18% en el periodo de 2018 a 2040 (aumentando de un 26% a un 44%). Dado que la energía eólica se obtiene de una variable climática, es de especial importancia tener en cuenta el cambio climático, ya que puede afectarla.

En este estudio, se analiza el posible impacto que el cambio climático podría tener sobre el recurso energético eólico en un conjunto de 6 parques eólicos marinos en Europa, distribuidos en el Atlántico Norte, desde el Mar del Norte hasta Canarias. Para ello, se han analizado las variaciones climáticas existentes ante unos escenarios de emisión de gases invernadero (SSP1: Sostenibilidad, SSP2: Mitad del camino, SSP3: Rivalidad regional, SSP4: Desigualdad, SSP5: Desarrollo impulsado por combustibles fósiles. Todos ellos tienen un año horizonte, siendo: 2020 para SSP1 y SSP4, 2020-2040 para SSP2 y SSP5 & 2030-2050 para SSP3, además se ha fijado una fecha límite para el cumplimiento de todos ellos, siendo esta el año 2100). La información atmosférica que se ha utilizado es el último producto de reanálisis europeo (ERA5) y las últimas simulaciones climáticas en las que se basan los estudios del IPCC, procedentes del proyecto del World Climate Research Programme (WCRP), en concreto 5 modelos del CMIP6.

El análisis climático comienza con una caracterización de los patrones de circulación atmosférica existentes en la región atlántica de Europa. Para ello, se ha desarrollado una caracterización de 'tipos de tiempo' de los campos de viento sobre el medio marino, aplicando una metodología no lineal y un algoritmo de clasificación no-jerárquico. Una vez caracterizadas las condiciones durante el clima presente, se ha realizado una evaluación de los modelos climáticos, con el fin de comprobar si los modelos del CMIP6 reproducen correctamente los diversos tipos de clima que se dan en el Atlántico Norte. A su vez, se han calculado una serie de estadísticos (índice de similitud, SI y entropía relativa, RE) para comprobar dicha similitud entre los datos históricos y los modelados. Los resultados de esta evaluación de la calidad de las simulaciones climáticas de

trabajo indican diferentes pericias entre los modelos, pero suficiente destreza para incluir los 5 en los posteriores análisis.

Posteriormente, se procede al cálculo de los posibles cambios a futuro que indica el conjunto de modelos utilizado. Por un lado, se han obtenido los cambios en las distribuciones espaciales de la velocidad del viento a 10m de altura y la presión a nivel del mar. Por otro lado, se han calculado una serie de indicadores climáticos en cada parque en estudio. Estos indicadores se resumen en viento medio, el viento extremal (correspondiente al percentil 99%), la densidad de potencia del viento, el tiempo operacional, el rendimiento energético bruto y el factor de capacidad. Estos indicadores se han estimado considerando la altura del aerogenerador y la tecnología empleada en cada parque.

Los resultados indican una clara variación entre los diferentes parques estudiados, de manera que se pueden apreciar aumentos en el rendimiento eléctrico (AEP & CF) de entre 0.31 y 4.93% en los parques de LondonArray, EgmondAanZee y SanCibrao y disminuciones de entre 1.36 y 14.48% en DanTysk, Noirmoutiere y SanBorondón. Cabe destacar que los parques en los que se puede encontrar un mayor aumento o disminución del rendimiento eléctrico, son dos parques en proyecto situados en costas españolas, aumentando la producción en un 3.1% en SanCibrao y disminuyendo en un 14.5% en SanBorondón.

## Abstract

---

**Title:** Evaluation of CMIP6 climate simulations over the North-East Atlantic and estimation of the impact of climate change on offshore wind farms in Europe.

**Author:** Borja Bolado Álvarez.

**Director:** Melisa Menéndez García & Stefano Susini.

**Call:** September 2022

**Keywords:** Renewable energies, wind energy, off-shore, climate change, ERA5, CMIP6, Atlantic Ocean, wind speed, sea level pressure.

Renewable energies, including wind energy, are a clean, inexhaustible and increasingly competitive source of energy, which distinguishes them from fossil fuels as they do not produce greenhouse gases. Given that climate change has become one of the major concerns of the international community, these energy sources are growing, as reflected in the statistics provided annually by the International Energy Agency (IEA), forecasting an increase in the share of renewable energies by 18% in the period from 2018 to 2040 (rising from 26% to 44%). As wind energy is derived from a climate variable, it is particularly important to take climate change into account, as it may affect it.

This study analyses the possible impact that climate change could have on the wind energy resource in a set of 6 offshore wind farms in Europe, distributed in the North Atlantic, from the North Sea to the Canary Islands. To this end, the existing climatic variations have been analysed in the face of greenhouse gas emission scenarios (SSP1: Sustainability, SSP2: Middle of the road, SSP3: Regional rivalry, SSP4: Inequality, SSP5: Fossil fuel-driven development). All of them have a horizon year, being: 2020 for SSP1 and SSP4, 2020-2040 for SSP2 and SSP5 & 2030-2050 for SSP3, and a deadline has been set for the fulfilment of all of them, being the year 2100). The atmospheric information used is the latest European reanalysis product (ERA5) and the latest climate simulations on which the IPCC studies are based, from the World Climate Research Programme (WCRP) project, specifically 5 CMIP6 models.

The climate analysis begins with a characterisation of the existing atmospheric circulation patterns in the Atlantic region of Europe. For this purpose, a 'weather type' characterisation of the wind fields over the marine environment has been developed, applying a non-linear methodology and a non-hierarchical classification algorithm. Once the conditions during the present climate have been characterised, an evaluation of the climate models has been carried out, in order to check whether the CMIP6 models correctly reproduce the various types of weather occurring in the North Atlantic. In turn, a series of statistics (similarity index, SI and relative entropy, RE) have been calculated to check the similarity between the historical and modelled data. The results of this quality assessment of the working climate simulations indicate different expertise between the models, but sufficient skill to include all 5 in the subsequent analyses.

Subsequently, we proceed to the calculation of possible future changes indicated by the set of models used. On the one hand, changes in the spatial distributions of wind speed at 10m height and pressure at sea level have been obtained. On the other hand, a series of climatic indicators have been calculated for each park under study. These indicators are summarised as mean wind, extreme wind (corresponding to the 99% percentile), wind power density, operational time, gross energy yield and capacity factor. These indicators have been estimated considering the height of the wind turbine and the technology used in each wind farm.

The results indicate a clear variation between the different wind farms studied, such that increases in electrical performance (AEP & CF) of between 0.31 and 4.93% can be seen in the LondonArray, EgmondAanZee and SanCibrao wind farms and decreases of between 1.36 and 14.48% in DanTysk, Noirmoutiere and SanBorondon. It is worth noting that the wind farms where the greatest increase or decrease in electricity output can be found are two wind farms in the pipeline located on the Spanish coast, with output increasing by 3.1% at SanCibrao and decreasing by 14.5% at SanBorondón.



# 1 Introducción

---

El impacto del Cambio Climático sobre el medio y las actividades humanas, es una de las preocupaciones a nivel mundial hoy en día.

A raíz de esto, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM,) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988, para ofrecer al mundo una visión clara sobre los conocimientos que se tienen del Cambio Climático y sus posibles repercusiones climáticas y socioeconómicas.

El 22 de abril del 2016, se firmó el acuerdo de Paris, el cual tiene como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales, buscando promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1.5°C. Para ello se ha aprobado una reducción de las emisiones de Dióxido de Carbono del 50% para el año 2030 con cortes en otras emisiones, como pueden ser las de Metano.

En los últimos 100 años la temperatura media del planeta ha aumentado en 1°C y se prevé que si continúa aumentando al ritmo actual llegue a 1.5°C entre el 2030 y 2052.

Este aumento de la temperatura (calentamiento global) trae consigo una serie de cambios en el sistema climático (cambio climático), como el aumento del nivel del mar, las lluvias torrenciales o el incremento de la sequía.

Debido a esto, actualmente se está apostando por la investigación y puesta en marcha de fuentes de energía limpia, como pueden ser la energía solar y la eólica (objeto del presente estudio).

Con el objetivo de caracterizar el clima a futuro para maximizar la eficiencia energética de generación, actualmente se están realizando multitud de estudios sobre este tema, como son dos de los estudios que se han tomado como referencia y representan, junto a otros, el estado del arte para la realización del presente trabajo.

En el primero de ellos (Perez, Jorge, et al. 2014) se evaluó la pericia de dos modelos climáticos (CMIP3 y CMIP6) en la región NorEste del Atlántico y en el segundo de ellos (Susini, Stefano, et al. 2022) se realizó un estudio muy similar al actual con las diferencias de escala (mayor resolución), localización (Mar del Norte y el mar que baña las costas irlandesas) y el modelo climático utilizado, CMIP5 en lugar del CMIP6 (más reciente).

## 1.1 Objetivos

---

En el presente estudio se proponen dos objetivos principales:

- 1) Evaluar el comportamiento de los modelos del CMIP6 (base de datos sobre proyecciones del último informe AR6 del IPCC) en cuanto a la simulación de la circulación atmosférica sobre el medio marino en la región atlántica europea, tomando como referencia histórica la base de datos ERA5.
- 2) Estimar los posibles cambios a futuro (2030 -2060, escenario de cambio climático SSP58.) en las condiciones climáticas, orientado en el recurso eólico marino para 6 parques eólicos del Atlántico Norte, evaluando posibles cambios en la potencia generada y el rendimiento de las turbinas de cada parque.

## 1.2 Estructura

---

El presente documento se ha dividido en 4 apartados:

En el primero de ellos (Bases de Datos) se da una descripción de las bases de datos utilizadas para el desarrollo del presente estudio. Procediendo a ubicar los diversos parques eólicos en estudio, dando información sobre su potencia, tipo de turbina, etc., para posteriormente dar una breve descripción de las bases de datos utilizadas: ERA5 (tomada como referencia histórica) y 5 modelos del CMIP6 (MPI\_ESM1, CMCC\_CM2\_SR5, EC\_Earth, HadGEM3 y CMCC\_ESM2).

Posteriormente se describe la metodología seguida en el estudio, describiendo los métodos empleados para la obtención de los diversos resultados, introduciendo el tema para posteriormente adentrarnos en los diversos apartados en los que se divide, que son: Obtención de los tipos de clima (WT), análisis de la pericia de los modelos climáticos y finalmente evaluación de los diversos indicadores del recurso eólico.

Una vez descrita la metodología se procede a mostrar y a explicar los resultados obtenidos al aplicar la metodología.

Finalmente se procede a mostrar una conclusión de los resultados obtenidos.

## 2 Bases de datos

Para la realización del presente estudio, se ha extraído información de las siguientes bases de datos: Parques eólicos en estudio, ERA5 y CMIP6 (WCRP).

### 2.1 Parques eólicos en estudio

Se han seleccionado un total de 6 Parques eólicos situados en el Atlántico Norte (Figura 1), de los cuales, se han obtenido sus coordenadas geográficas, tipo de turbina, potencia nominal instalada, número total de molinos, altura a la que se encuentra el eje de la turbina, distancia de la costa, área total del parque eólico y sus curvas de potencia (Tabla 1 & Figura 2).

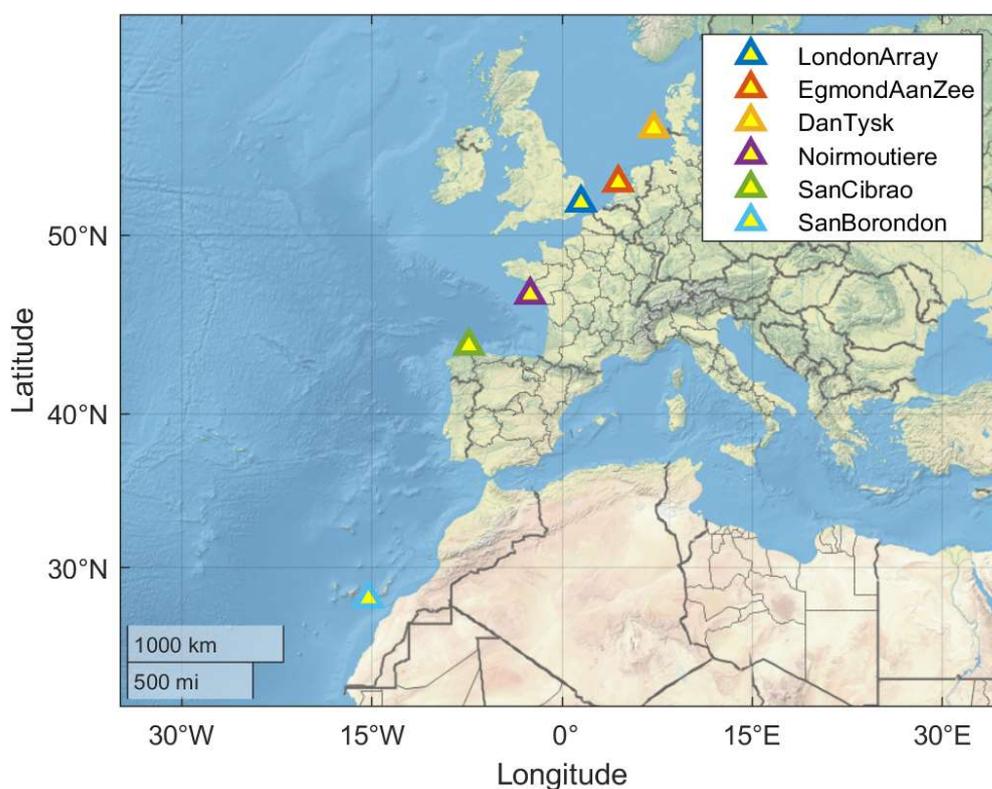


Figura 1 Localización de los diversos parques eólicos

PAÍS	NOMBRE	LAT	LON	TIPO DE TURBINA	Pn (MW)	CANTIDAD	ALTURA DE LA TURBINA	DISTANCIA DE LA COSTA (m)	ÁREA (km2)
UK	LondonArray	51.63	1.50	SWT-3.6-120	3.60	175.00	87.00	650 - 1200	100
NE	EgmondAanZee	52.61	4.44	V90-3.0 MW	3.00	23.33	70.00	10000-18000	27
DK	DanTysk	55.14	7.23	SWT-3.6-120	3.60	80.00	88.00	70000.00	70
FR	Noirmoutiere	46.85	-2.51	SG-8.0-167	8	62	92	29000	83

Tabla 1 Características de los diferentes parques eólicos seleccionados

En la Figura 2, se puede apreciar la potencia generada por cada tipo de turbina, siendo mucho mayor en el parque de Noirmoutiere (parque eólico más moderno de los 4). Además de ello, se puede ver que la mayoría de los parques tienen una parada de emergencia cuando la velocidad del viento sobrepasa los 25 m/s, excepto el parque de Egmond and Zee, que tiene una parada de emergencia al sobrepasar los 35 m/s.

