

# ELABORACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y BASES DE DATOS PARA LA PROYECCIÓN DE IMPACTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO A LO LARGO DE LA COSTA ESPAÑOLA

## TAREA 2:

### PROYECCIONES DE ALTA RESOLUCIÓN DE VARIABLES MARINAS EN LA COSTA ESPAÑOLA

Julio 2019

**Autores del documento:**

Marta Ramírez Pérez  
Melisa Menéndez García  
Paula Camus Braña  
Iñigo J. Losada Rodríguez

**Investigadores de IH Cantabria participantes en el trabajo descrito en este documento:**

Marta Ramírez Pérez  
Melisa Menéndez García  
Paula Camus Braña  
Héctor Lobeto Alonso  
Beatriz Pérez Díaz



## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. BASES DE DATOS DE PARTIDA .....	9
2.1. Bases de datos históricas .....	9
2.1.1. Base de datos de reanálisis ERA-5.....	9
2.1.2. Base de datos de GHRSSST.....	10
2.1.3. Datos instrumentales .....	10
2.2 Modelos climáticos.....	11
2.2.1. Modelos climáticos globales (GCMs) .....	11
2.2.2. Modelos climáticos regionales (RCMs) .....	14
3. METODOLOGÍA.....	16
3.1. Escenarios climáticos.....	17
3.2. Técnicas de regionalización (downscaling) .....	19
3.2.1. Downscaling dinámico .....	19
3.2.2. Downscaling estadístico .....	20
3.3. Corrección del sesgo .....	21
3.4. Cálculo del <i>mean ensemble</i> e incertidumbre.....	22
4. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE OLEAJE .....	24
4.1. Configuración del método de downscaling dinámico.....	24
4.2. Dominios de cálculo .....	25
4.3. Condiciones iniciales y de contorno.....	27
4.4. Validación del modelo.....	28
4.5. Productos generados .....	29
4.5.1. Puntos costeros .....	30
4.5.2. Mapas de cambios.....	31
5. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE MAREA METEOROLÓGICA.....	32
5.1. Configuración del método de downscaling dinámico.....	32
5.2. Dominios de cálculo .....	32
5.3. Condiciones iniciales y de contorno.....	34
5.4. Validación del modelo.....	34
5.5. Productos generados .....	35

5.5.1. Puntos costeros.....	35
5.5.2. Mapas de cambios.....	36
6. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE NIVEL MEDIO DEL MAR .....	37
6.1. Origen de los datos.....	37
6.2. Productos generados .....	38
7. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR.....	39
7.1. Configuración del modelo de downscaling estadístico.....	39
7.1.1. Análisis de Correlación Canónica .....	39
7.1.2. Modelo de downscaling estadístico para SST .....	40
7.2. Calibración y validación del modelo.....	44
7.3. Productos generados .....	46
8. RESULTADOS.....	47
8.1. Resultados de las proyecciones regionales del Oleaje.....	47
8.2. Resultados de proyecciones dinámicas de marea meteorológica.....	52
8.3. Resultados de proyecciones nivel medio del mar.....	54
8.4. Resultados de proyecciones estadísticas de temperatura superficial del mar .....	54
8.4.1. Verificación del desempeño de las proyecciones de SST a alta resolución.....	55
8.4.2. Proyecciones de SST en la costa española .....	57
9. REFERENCIAS .....	62