Los intervalos de velocidades del viento que produce una mayor potencia generada son las siguientes:

- Noirmoutiere, London Array & Dan Tysk:  $14 \frac{m}{s} \leq V_{viento} \leq 25 \frac{m}{s}$
- Egmond and Zee:  $16 \frac{m}{s} \leq V_{viento} \leq 35 \frac{m}{s}$

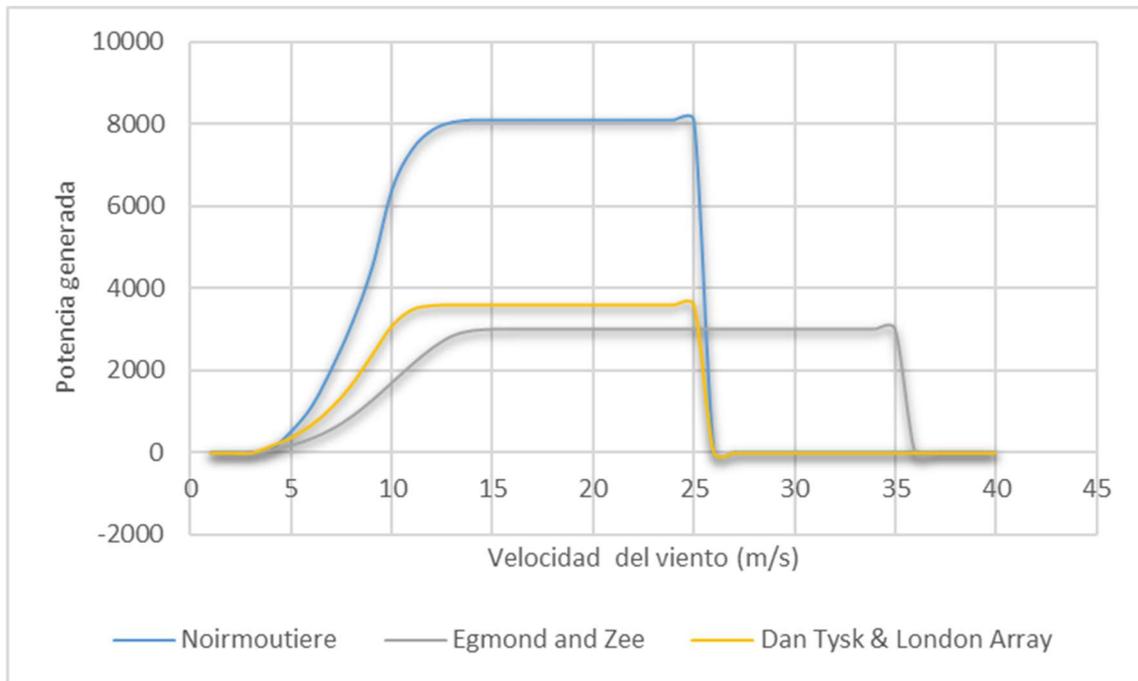


Figura 2 Curvas de potencia de los parques eólicos seleccionados. Como se puede ver las curvas de potencia de Dan Tysk y London array son semejantes.

Como se puede ver, en los datos mostrados anteriormente (Tabla 1 & Figura 2) no se encuentran el total de parques eólicos mencionados, faltando dos de ellos.

Esto es debido a que dos parques se encuentran aún en fase de proyecto, de manera que no se pueden saber sus características exactas. Únicamente se conoce su posición geográfica. Dado esto, se ha supuesto la utilización de un tipo de turbina patentada en el 2020, que genera una potencia nominal de 15 MW, más eficiente que las anteriormente nombradas (como puede verse en su curva de potencia representada en Figura 3), situada a una altura (Hub-Height) de 150 m para el parque eólico de SanCibrao y de SanBorondón (Tabla 2).

PAÍS	NOMBRE	LAT	LON	TURBINE TYPE	Pn (MW)
SP	SanCibrao	44.01	-7.35	IEA Wind-15	15
SP	SanBorondon	27.84	-15.27	IEA Wind-16	16

Tabla 2 Características de los diferentes parques eólicos que se encuentran aún en proyecto

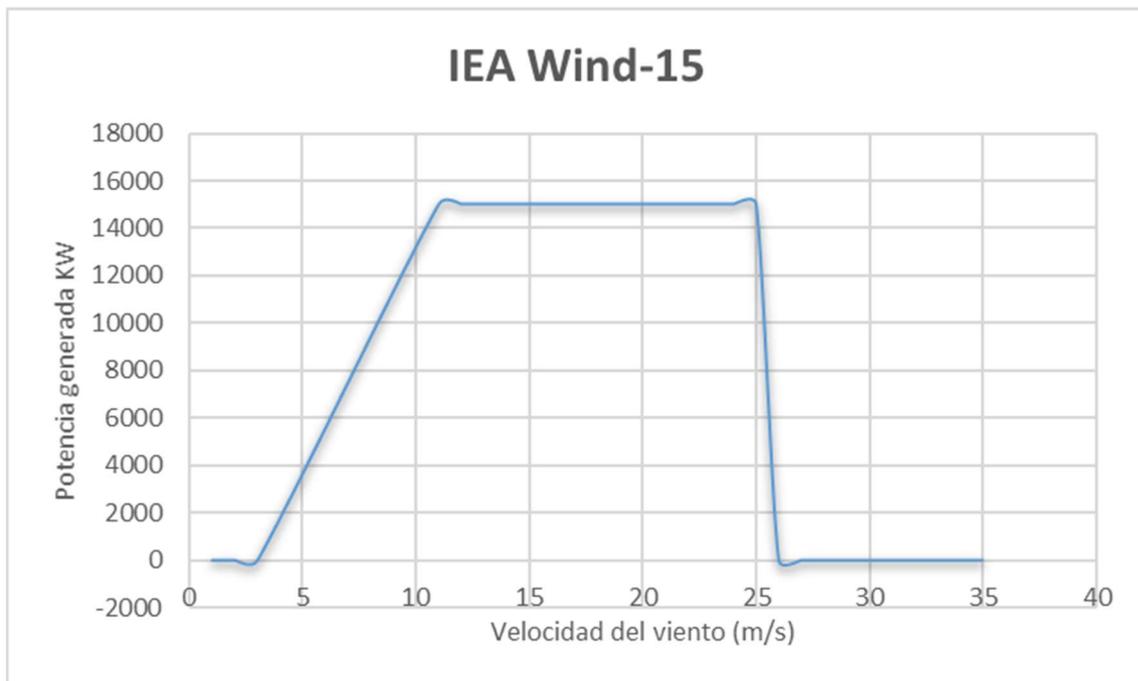


Figura 3 Curva de potencia para la turbina que se prevé utilizar en SanCibrao & SanBorondon.

Se puede apreciar el avance de la tecnología si nos fijamos en el tipo de cimentación utilizada para el emplazamiento de los diversos molinos eólicos que constituyen los parques en estudio, pasando de cimentaciones pilotadas, ya sean del tipo monopilotes o jackets (London Array, Egmond and Zee, Dan Tysk & Noirmoutiere) a plataformas flotantes ancladas al fondo marino mediante catenarias (SanCibrao & SanBorondón).

A continuación, se procede a dar una breve descripción de los parques eólicos anteriormente nombrados, para tener una idea de sus características y su localización.

#### 2.1.1 London Array

Este parque eólico, inaugurado el 4 de Julio del 2014, se encuentra a 20km al norte del estuario del río Támesis. Genera una potencia nominal de 630 MW, equivalente a la electricidad necesaria para aproximadamente unas 500.000 casas, reduciendo las emisiones de CO2 a la atmosfera en aproximadamente 900.000 toneladas al año.

Cuenta con 175 turbinas Siemens de 3.6 MW alineadas a los vientos dominantes de la zona, ocupando un área aproximada de 100 km<sup>2</sup>. Cada turbina se encuentra a una altura de 87m por encima del nivel del mar y cuenta unas palas de 60m de longitud.

Está diseñado para tener una vida útil de más de 20 años, funcionando 24h al día y 7 días a la semana.

### 2.1.2 Egmond aan Zee

Este parque eólico, inaugurado en octubre del 2007, se encuentra ubicado a 10 km de la costa del pueblo holandés de Egmond aan Zee, genera una potencia nominal de 108 MW, equivalente a la electricidad necesaria para aproximadamente 100.000 casas, reduciendo las emisiones de CO2 a la atmosfera en aproximadamente 150.000 toneladas al año.

Cuenta con 36 turbinas Vestas (V90) de 3MW alineadas a los vientos dominantes de la zona, ocupando un área aproximada de 27 km<sup>2</sup>.

Cada turbina se encuentra a una altura de 70m por encima del nivel del mar y cuenta con unas palas de 45m de longitud.

En su diseño, está planeado realizar un total de 3 o 4 mantenimientos al año para reparar cualquier desperfecto.

### 2.1.3 Dan Tysk

Este parque eólico, inaugurado en diciembre del 2014, se encuentra ubicado a 70km al oeste de la isla de Sylt, genera una potencia nominal de 288 MW, equivalente a la electricidad necesaria para aproximadamente 250.000 casas, reduciendo las emisiones de CO2 a la atmosfera en aproximadamente 400.000 toneladas al año.

Cuenta con 80 turbinas Siemens de 3.6MW alineadas a los vientos dominantes de la zona, ocupando un área aproximada de 70 km<sup>2</sup>.

Cada turbina se encuentra a una altura de 88m sobre el nivel del mar y cuenta con unas palas de 60m de longitud.

### 2.1.4 Noirmoutiere

Este parque eólico, que se inaugurará en el 2025, se encontrará ubicado a 11.7km de Yeu y a 16.5km de Noirmoutier, generará una potencia nominal de 496 MW, equivalente a la electricidad necesaria para aproximadamente 430.000 casas, reduciendo las emisiones de CO2 a la atmosfera en aproximadamente 650.000 toneladas al año.

Se puede apreciar claramente el avance de la tecnología en las turbinas, ya que en cuenta 62 turbinas Siemens Gamesa D8 de 8MW, cuando las turbinas de los parques anteriormente nombrados eran de aproximadamente 3MW, alineadas a los vientos dominantes de la zona, ocupando un área aproximada de 83 km<sup>2</sup>.

Cada turbina se ubicará a una altura de 92m sobre el nivel del mar y contará con unas palas de 83.5m de longitud

Está prevista una vida útil de 25 años trabajando 24h y 7 días a la semana.

### 2.1.5 San Cibrao

El parque de Sancibrao es uno de los macroproyectos de que Iberdrola Renovables pretende poner frente a las costas gallegas.

En concreto el parque se encontrará ubicado a menos de 14 kilómetros de la costa gallega (entre el Cabo Ortegal y el Cabo Estaca de Bares).

Los trámites para la instalación de este parque se comenzaron en junio de 2021, pero actualmente se encuentra pausado debido a las críticas de diversas cofradías pescadoras, dado que podían perjudicar la pesca en la zona.

Economía Digital Galicia (22 de julio de 2021) El Gobierno paraliza uno de los grandes parques eólicos marinos de Iberdrola en Galicia. *Economía Digital Galicia*.

### 2.1.6 SanBorondón

El parque de Sanborondón, proyecto promovido por Iberdrola, propone un total de 17 aerogeneradores, situados a 3 kilómetros de la orilla y una profundidad de entre 40 y 200 metros, en la casta de Maspalomas a Gando.

Dichos aerogeneradores han sido proyectados para disponerse sobre plataformas flotantes semisumergibles de acero.

Quesada, J. (6 de agosto de 2022). La implantación de la eólica marina, primero frente a Pozo Izquierdo. *Canarias7*.

## 2.2 ERA5

Esta base de datos es un producto de reanálisis del “European Centre for Medium-Range Weather Forecasts” (ECMWF) que provee datos estimados horarios de un gran número de variables atmosféricas, terrestres y oceánicas.

Tiene una definición de malla de 30 km ( $0.25^\circ$ ) y resuelve las variables atmosféricas mediante la utilización de 137 niveles desde la superficie terrestre hasta los 80 km de altura.

Con objeto de realizar este estudio se han obtenido los datos horarios de las velocidades del viento a 10 m de altura (componente vertical  $v$  y horizontal  $u$ ) y los referentes a la presión atmosférica en el nivel de agua.

Una vez extraídos los datos previamente descritos, se ha calculado su media y se han interpolado a una resolución de 60 km ( $0.5^\circ$ ), para posteriormente calcular los tipos de clima (Figura 4)

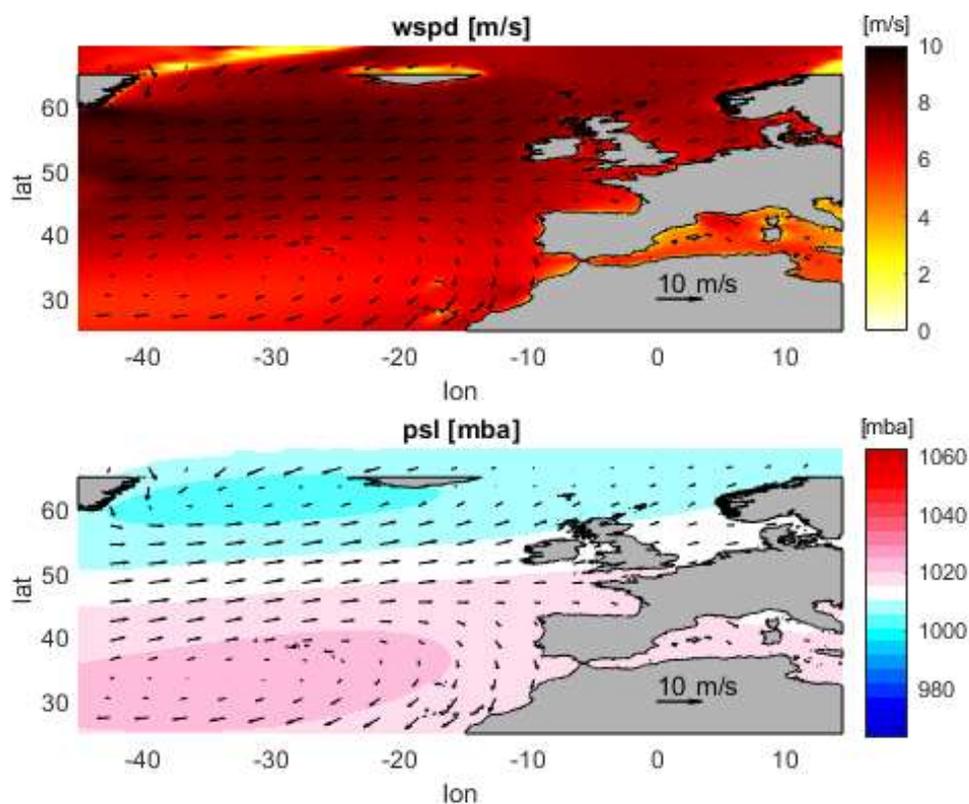


Figura 4 Presión media y media de la Velocidad absoluta del viento para la base de datos ERA5

Como se puede apreciar en el panel inferior de la Figura 4, la configuración de presión media en el Atlántico norte, se caracteriza por una zona de altas presiones sobre las islas Azores (Anticiclón de las Azores) y una zona de bajas presiones al norte, más concretamente ubicada entre Islandia y Groenlandia (Baja Islandesa).

En el mapa de viento a 10m de altura (Wm) mostrado en la parte superior de la Figura 4, se puede apreciar perfectamente una característica propia del Anticiclón de las Azores, y es una circulación de las masas de aire en sentido horario (lo que favorece la ciclogénesis tropical).

## 2.3 CMIP6

---

El “Climate Model Intercomparison Project” (CMIP), perteneciente al “World Climate Research Programme” (WCRP), es un proyecto para la generación de una base de datos global, publicada en el año 2022, en el cual se publican diferentes modelos para el estudio de diversos asuntos medioambientales (cuestiones científicas) de interés. Incluyendo simulaciones de alrededor de 120 modelos climáticos globales y la participación de unas 45 instituciones y organizaciones en todo el mundo.

Las cuestiones que se investigan en este programa (WCRP) son excesivamente grandes o complejas para que se puedan resolver por una disciplina o un único país, por ello se lleva a cabo mediante coordinación entre diversos países e instituciones, mediante un trabajo altamente inter-disciplinar.

En este estudio se utilizan los modelos que conciernen a los patrones de circulación atmosférica y tipos de clima, con el objetivo de caracterizar las variaciones en la velocidad del viento y la presión a nivel de agua en los parques eólicos previamente nombrados.

A continuación, se procede a dar una breve descripción de los modelos utilizados en el presente estudio:

### 2.3.1 CMCC-CM2-SR5

Se trata de un modelo realizado en Italia (“Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici”), en el año 2016.

Para la realización del presente modelo, se integró un componente de modelado específico para cada uno de los agentes en estudio.

- Aerosoles: MAM3.
- Atmósfera: CAM5.3.
- Tierra: CLM4.5 (modo BGC).
- Océano: Nemo 3.6, ORCA1 tripolar con una definición variable, de 1 grado en los polos, hasta llegar a una definición de 1/3 de grado en los trópicos, y 50 divisiones en sentido vertical
- Hielo marino: CICE4.0.

Todos los modelos, nombrados previamente, han sido ejecutados con resoluciones nominales 100km.

### 2.3.2 CMCC-ESM2

Se trata de un modelo realizado por la Unidad de Modelado del Sistema Terrestre de la división ODA (dedicada al desarrollo y la aplicación del Modelo del Sistema Terrestre de CMCC)

La versión actualmente publicada (CMCC-ESM2) se basa en la inclusión de la biogeoquímica marina, para representar los ciclos globales de carbono, en el modelo acoplado al clima “CMCC-CM2” (Cherchi et al. 2019) que da cuenta de la dinámica interactiva de los componentes de la atmósfera, el océano, el hielo marino y la tierra.

Para la realización del presente modelo, se integró un componente de modelado específico para cada uno de los agentes en estudio:

- Atmósfera: CAM5.4.
- Océano: NEMO3.6.
- Hielo marino: CICE4
- Superficie terrestre: CLM4.5.
- Biogeoquímica oceánica: BFM5.1.

### 2.3.3 EC-Earth3

Se trata de un modelo que se ha realizado como parte de un consorcio europeo, con el objetivo de desarrollar y aplicar un patrón basado en el pronóstico estacional del ECMWF (“European Centre for Medium-Range Weather Forecasts”) para proporcionar una información climática confiable y así poder avanzar en el conocimiento científico de la Tierra.

Cuenta con 5 modelos diferentes, de manera de que cada uno agrupa unos determinados ámbitos, siendo ámbitos comunes en todos: la atmósfera, la superficie terrestre, el hielo marino y el océano (Döscher et al. 2022).

Como el objeto del presente estudio es la caracterización de los diversos patrones de circulación atmosférica para el análisis de 6 parques eólicos offshore, se ha tomado el modelo EC-Earth3, que integra los siguientes componentes de modelado para cada ámbito:

- Atmósfera: IFFS36r4
- Superficie terrestre: HT-ESSEL
- Océano: Nemo3.6.
- Hielo marino: LIM3

#### 2.3.4 HadGEM3-GC31-MM

Se trata de un modelo climático realizado en Reino Unido por Met Office Hadley Centre (MOHC), en el 2016.

Para la realización del presente modelo, se integró un componente de modelado específico para cada uno de los agentes en estudio.

- Aerosol: UKCA-GLOMAP
- Atmósfera: MetUM-HadGEM3-GA7.1, N216 con divisiones cada 1km vertical, teniendo el nivel superior a 85km.
- Tierra: JULES-HadGEM3-GL7.1.
- Océano: NEMO-HadGEM3-GO6.0, eORCA025 tripolar con una definición de 0.25 grados y 75 niveles en sentido vertical.
- Hielo marino: CICE-HadGEM3-GSI8, eORCA025 tripolar con una definición de 0.25 grados.

Estos modelos han sido ejecutados con unas resoluciones nominales de 100 km para la atmósfera y la tierra, y de 25km para el océano y el hielo marino.

#### 2.3.5 MPI-ESM1-2-HR

Se trata de un modelo realizado por el “Max-Planck-Institut für Meteorologie” (Hamburgo, Alemania), en el 2016.

Para su realización se integró un componente de modelado específico para cada uno de los agentes de estudio:

- Atmósfera: ECHAM6.3
- Tierra: JSBACH3.2
- Océano: MPIOM1.6
- Biogeoquímica oceánica: HAMOCC6

### 3 Metodología

---

A continuación, se procede a la explicación del método utilizado para la extracción de los diversos tipos de clima, la evaluación de la pericia de los modelos climáticos, y la caracterización del clima a futuro en la zona.

El presente estudio se encuentra localizado en el Atlántico nor-oriental, en un área definida por las siguientes coordenadas geográficas:

- $-45 \leq Longitud \leq 14.5$
- $25 \leq Latitud \leq 69.5$

Para la obtención de los datos de viento y presiones sobre el nivel del mar, se han utilizado únicamente aquellos nodos de la malla, definida entre las coordenadas previamente expuestas, que contienen agua, descartando todos aquellos que se encuentran sobre tierra.

Para ello se ha utilizado la siguiente máscara, definida para la base de datos ERA5, que distingue aquellos puntos que se sitúan sobre el agua de aquellos que se sitúan sobre tierra (Figura 5).

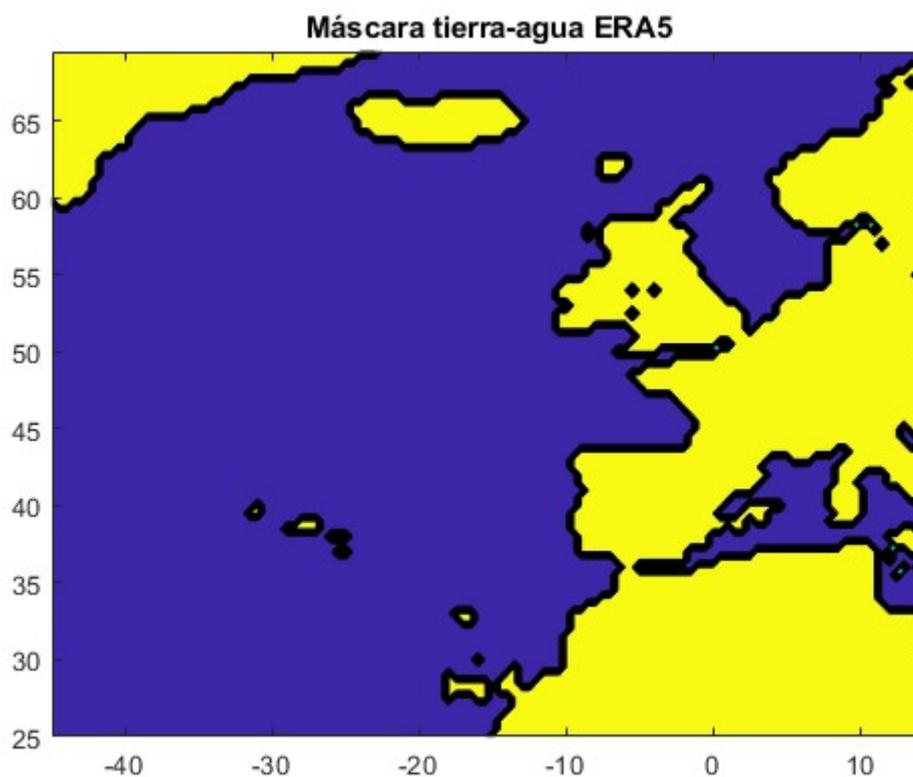


Figura 5 Máscara ERA5 (puntos de agua y tierra)

En el presente estudio se seguirá el siguiente diagrama de flujo (representado en la Figura 6): Se comenzará reduciendo las dimensiones de la base de datos, tomada como referencia histórica (ERA5), mediante el uso del análisis de componentes principales (PCA), con el objetivo de reducir el tiempo de cómputo.

Posteriormente se procederá al cálculo de los diversos tipos de clima para ERA5 utilizando el algoritmo Kmeans. Una vez conocidos los tipos de clima, se obtendrá su frecuencia, tanto para la base de datos de ERA5 como para los datos históricos de los modelos del CMIP6, de manera de poder comparar ambas bases de datos.

Como la comparación visual entre las bases de datos no es suficiente, se calcularán dos índices estadísticos (RE y SI) para ver qué modelo se ajusta mejor a la referencia histórica. Una vez se han obtenido (si todos los modelos fuesen muy similares, se utilizará el ensemble de estos), se calcularán los Indicadores de recurso eólico (velocidad media del viento, percentil 99% de la velocidad del viento, densidad de potencia del viento, tiempo operacional, rendimiento energético bruto y el factor de capacidad) para caracterizar las variaciones previstas por el modelo o el ensemble en los diversos parques eólicos en estudio.

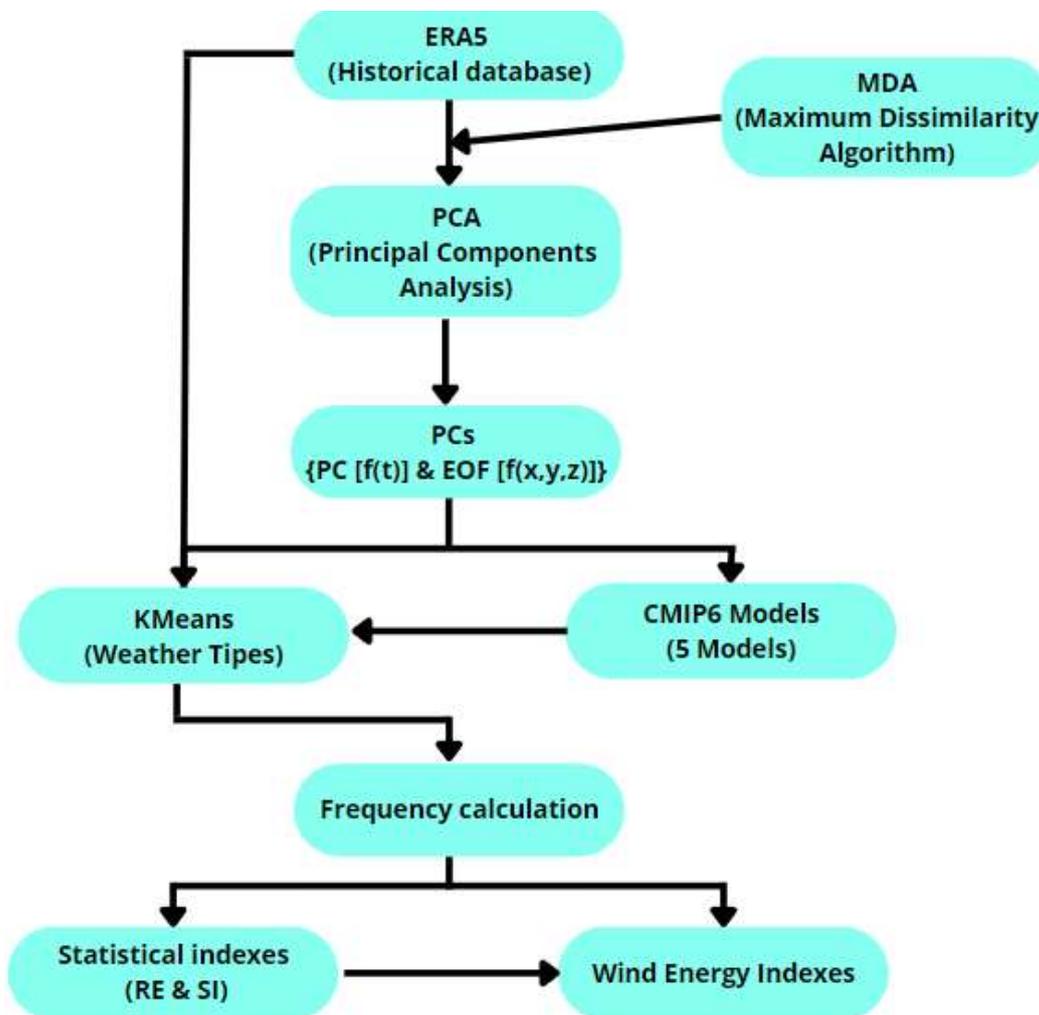


Figura 6 Esquema de la metodología aplicada para el cálculo de los tipos de clima y sus frecuencias en ambas bases de datos (ERA5 y CMIP6)

### 3.1 Determinación de los tipos de tiempo (WT)

Los tipos de clima, también llamados “weather types” (WT), pretenden representar los diferentes patrones de circulación atmosférica en la zona de estudio.

Para ello se ha utilizado la base de datos ERA5 como referencia histórica, utilizando la velocidad del viento a 10 m de altura y la presión a nivel de agua, para una escala temporal horaria y una malla de 0.5° (60 km), representativa de todo el atlántico Norte.

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) con objeto de quedarnos con aquellos patrones de circulación climática más importantes, obteniendo una serie de Componentes Principales (PCs) que han sido ordenados en función del porcentaje de varianza del sistema original que describen. De esta forma ha sido posible seleccionar aquellos representativos del 95% de la varianza, reduciéndose, de esta manera, en gran medida la dimensión de los datos a procesar y en consecuencia el tiempo de cómputo.

Se han obtenido un total de 15 Componentes Principales representativos del 95% de la varianza (Figura 7). Estas componentes principales pueden representarse como la combinación de unas componentes espaciales (EOFs, izquierda) y temporales (PC, derecha).

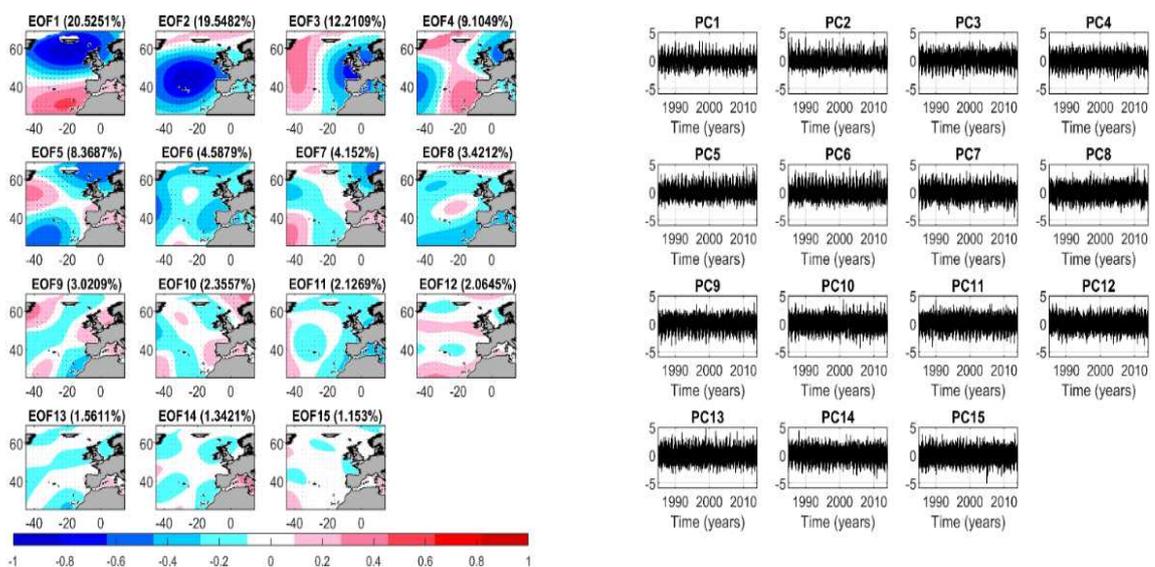


Figura 7 Variables espaciales (EOF) y temporales (PC) del análisis de componentes principales.