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema general de la metodología y procesos a tener en cuenta para elaborar proyecciones climáticas de variables marinas en costa. ....	17
Figura 2. Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> desde el siglo XIX hasta el XXIV para los distintos escenarios de cambio climático. Fuente: guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.WGI. "Cambio Climático: Bases Físicas" 2013. ....	18
Figura 3. Esquema general de la metodología de downscaling estadístico empleada para la obtención de las proyecciones de SST a alta resolución a lo largo de la costa española.....	20
Figura 4. Comparación de los valores de los cuantiles de la base de datos de ERA5 con cada uno de los modelos climáticos antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar la corrección del sesgo, en 3 puntos de la costa española cuyas coordenadas [lon, lat] son: [2.583, 39.33], [1.5, 41.166] y [-16.1, 28.6]. La figura de la izquierda corresponde a la variable de altura de ola significativa y la de la derecha, a la marea meteorológica. Las cruces negras sobre los puntos representan los valores por encima del cuantil del 90%. ....	22
Figura 5. Ejemplo de reconstrucción de dos ensembles (arriba: altura de ola significativa; abajo: aumento de nivel del mar).....	23
Figura 6. Mallas de cálculo de WW3 que componen el dominio atlántico. ....	26
Figura 7. Mallas de cálculo de WW3 que componen el dominio mediterráneo. ....	27
Figura 8. Validación del downscaling dinámico de oleaje. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los de la boya REDCOS de Bilbao de Puertos del Estado. ....	28
Figura 9. Validación del downscaling dinámico de oleaje. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los de la boya REDCOS de Valencia de Puertos del Estado. ....	29
Figura 10. Validación del downscaling dinámico de oleaje. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los de la boya REDCOS de Las Palmas de Gran Canaria de Puertos del Estado.....	29
Figura 11. Ubicación y profundidad (en metros) de los 1196 puntos seleccionados a lo largo de la costa española .....	30
Figura 12. Mallas de cálculo del modelo ROMS que abarca el dominio atlántico y el mediterráneo. ....	33
Figura 13. Mallas de cálculo del modelo ROMS que abarca el dominio mediterráneo. ....	33
Figura 14. Validación del downscaling dinámico de marea meteorológica. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los del mareógrafo REDMAR de Bilbao de Puertos del Estado. ....	34
Figura 15. Validación del downscaling dinámico de marea meteorológica. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los del mareógrafo REDMAR de Valencia de Puertos del Estado. ....	35
Figura 16. Validación del downscaling dinámico de marea meteorológica. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los del mareógrafo REDMAR de Gran Canaria de Puertos del Estado.....	35
Figura 17. Pasos de la metodología de downscaling estadístico basada en el análisis de correlación canónica para las proyecciones de SST a alta resolución a lo largo de la costa española. ....	42
Figura 18. Dominios espaciales del predictor (SST 1.0°x1.0°) y del predictando (SST 0.05°x0.05).....	43
Figura 19. Patrones espaciales y coeficientes temporales del análisis de correlación canónica en la zona del Cantábrico. ....	45
Figura 20. Validación del modelo de downscaling estadístico en las cuatro zonas consideradas: Cantábrico, Canarias, Estrecho y Mediterráneo. ....	46
Figura 21. (Izquierda) Valores medio y (Derecha) percentil del 99% de la altura de ola significativa (m) obtenidos a partir de las variables atmosféricas procedentes del reanálisis ERA5 (1985-2005). Las escalas de ambos gráficos son distintas a fin de observar diferencias espaciales en cada una de ellas. ....	48
Figura 22. Cambios en el valor medio de la altura de ola significativa (Hs) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios de la base de datos histórica de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80% de los modelos climáticos analizados. ....	48
Figura 23. Cambios en el percentil del 99% de la altura de ola significativa (Hs) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios de la base de datos	

histórica de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados. .... 49

Figura 24. (Izquierda) Valores medio y (Derecha) percentil del 99% periodo de pico (s) obtenidos a partir de las variables atmosféricas procedentes del reanálisis ERA5 (1985-2005). Las escalas de ambos gráficos son distintas a fin de observar diferencias espaciales en cada una de ellas..... 50

Figura 25. Cambios en el valor medio del periodo de pico (Tp) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados. .... 50

Figura 26. Cambios en el percentil del 99% del periodo de pico (Tp) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados. .... 51

Figura 27. Valor medio de la dirección media del oleaje ( $\theta$ ) del periodo histórico de referencia (periodo 1985-2005)..... 51

Figura 28. Cambios en la dirección media del oleaje (Dir) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Valores positivos indican cambio en la dirección en sentido horario mientras que los negativos representan cambios en sentido anti-horario. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados. .... 52

Figura 29. Percentil del 99% de marea meteorológica (m) durante el periodo histórico de referencia (1985-2005) ..... 53

Figura 30. Cambios en el percentil 99% de la marea meteorológica (mm) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados. .... 53

Figura 31. Aumento en el nivel medio del mar (NMM) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se expresan respecto al valor medio del nivel del mar en el periodo de control 1986-2005..... 54

Figura 32. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona del Cantábrico (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC. .... 56

Figura 33. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona del Estrecho (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC. .... 56

Figura 34. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona de Canarias (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC. .... 57

Figura 35. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona del Mediterráneo (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC. .... 57

Figura 36. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en el Cantábrico a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio). .....58

Figura 37. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en El Estrecho a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio). .....59

Figura 38. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en las islas Canarias a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio). .....60

Figura 39. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en El Mediterráneo a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio). .....61

## Índice de tablas

Tabla 1. Características de las boyas de REDCOS de Puertos del Estado utilizadas para la validación de las proyecciones climáticas de oleaje. .... 11

Tabla 2. Características de los mareógrafos REDMAR de Puertos del Estado utilizados para la validación de las proyecciones climáticas de marea meteorológica. .... 11