Una vez se ha reducido el número de componentes principales (PCs), se procede a clasificar los sistemas de circulación meteorológica en diversos tipos de clima (WT). Para ello se ha utilizado un método denominado “K-Means algorithm” (KMA), el cual, a partir de una preselección de un número objetivo de tipos climáticos  $n$  (en este caso se ha realizado el método para  $n=36, 64$  y  $100$ ), irá agrupando el conjunto original de la base de datos en los  $n$  grupos, formados por aquellos patrones de circulación climática que son más semejantes entre sí (Figura 8, Figura 9 & Figura 11).

Para realizar la preselección de dicho número  $n$  de datos, se ha utilizado la metodología de máxima disimilitud (MDA), en la que, a partir de una nube de datos, se seleccionan un número  $n$  de datos que cumplen la condición de encontrarse lo más separados entre sí. De esta manera se puede obtener una muestra lo más completa posible, sin obviar datos extremales.

Cabe decir, que los patrones mostrados como “tipos de clima” son aquellos, que estando dentro de un grupo, se encuentran lo más cercanos al centroide de dicho grupo.

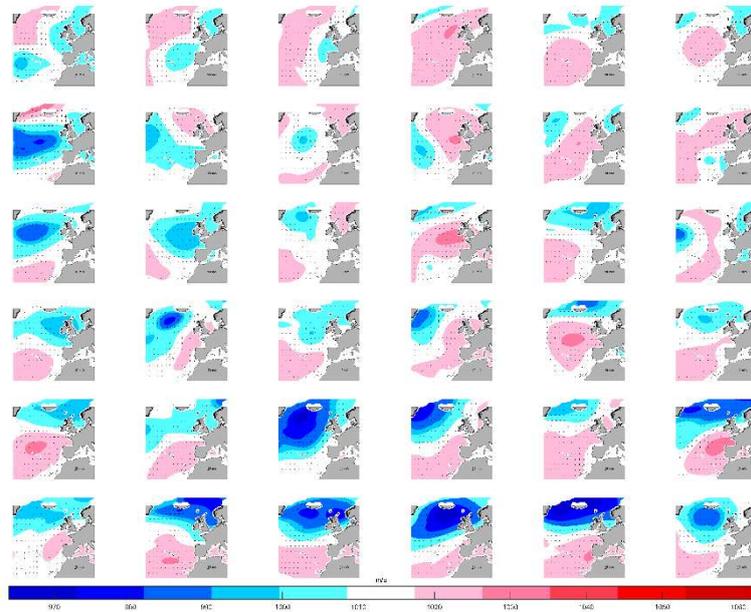


Figura 8 Tipos de clima (presiones a nivel del mar) para  $n$  (número de datos) = 36

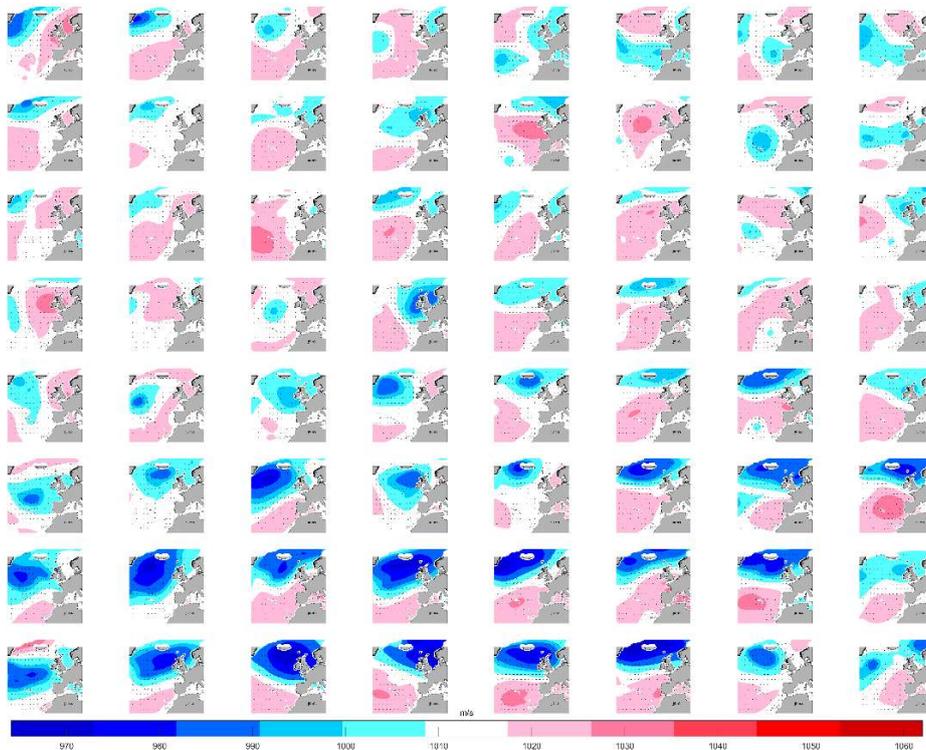


Figura 9 Tipos de clima (presiones a nivel del mar) para  $n$  (número de datos) = 64

En el presente estudio, tras ver los tipos de clima obtenidos para n igual a 36, 64 y 100 casos, se ha decidido utilizar aquel que muestra un mayor número de casos (n=100), de manera de poder representar con una mayor precisión los diferentes tipos de clima (WT) que se dan en la zona (Figura 11).

Una vez obtenidos los tipos de clima, se procede al cálculo de las frecuencias de cada tipo de clima (100 tipos). Para ello se procede a dividir el número de veces que se repite un determinado tipo de clima entre el número total de datos, representándose posteriormente en un gráfico de colores, en el que se muestran con colores más intensos aquellos tipos de clima que son más frecuentes (Figura 13).

### 3.2 Pericia de los modelos climáticos

---

Con objeto de determinar la validez de los diversos modelos climáticos del CMIP6, se procede a la obtención de la frecuencia de cada uno de los tipos de clima, obtenidos previamente para la base de datos ERA5 (referencia histórica), en cada modelo climático.

Previo a ello, es necesario que ambas bases de datos tengan la misma resolución, en este caso se ha escogido, dada la extensión a analizar, una resolución de 0.5 grados (resolución ERA5). Como los modelos climáticos tienen resoluciones diferentes, se ha realizado una interpolación de los datos de los modelos a la malla generada con ERA5, obteniéndose una malla con un total de 10800 puntos equidistantes entre sí.

Con el objeto de llevar a cabo una comparación justa entre los modelos climáticos del CMIP6 y la base de datos ERA5 (tomada como referencia histórica), es necesario que los Componentes Principales (PCs) sean iguales en ambas bases de datos, con el objeto de obtener los mismos patrones climáticos en el estudio de los diversos tipos de clima que pueden verse en el Atlántico Norte.

Una vez se han agrupado los diferentes patrones climáticos en los diversos tipos de clima obtenidos en ERA5, se procede a determinar la frecuencia de cada tipo de clima, para cada uno de los modelos del CMIP6, para posteriormente representarlos en un gráfico de colores, en el que se muestran con colores más intensos aquellos tipos de clima que son más frecuentes (Figura 10).

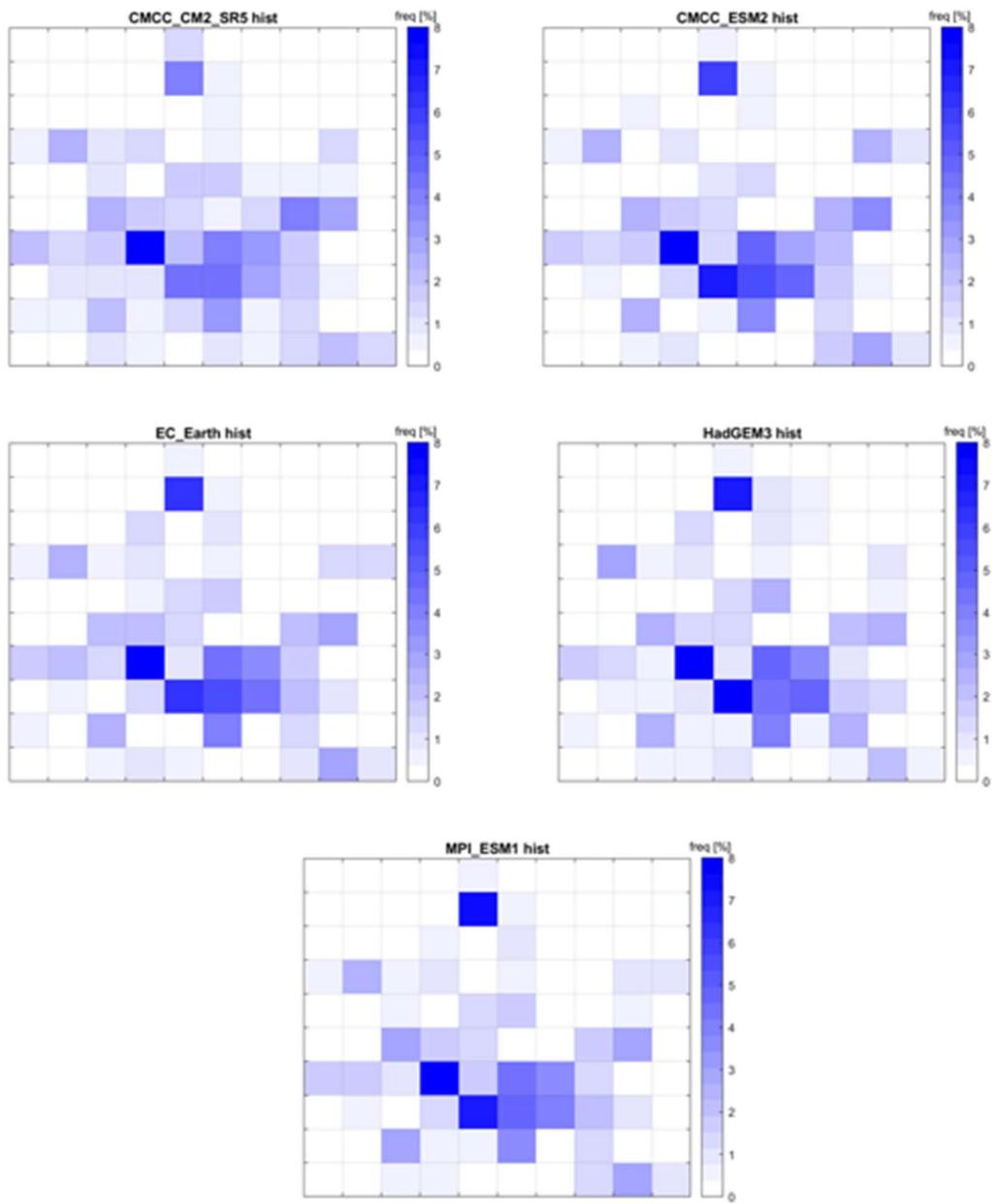


Figura 10 Frecuencias de los diversos tipos de clima para cada uno de los modelos del CMIP6

Posteriormente y con el objetivo de llevar a cabo una comparación más rigurosa, se ha llevado a cabo un análisis estadístico de los diversos modelos pertenecientes al CMIP6, con el objetivo de determinar qué modelo reproduce con mayor exactitud los datos históricos (ERA5).

A partir de los valores de frecuencia de ERA5 y de los modelos del CMIP6 se ha llevado a cabo el cálculo de dos índices estadísticos: Scatter Index (SI) & Relative Entropy (RE). Ambos indican el grado de similitud de una variable respecto a la otra, diferenciándose en que el RE da un mayor peso a los eventos extremos que el SI.

Cabe mencionar que el grado de similitud es mayor, cuanto menor sea el índice:

- Scatter Index:

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - p'_i)^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N (p'_i)}{N}} \quad (1)$$

Donde:

- $p_i$  = Frecuencia de ocurrencia de un determinado Tipo de Clima (WT) en ERA5.
- $p'_i$  = Frecuencia de ocurrencia de un determinado Tipo de Clima en el modelo del CMIP6.
- $N$  = Numero total de Tipos de Clima (en este caso 100).

- Relative Entropy

$$RE = \sum_{i=1}^N p_i \left| \log \left( \frac{p_i}{p'_i} \right) \right| \quad (2)$$

Donde:

- $p_i$  = Frecuencia de ocurrencia de un determinado Tipo de Clima (WT) en ERA5.
- $p'_i$  = Frecuencia de ocurrencia de un determinado Tipo de Clima en el modelo del CMIP6

### 3.3 Indicadores del recurso eólico

---

El análisis del cambio climático en la industria de la energía eólica se puede evaluar mediante una serie de indicadores. En este estudio, tomando como referencia a Susini et al. (2021), además de los parámetros normalmente estudiados en otros estudios de cambio climático, como son la velocidad media del viento y la densidad de potencia, se incluyen la velocidad extremal del viento, la cantidad de energía anualmente generada, el factor de planta y el tiempo operacional.

Los cálculos se han realizado para cada uno de los 6 parques en estudio, utilizándose la velocidad del viento corregida para que se encuentre a la altura de la turbina (3), en lugar de a una altura de 10m (altura a la que se proporciona en los modelos del CMIP6 y en ERA5).

$$W = w_{10} \left( \frac{h_m}{10} \right)^\alpha \quad (3)$$

Donde:

- $W$  = Velocidad del viento referenciada a la nueva altura de turbina.
- $w_{10}$  = Velocidad del viento a 10m de altura.
- $h_m$  = Altura de la turbina.
- $\alpha$  = Se adoptará un valor de 0.14 para el presente estudio, en conforme con anteriores estudios, como por ejemplo (Hueging et al., 2013 & Moemken et al., 2018).

Todos los indicadores que se van a detallar a continuación, derivan de la comparación entre los valores históricos y las predicciones a futuro.

#### 3.3.1 Densidad de potencia del viento (“Wind Power Density”)

Este índice, representa la cantidad de potencia generada por unidad de volumen de viento, pudiendo ser comparado entre los diferentes parques eólicos, pese a no tener la misma turbina.

$$WDP = \frac{1}{2} \rho w^3 \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (4)$$

Donde:

- $w$  = Velocidad media del viento a la altura de la turbina (hh).
- $\rho$  = Densidad del viento, que sigue la siguiente formulación que tiene en cuenta el efecto de la altura (Hennessey., 1977):

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \times 10^{-4} \times hh \quad (5)$$

#### 3.3.2 Percentil 99 de la velocidad del viento

Se procede al cálculo del percentil 99 de la velocidad del viento, ya que es representativo del viento extremal, que juega un papel fundamental en el dimensionamiento de la estructura.

### 3.3.3 Tiempo operacional

Se define como tiempo operacional, aquel tiempo en el que la turbina se encuentra produciendo energía ( $n_{cico}$ ) y el tiempo total de la serie temporal ( $n_{tot}$ ). Cabe destacar que el tiempo en el que la turbina produce energía, es aquel en el que la velocidad del viento se encuentra comprendida entre la velocidad de arranque y la velocidad de parada (Figura 2 & Figura 3).

$$OT = \frac{n_{cico}}{n_{tot}} \quad [\%] \quad (6)$$

### 3.3.4 Rendimiento energético bruto

El rendimiento energético bruto se evalúa mediante la relación proporcionada por Measnet (2016).

$$AEP_{gross} = \sum_i P(w_i)H_i \quad [KW h] \quad (7)$$

Donde:

- $P(w_i) =$  Energía generada para cada intervalo de velocidades.
- $H_i =$  Número de horas en las que se repite cada intervalo en un año.

### 3.3.5 Factor de capacidad

El factor de capacidad se calcula dividiendo el rendimiento energético bruto por una producción teórica anual, siendo esta el producto de la capacidad nominal ( $P_n$ ) y el número total de turbinas disponibles.

$$CF = \frac{AEP_{gross}}{P_n n_y} \quad (8)$$

## 4 Resultados

### 4.1 Clasificación de tipos de tiempo en el clima presente

A partir de la clasificación realizada, se han obtenido una serie de tipos de tiempo (WT) y su frecuencia de presentación a partir de los datos históricos de ERA5. Estos patrones de circulación permiten caracterizar y describir las condiciones climáticas en la región de estudio.

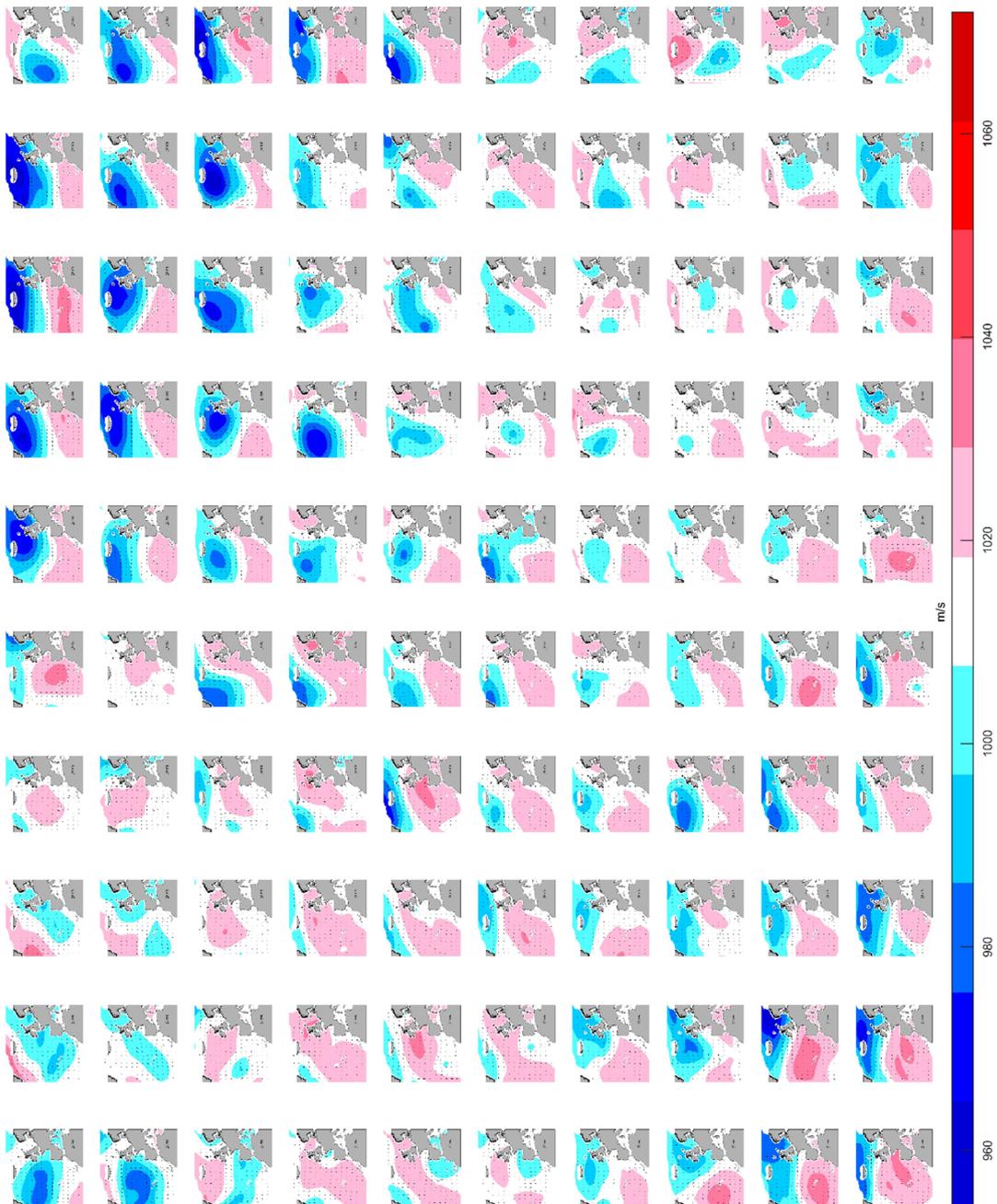


Figura 11 Tipos de clima (presiones a nivel del mar) para  $n$  (número de datos) = 100

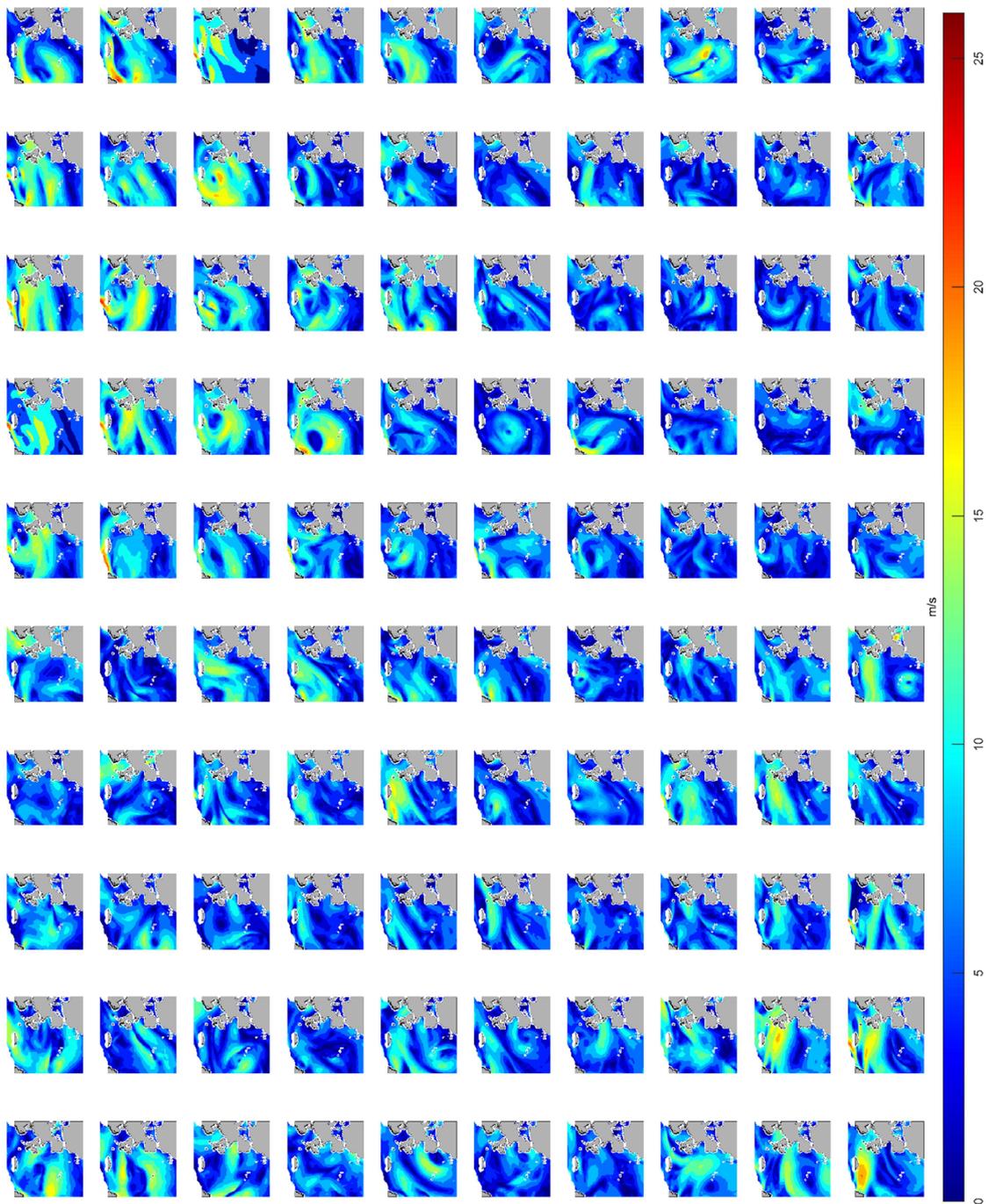


Figura 12 Tipos de clima (velocidades medias a 10m de altitud) para  $n$  (número de datos) = 100

En la Figura 11 se muestran los diversos patrones de presión atmosférica que se dan en todo el Atlántico Norte, representándose en una escala de rojos las altas presiones, superiores a 1013mb, y en una escala de azules las bajas presiones, inferiores a 1013mb. En cambio, en la Figura 12 se muestran los diversos patrones del viento a lo largo del Atlántico Norte, representándose los vientos más importantes en color rojizo y los menos importantes en un azul intenso. Se puede apreciar que la mayoría de ellos son representativos de la zona, pudiendo ver el anticiclón de las Azores, con los vientos en sentido horario, y la baja islandesa (zona de bajas presiones) ubicada entre Islandia y Groenlandia.

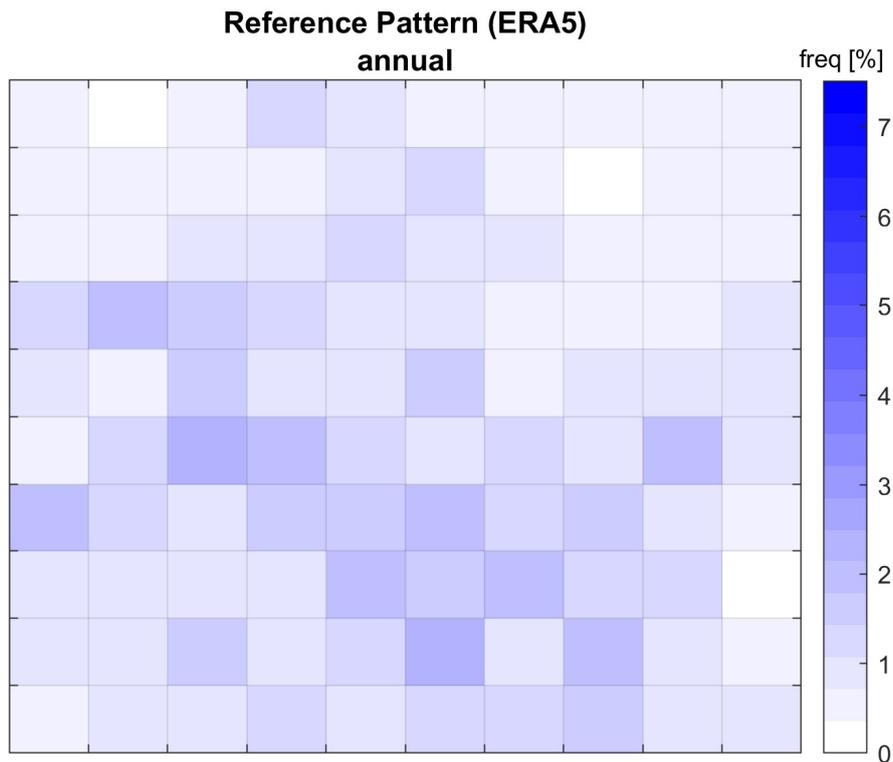


Figura 13 Frecuencias anuales de los diversos tipos de clima

Además del cálculo de las frecuencias del ensemble de ERA5 (Figura 13), se ha evaluado esta información para cada estación del año (primavera, verano, otoño e invierno), viéndose que en verano hay una gran frecuencia de ocurrencia de los tipos de clima más frecuentes (situados en la zona central de la figura), ocurriendo en invierno lo contrario, encontrando frecuencias mayores en los tipos de clima extremales (Figura 15). Si, por el contrario, observamos las estaciones de primavera y otoño podemos que no hay una gran concentración de tipos de clima, pudiéndose dar la mayoría de ellos con aproximadamente la misma frecuencia (Figura 14).

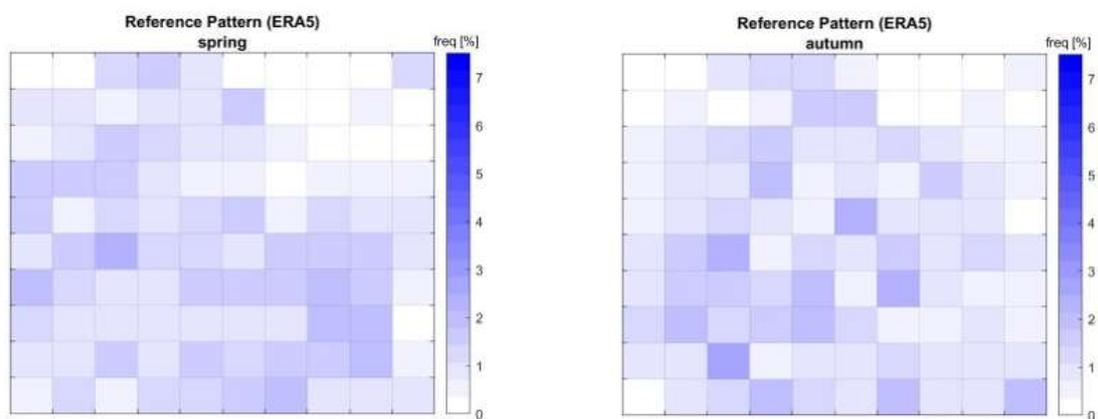


Figura 14 Frecuencias para los diversos tipos de clima en las estaciones de primavera y otoño en ERA5

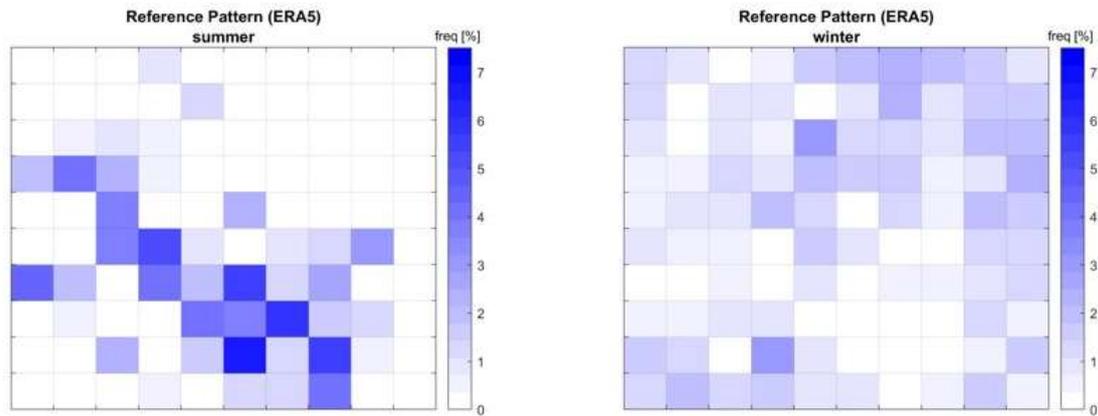


Figura 15 Frecuencias para los diversos tipos de clima en las estaciones de primavera y otoño en ERA5

Observando en el gráfico de frecuencias anuales, se puede ver como los tipos de clima con mayor frecuencia, corresponden a aquellos que tienen una frecuencia cercana al 7% en el verano, por lo que se puede afirmar, que el verano tiene una gran influencia en las frecuencias de los diversos tipos de clima anuales.

A continuación, se procede a mostrar aquellos tipos de clima con una mayor y menor frecuencia de ocurrencia (Figura 16 & Figura 17).

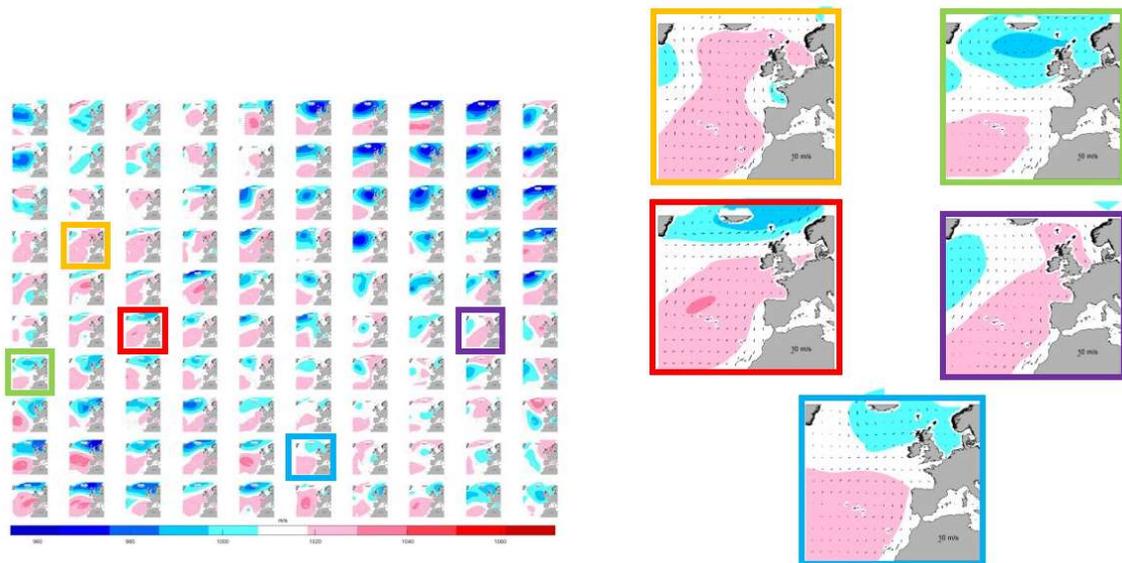


Figura 16 Tipos de clima con mayor frecuencia de ocurrencia (ERA5)

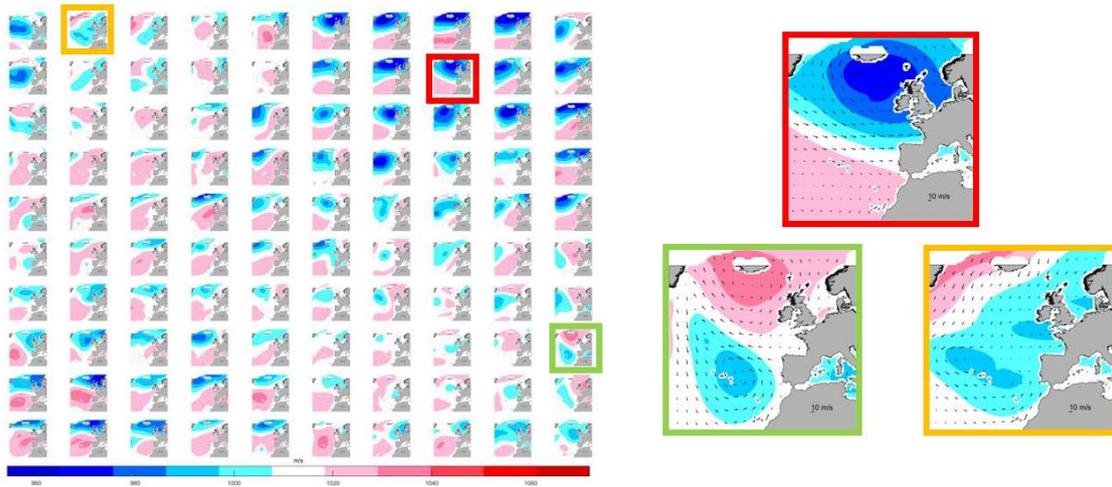


Figura 17 Tipos de clima con menor frecuencia de ocurrencia (ERA5)

En las figuras mostradas anteriormente, se verifica que los tipos de clima (WT) que tienen una mayor frecuencia (superiores al 1.8%), son los más usuales en la zona de estudio, encontrándose el conocido anticiclón de las Azores, donde los vientos giran en sentido horario (Figura 17). En cambio, como ya se podía prever, los tipos de clima con menores frecuencias se corresponden con aquellos extremales, pudiéndose ver una gran borrasca en la zona norte del Atlántico o la no existencia del nombrado anticiclón de las Azores (Figura 18).

## 4.2 Evaluación de la pericia de los modelos climáticos del CMIP6

En este apartado, se procede a identificar aquellos tipos de clima con una mayor y menor frecuencia para el conjunto de modelos en estudio del CMIP6.

Se ha realizado un gráfico frecuencial por modelo en estudio y uno representativo de la media de todos los modelos (Figura 18 & Figura 19).

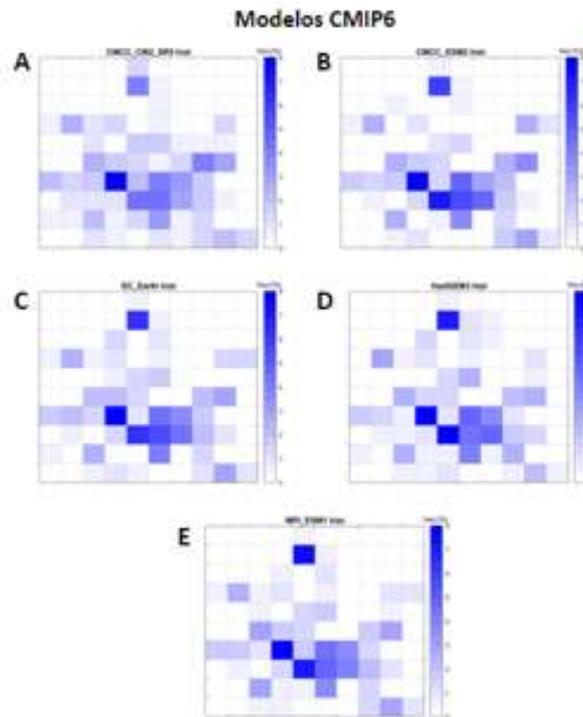


Figura 18 Probabilidad de ocurrencia de los diferentes tipos de clima en los modelos del CMIP6 (A: CMCC\_CM2\_SR5 B: CMCC\_ESM2 C: EC\_Earth D: HadGEM3 E: MPI\_ESM1)

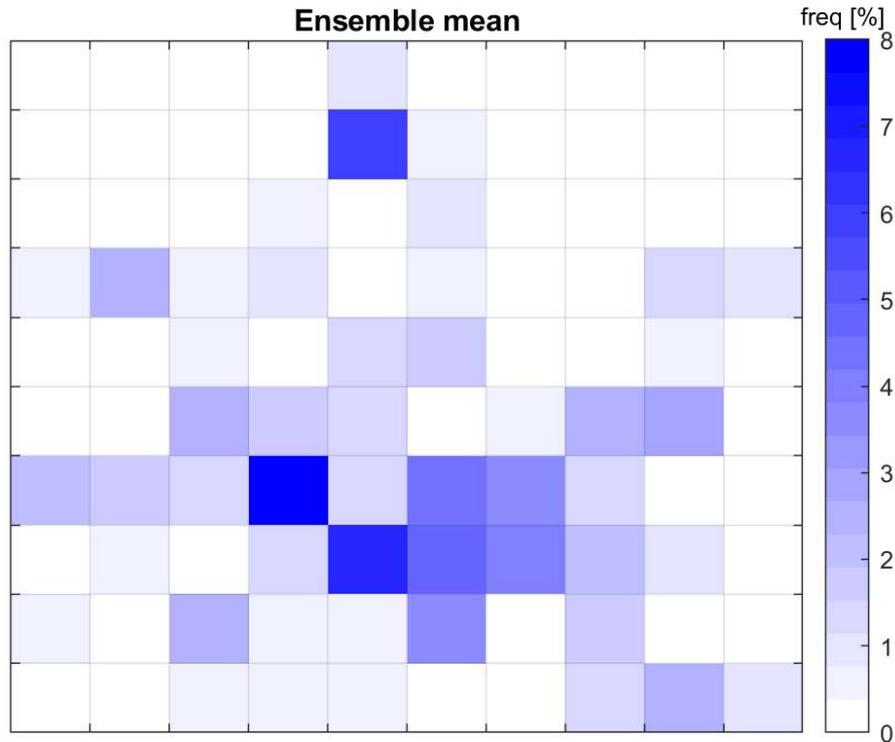


Figura 19 Media de la probabilidad de ocurrencia de un determinado tipo de clima para el conjunto de modelos en estudio del CMIP6

Tanto en la Figura 18 como en la Figura 19, se puede apreciar, en los modelos del CMIP6, una clara probabilidad de ocurrencia mayor en 3 tipos de clima, siendo estos los patrones más usuales en el Atlántico Norte, en los que se puede encontrar un anticiclón (zona de altas presiones) al sur, cercana o sobre las islas Azores y una borrasca (zona de bajas presiones) situado entre Groenlandia e Islandia (Baja Islandesa).

A continuación, se procede a analizar los distintos modelos climáticos y a su comparación con la base de datos ERA5, para determinar si se adecúan a los datos obtenidos en ERA5, con el objetivo de realizar posteriormente un análisis a futuro de las velocidades del viento en los 6 parques eólicos en estudio.

Las discrepancias en la frecuencia entre la media de las frecuencias de los modelos climáticos del CMIP6 ( $F_{CMIP6}$ ) y los datos históricos de ERA5 ( $F_{ERA5}$ ) se representan en la Figura 21, en la cual los puntos negros representan aquellos tipos de clima en los que la diferencia entre al menos 4 de los 5 modelos con ERA5 son concordes en signo, esto se puede apreciar en la Figura 20, donde se representan las discrepancias en las frecuencias de cada uno de los modelos climáticos y ERA5.

$$Discrepancia = \frac{F_{CMIP6} - F_{ERA5}}{F_{ERA5}} \quad (9)$$

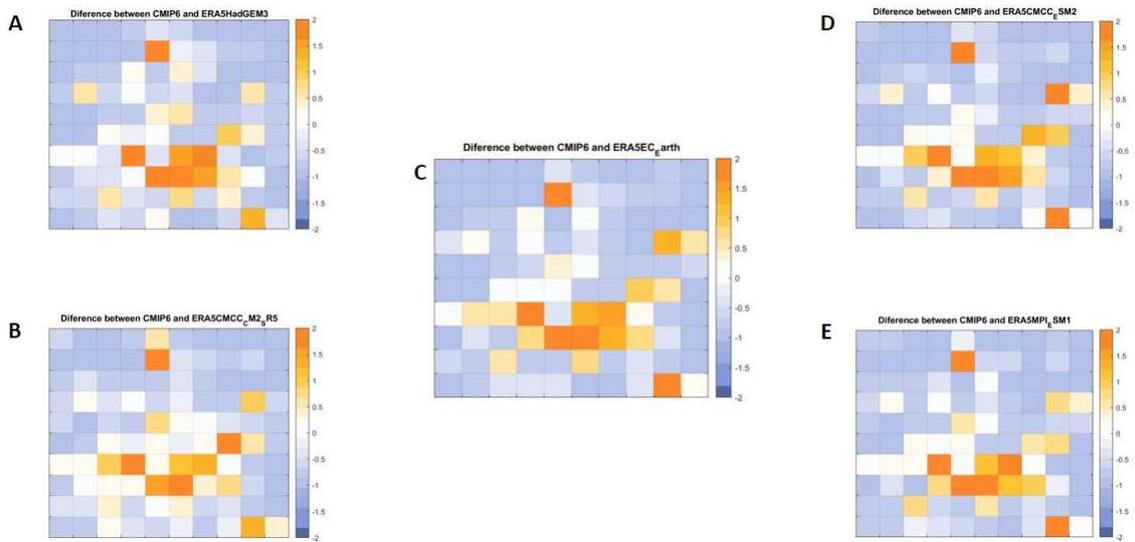


Figura 20 Variaciones frecuenciales entre los modelos del CMIP6 y la referencia histórica ERA5  
(A: MPI\_ESM1; B: CMCC\_CM2\_SR5 ; C: EC\_Earth ; D: HadGEM3 ; E: CMCC\_ESM2)

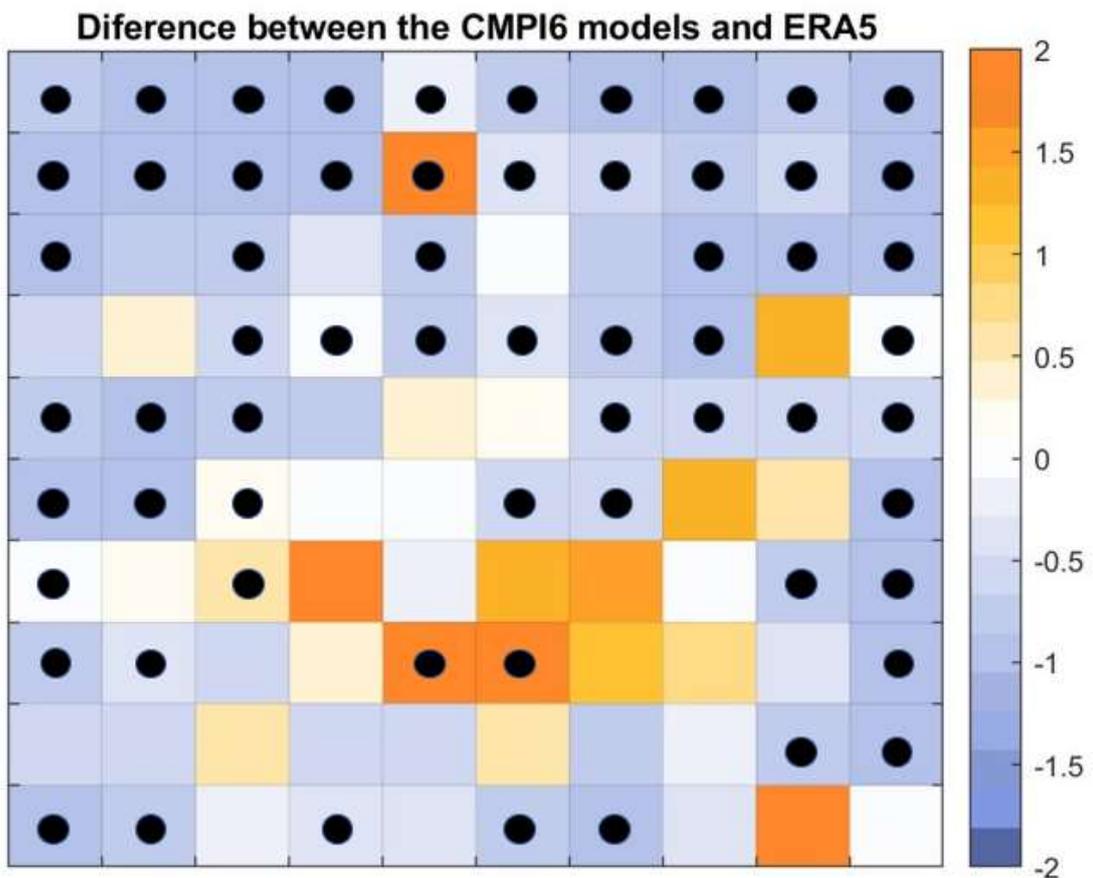


Figura 21 Discrepancias en la frecuencia del Ensemble de los modelos climáticos del CMIP6 y la referencia histórica ERA5. Los puntos negros son aquellas frecuencias que se repiten en varios modelos del CMIP6

Como se puede ver en la Figura 21 los modelos del CMIP6 subestiman las frecuencias de la mayor parte de los WT, siendo esta variación de en torno a 0.5.

Para verificar la validez de los modelos del CMIP6 se ha realizado un análisis estadístico, mediante el cálculo del Relative Entropy y del Scatter Index, obteniendo los resultados presentados en Figura 22:

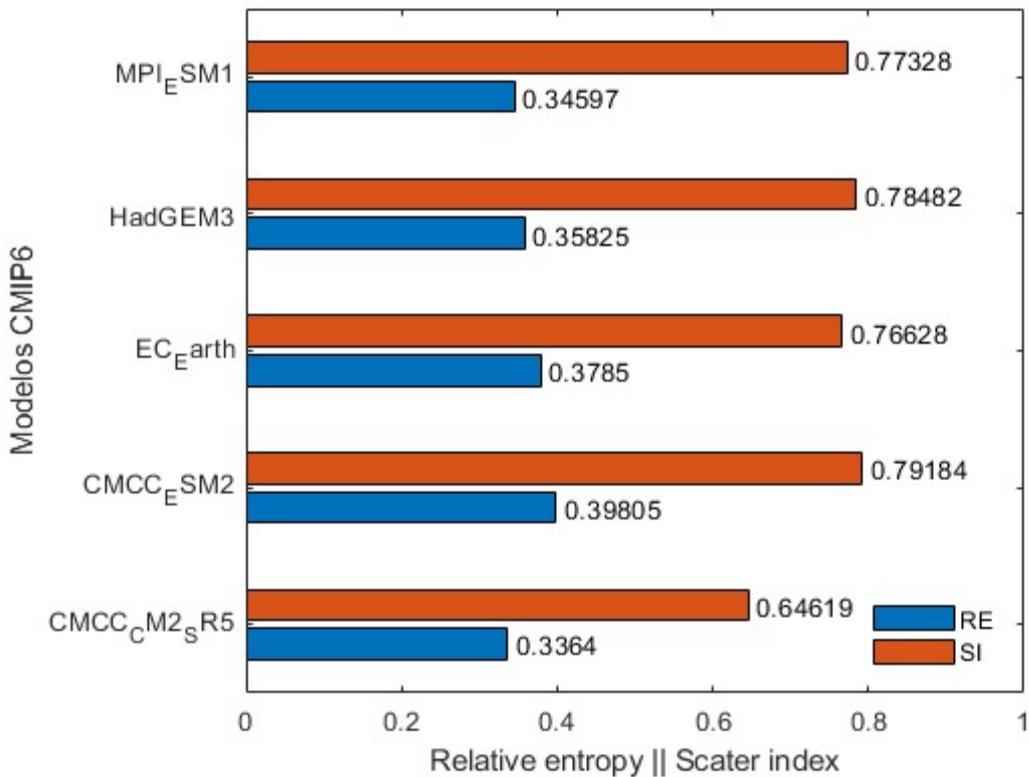


Figura 22 Índices Estadísticos (Relative Entropy & Scatter Index) para los 5 modelos CMIP6 analizados.

En la Figura 22, se puede apreciar que el modelo CMCC\_CM2\_SR5 es el que mejor se ajusta a los datos de la referencia histórica ERA5. Pero, como todos los demás modelos son muy parecidos y con objeto de no quedarnos con un único modelo, se procederá a la utilización de la media de todos los modelos del CMIP6 para cálculos posteriores.

### 4.3 Evaluación de las variaciones a futuro en los modelos del CMIP6

También se ha realizado un análisis de los modelos climáticos del CMIP6, con el fin de comprobar la variación en la frecuencia de cada uno de los 100 tipos de clima (WT) de los datos pronosticados (2030-2060, ssp585) frente a los datos históricos. Una vez más, los puntos negros en la Figura 23 representan aquellas variaciones repetidas en el mismo cálculo realizado para cada uno de los modelos del CMIP6, que se puede apreciar en la Figura 24

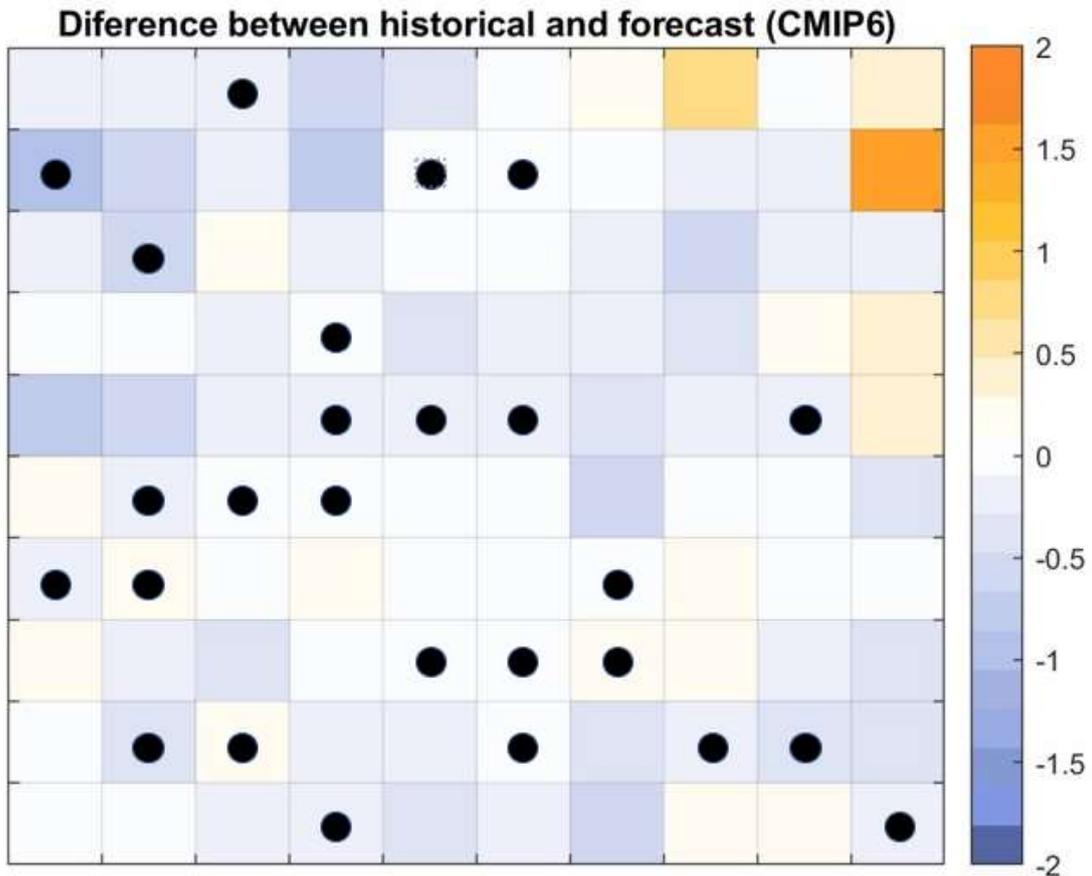


Figura 23 Discrepancias en la frecuencia entre el pronóstico y el dato histórico de los modelos climáticos del CMIP6. Los puntos negros identifican WT en los cuales el signo de la variación de la frecuencia es robusto entre los modelos del CMIP6

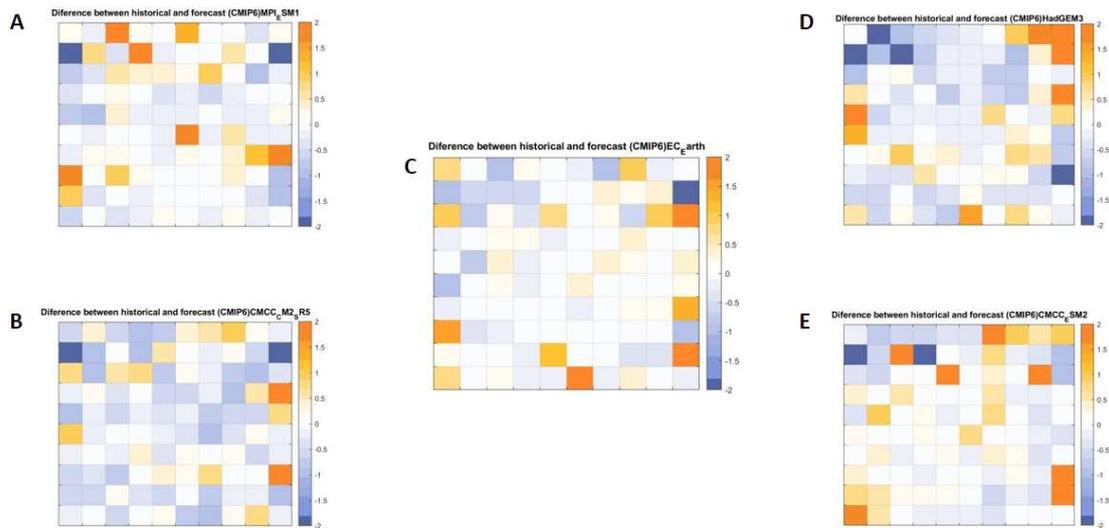


Figura 24 Variaciones frecuenciales de los datos pronosticados e históricos en cada modelo del CMIP6 (A: MPI\_ESM1; B: CMCC\_CM2\_SR5 ; C: EC\_Earth ; D: HadGEM3 ; E: CMCC\_ESM2)

Como se puede ver en la Figura 23, las variaciones de frecuencia en los diversos tipos de clima entre el periodo pronosticado (2030 – 2060) y el periodo histórico, son relativamente pequeñas. Cabe señalar en algunos tipos de clima, variaciones relativamente bruscas, dándose con una mayor frecuencia en aquellos extremales (que se encuentran en las proximidades al margen de la gráfica).

Con el objeto de llevar a cabo una visualización más sencilla del aumento o disminución de las frecuencias de los diversos tipos de clima para los modelos del CMIP6, se ha realizado el grafico representado en la Figura 25, donde se ha indicado únicamente si el pronóstico a futuro (2030 – 2060) de las frecuencias del CMIP6 tiende a crecer o decrecer respecto a los datos históricos del mismo modelo. Se muestran en color azul los WTs donde la frecuencia de la predicción es menor que en los datos históricos y en color verde, donde dichos la frecuencia futura es mayor que en los datos históricos.

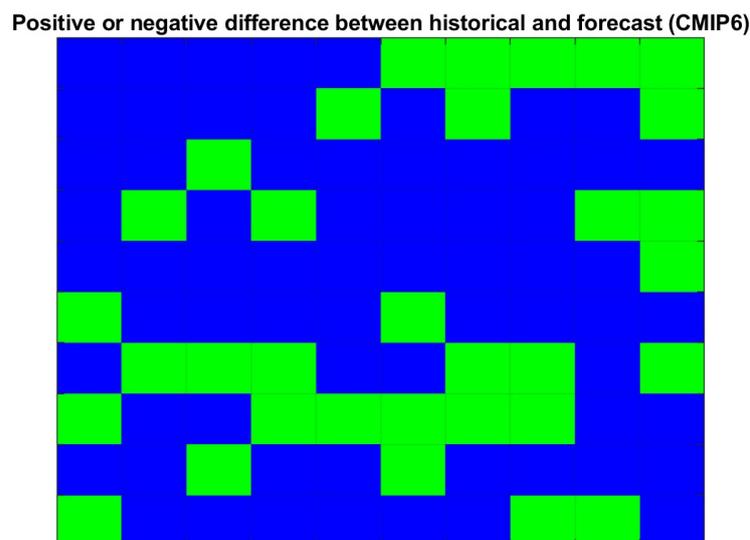


Figura 25 Aumento o disminución de los datos frecuenciales para los distintos tipos de clima en los modelos del CMIP6. Representándose en color verde el aumento y el color azul la disminución de la frecuencia.

Se puede observar que la frecuencia de la mayoría de los tipos de tiempo tiende a una disminución, observándose únicamente un 33% de tipos de clima que tienden a un aumento en la frecuencia.

A continuación, y con objeto de proporcionar un análisis cuantitativo, se procede a mostrar una serie de datos porcentuales sobre la variación frecuencial de los datos pronosticados (2030 -2060) frente a los datos históricos del CMIP6.

<b>Porcentaje de variación respecto a los datos históricos (CMIP6)</b>	<b>Porcentaje de tipos de clima que cumplen dicha variación</b>
> 5%	80%
> 10%	68%
> 20%	46%
> 30%	25%
> 40%	16%
> 50%	11%
> 60%	6%
> 70%	4%
> 80%	3%
> 90%	2%
> 100%	1%

*Tabla 3 Variación porcentual de los datos pronosticados (2030 – 2060) frente a los datos históricos & porcentaje de tipos de clima (WT) que cumplen dicha variación*

Viendo la figura previamente mostrada (Figura 19) se puede decir que las variaciones en la frecuencia que se prevén en la mayoría de los tipos de clima (WT) son leves, excepto en casos extremos (extremos de la gráfica) siendo para el más del 50% de los tipos de clima (en concreto 54%) menores al 20%.

A su vez, con objeto de representar espacialmente las variaciones en la velocidad del viento, entre los datos históricos y las predicciones del CMIP6 en el Atlántico Norte, se ha obtenido la siguiente figura (Figura 26).

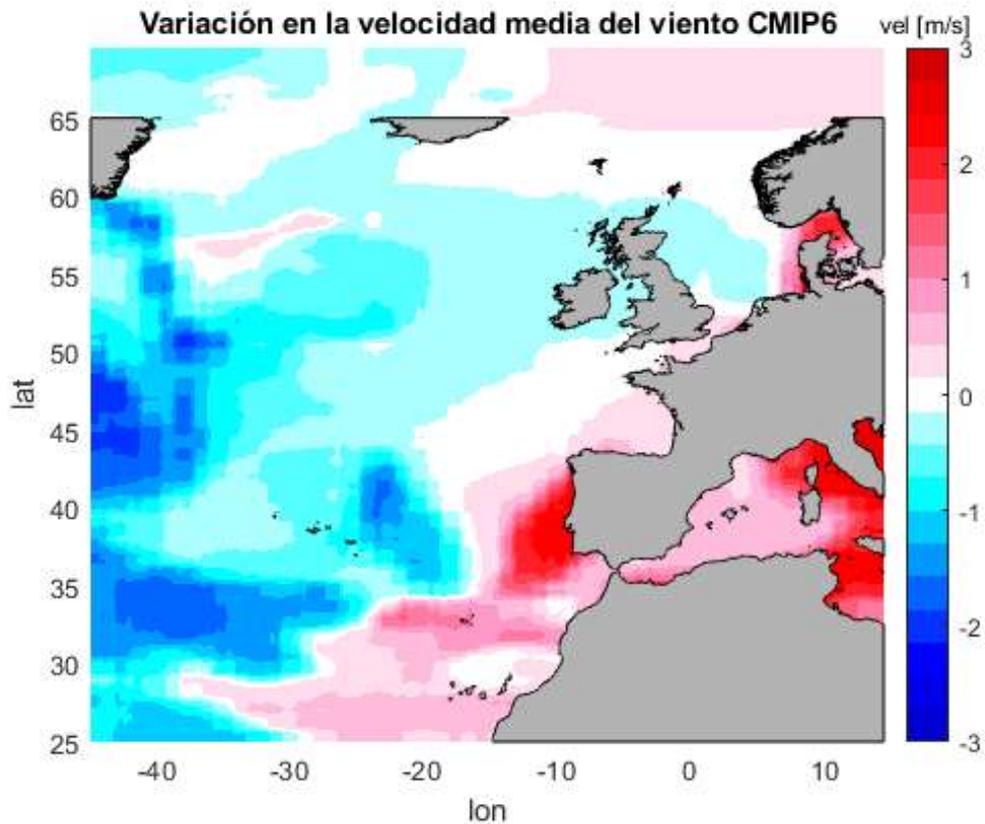


Figura 26 Variación en la velocidad del viento entre los datos históricos y la previsión del ensemble de los modelos del CMIP6

Se puede apreciar que los mayores aumentos en la velocidad del viento se producen en las costas portuguesas, italianas y danesas, aumentando en valores cercanos a los 3 m/s. Sin embargo, los mayores descensos en la velocidad del viento se producen al oeste del Atlántico (cerca de la longitud -40), donde se pueden encontrar descensos de hasta 3 m/s.

Cabe destacar que, si ubicamos los parques en estudio en la Figura 26, podremos ver que, en la mayoría de ellos, vamos a encontrar aumentos en la velocidad media del viento, pudiendo descender ligeramente en algunos de ellos.

#### 4.4 Variaciones en los indicadores del recurso eólico

Tabla 4 Indicadores del cambio climático en los parques eólicos en estudio: velocidad media del viento (W), percentil 99 de la velocidad del viento (W99), densidad de potencia del viento (WPD), tiempo operacional (OT), Rendimiento energético bruto (AEP) & Capacidad factor (CF). Utilizándose para el periodo histórico y futuro (2030 – 2060) la media de los modelos del CMIP6.

Indicadores recurso eólico	LondonArray		EgmondAanZee		DanTysk		Noirmoutiere		SanCibrao		SanBorondon	
	histórico	2030-2060	histórico	2030-2060	histórico	2030-2060	histórico	2030-2060	histórico	2030-2060	histórico	2030-2060
W [m/s]	11.25	11.35	9.71	9.97	9.88	9.75	10.89	10.00	12.65	13.16	10.44	8.88
W99 [m/s]	24.66	24.66	21.54	21.88	19.86	19.70	24.06	22.18	25.88	26.49	21.40	18.46
WPD [W/m <sup>2</sup> ]	1,478.20	1,519.23	981.21	997.60	852.99	814.30	1,364.58	1,098.66	1,878.42	2,053.63	1,114.37	657.11
OT [%]	0.923	0.922	0.906	0.934	0.969	0.969	0.915	0.894	0.964	0.969	0.945	0.917
AEP [Gwh]	21.85	21.92	13.28	13.93	20.97	20.68	45.22	41.07	103.47	106.68	88.71	75.87
CF [%]	0.693	0.695	0.505	0.530	0.665	0.656	0.645	0.586	0.787	0.812	0.675	0.577

Los resultados de la metodología descrita en la sección de indicadores del recurso eólico, se muestran en la Tabla 4 para datos históricos como pronosticados de los modelos del CMIP6. Evaluándose la media de dichos modelos tanto para los datos históricos, como los pronosticados (2030-2060) en la altura de la turbina (hub height) correspondiente a cada parque eólico.

Analizando la velocidad media del viento en los diversos parques en estudio, se puede observar gran variabilidad, encontrándose aumentos (London Array, EGmondAanZee & SanCibrao) y disminuciones (DanTysk, Noirmoutiere & SanBorondon) en la velocidad media a futuro. Los mayores cambios se localizan en Noimoutiere y SanBorondón, disminuyendo dicha velocidad en ambos casos (0.89 m/s & 1.56 m/s respectivamente). Existe exactamente la misma distribución espacial en lo que se refiere al aumento y disminuciones de la potencia del viento, encontrando los máximos en SanBorondón, con un descenso de la energía del viento del 41%, y en SanCibrao, con un aumento de la energía del viento del 9%.

Con objeto de representar aquellos vientos ocurren el 1% del tiempo, se ha procedido al estudio del percentil 99% de la velocidad del viento. Viéndose, que prácticamente sigue los mismos patrones que en la velocidad media del viento y su potencia (aumentos en EGmondAanZee & SanCibrao y disminuciones en DanTysk, Noirmoutiere & SanBorondon), excepto en el caso de LondonArray, en el que tiende a mantenerse constante.

En cuanto a la reducción de los tiempos operacionales (OT), que representan el número de horas en los que la turbina se encuentra en funcionamiento, es mayor en SanBorondón, donde se prevé una reducción de cerca del 3%.

Para una mejor visualización aquellos indicadores que están relacionados con el rendimiento eléctrico, se han realizado las siguientes gráficas, representando el rendimiento energético bruto (Figura 27) y el “Capacity Factor” (Figura 28).

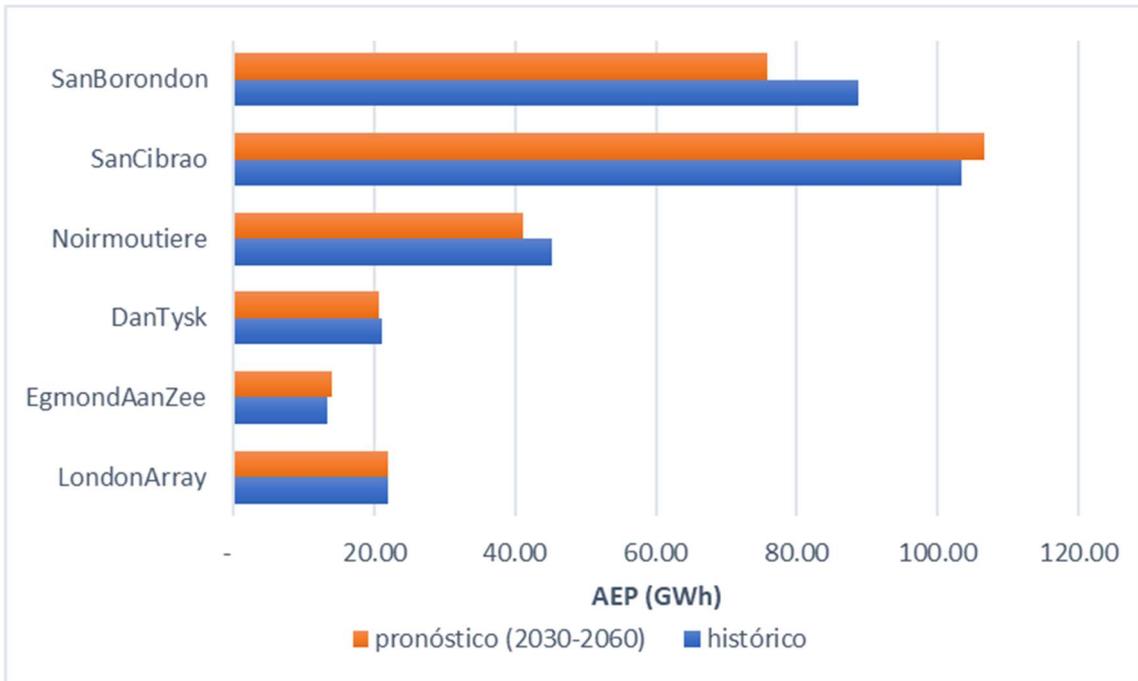


Figura 27 Rendimiento energético bruto de los diferentes parques eólicos, utilizando la media de todos los modelos del CMIP6

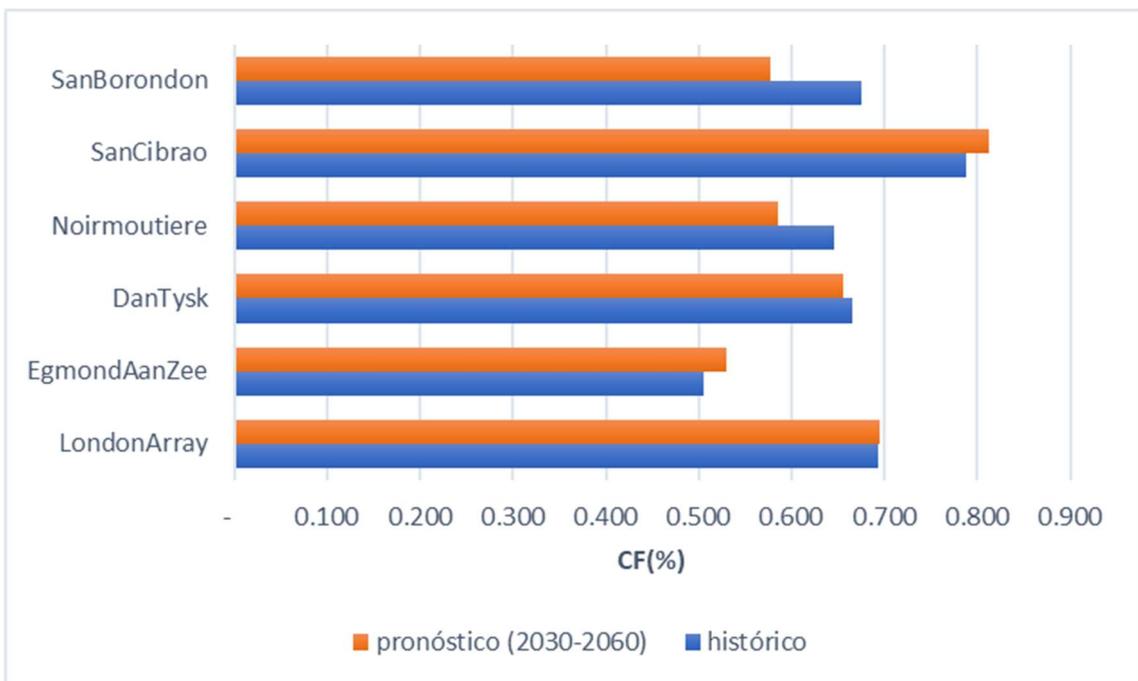


Figura 28 Capacity Factor de los diferentes parques eólicos, utilizando la media de todos los modelos del CMIP6

Tabla 5 Cambio porcentual [(futuro-histórico)/histórico]\*100 de los indicadores del cambio climático para los parques eólicos en estudio: velocidad media del viento (W), percentil 99 de la velocidad del viento (W99), densidad de potencia del viento (WPD), tiempo operacional (OT), Rendimiento energético bruto (AEP) & Capacity Factor (CF). Utilizándose los modelos del CMIP6

Cambio porcentual	LondonArray	EgmondAanZee	DanTysk	Noirmoutiere	SanCibrao	SanBorondon
W [%]	0.867900069	2.65790428	-1.405651043	-8.213923939	4.012496791	-14.9078261
W99 [%]	-0.022721909	1.58353187	-0.768945401	-7.810627896	2.372717554	-13.76234484
WPD [%]	2.775606183	1.670011813	-4.535395115	-19.48718075	9.327832942	-41.03335256
OT [%]	-0.090996913	3.108243522	0.004470571	-2.221407812	0.464816298	-2.906947399
AEP [%]	0.318395288	4.925603801	-1.361322543	-9.175732531	3.10893171	-14.47823567
CF [%]	0.318395288	4.925603801	-1.361322543	-9.175732531	3.10893171	-14.47823567

Como se puede ver en la Figura 27, los parques eólicos más modernos (en este caso, aún en proyecto), que tienen unas turbinas con mayor capacidad de generación eléctrica (15 MW) se caracterizan por una mayor producción, encontrando que el parque que se prevé situar en SanCibrao tiene un rendimiento energético bruto mayor que el de Sanborondón y se prevé que dicha diferencia sea más notable en el futuro, ya que el rendimiento energético de SanCibrao tenderá al aumento, mientras que en SanBorondón tenderá a disminuir.

El “Capacity Factor” (Figura 28) es directamente proporcional al rendimiento energético bruto, por lo tanto, aumentará o decrecerá el mismo porcentaje respecto al valor histórico (Tabla 5). Encontrando que el parque eólico con mayor CF es el de SanCibrao, tendiendo a aumentar en el futuro.

Hay que prestar especial atención a los parques de Noirmoutiere y de SanBorondón, ya que se prevé una disminución del CF y del AEP del 9 y 14% respectivamente (siendo el mismo valor para el CF y el AEP).

Cabe destacar el parque de LondonArray, ya que es el único parque eólico en el que no se prevé prácticamente ningún cambio en los índices relacionados con el rendimiento eléctrico, tendiendo, en todo caso, a un ligero aumento.

## 5 Conclusión

---

En este estudio, se ha investigado la afección del cambio climático al recurso eólico, espacialmente en el Atlántico Norte y puntualmente en cada uno de los parques eólicos en estudio. Para ello, se ha aplicado una metodología para determinar la fiabilidad de los diversos modelos obtenidos del CMIP6 en la descripción de los diferentes patrones meteorológicos.

La clasificación de los tipos de clima, se ha realizado a partir de la base de datos ERA5, utilizando únicamente aquellos datos que resultaban útiles para el presente estudio, siendo estos la presión a nivel del mar (slp) y la velocidad del viento a 10m de altura. Para la obtención del modelo del CMIP6 que mejor se asemeja a los datos históricos, se utilizaron los índices estadísticos RE & SI, comparando las frecuencias de cada tipo de clima para el periodo histórico de ERA5. El resultado de esta evaluación indica que el modelo que más se asemeja a la base de datos que se ha tomado como referencia histórica es el modelo CMCC\_CM2\_SR5. Dado que la habilidad de los modelos analizados no varía mucho entre modelos, se utilizó la media de todos los modelos para continuar con los cálculos. Es decir, en este estudio se presenta un enfoque multi-modelo basado en los cambios de su ensemble.

La comparación entre los periodos históricos de la media de todos los modelos del CMIP6 y ERA5, muestra que, pese a algunas variaciones en determinados tipos de clima, para la mayoría de ellos tiene un buen comportamiento, por lo que se acepta dicha media de los modelos para el cálculo de los indicadores de la variación del recurso eólico.

Los indicadores del recurso eólico determinados, muestra una clara variabilidad de los datos en los diversos parques eólicos, tendiendo en algunos de ellos a una mejora en el rendimiento de las turbinas (London Array, EgmondAanZee & SanCibrao) y en otros a un claro descenso en el rendimiento (DanTysk, Noirmoutiere & SanBorondon). De estos indicadores es importante destacar los que están relacionados con el rendimiento eléctrico: Rendimiento energético bruto (AEP) y el "Capacity Factor" (CF), los cuales tienden a un aumento de entre el 0.3 y el 5% en los parques de London Array, EGmondAanZee & SanCibrao y a una disminución de entre el 1.3 y el 14.5% en los parques de DanTysk, Noirmoutiere & SanBorondon. Encontrándose el mayor aumento en EgmondAanZee, con un 4.92% y la mayor disminución en SanBorondón con un 14.48%.

Teniendo en cuenta dichos cambios previstos para los años 2030-2060, se puede afirmar que es de especial importancia tener en cuenta, en futuros estudios para la ubicación de nuevos parques eólicos, el impacto provocado por el cambio climático.