Tabla 3. Modelos climáticos globales (GCMs) pertenecientes al CMIP5 utilizados en este estudio. .... 14

Tabla 4. Periodos disponibles utilizados para las proyecciones climáticas de las distintas variables. .... 14

Tabla 5. Modelos climáticos regionales utilizados. Los 7 primeros pertenecen a la iniciativa EUROCORDERX, mientras que el último pertenece a MEDCORDEX. .... 15

Tabla 6. Descripción y referencias de cada uno de los escenarios del AR5. .... 18

Tabla 7. Características de las mallas del dominio atlántico. .... 25

Tabla 8. Pasos de tiempo en las mallas del dominio atlántico. .... 26

Tabla 9. Características de las mallas del dominio mediterráneo. .... 27

Tabla 10. Pasos de tiempo en las mallas del dominio mediterráneo. .... 27

Tabla 11. Variables de salida de los campos de oleaje del modelo WW3. .... 29

Tabla 12. Características de las mallas utilizadas en ROMS. .... 33

## 1. INTRODUCCIÓN

Las costas son zonas especialmente susceptibles a los impactos del cambio climático, al situarse en la interfaz entre la tierra y el mar, y albergar distintos procesos que las convierten en zonas altamente dinámicas. Las condiciones climáticas de diversas variables marinas, tales como la temperatura, el viento o nivel del mar, pueden verse alteradas por el efecto del cambio climático, convirtiéndose en generadores de impactos costeros que pueden afectar a los bienes, infraestructuras o ecosistemas. Los principales impactos identificados en la costa son la inundación y la erosión, que dependen principalmente de variables superficiales marinas, tales como el oleaje, la marea meteorológica y el aumento del nivel medio del mar. Sin embargo, los estudios para estimar las consecuencias de cambio climático en la costa generalmente se limitan a considerar únicamente el efecto gradual de aumento del nivel medio del mar, sin tener en cuenta posibles cambios en las condiciones climáticas de las dinámicas del oleaje y la marea meteorológica. Esto se debe a la complejidad en el análisis de las proyecciones de estas variables y su inclusión en los modelos de impacto. No obstante, tanto el oleaje como la marea meteorológica, especialmente cuando alcanzan valores extremos, son generadas por ciertas condiciones de la circulación atmosférica-oceánica regional que pueden estar siendo modificadas por el cambio climático.

En su Quinto Informe de Evaluación (AR5, IPCC 2013), el IPCC recopila y presenta el análisis de una serie de bases de datos de proyecciones a nivel global y regional generadas para diversos escenarios de emisiones (Trayectorias Representativas de Concentración, RCPs de sus siglas en inglés) y varios modelos globales de circulación (GCMs, de sus siglas en inglés). Esta recopilación se centra principalmente en variables meteorológicas y oceánicas, mientras que en lo relativo a variables superficiales marinas, el aumento del nivel medio del mar es la principal variable considerada.

Para llevar a cabo una adecuada evaluación de los impactos asociados al cambio climático y a fin de cumplir con la nueva Estrategia de adaptación al cambio climático en la costa española, se requiere tener en cuenta los cambios en todas las variables implicadas con suficiente resolución espacial a lo largo de toda la costa española. Además, es necesario mejorar las metodologías y la información existente, para poder acotar la incertidumbre y poder hacer un uso eficiente de los recursos disponibles.

A fin de dar respuesta a esta demanda, surge el proyecto *"Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático en la costa española"*, financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO). Dicho proyecto persigue tres objetivos principales: (1) elaborar una metodología que resuelva probabilísticamente los impactos del cambio climático en la costa teniendo en cuenta todos los agentes implicados; (2) realizar proyecciones de cambio climático de oleaje, marea meteorológica, nivel del mar y temperatura superficial del mar a lo largo de toda la costa española, que sirvan para alimentar modelos de impacto; y (3) analizar la información desarrollada para hacer frente a las obligaciones establecidas por la Directiva de Inundaciones (Directiva 2007/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007).

Este documento presenta el trabajo desarrollado para cumplir con el segundo objetivo y, en concreto, describe la metodología y los resultados obtenidos a alta resolución de las proyecciones de cambio climático de las variables que se describen a continuación:

- Nivel medio del mar

El nivel medio del mar es la variable más relevante en los estudios de cambio climático en la costa. El calentamiento global observado en el último siglo ha dado lugar al aumento de la temperatura del agua del mar, con su consiguiente expansión térmica, y al deshielo de glaciares y otras reservas de agua continentales, lo que, en conjunto, está produciendo el aumento del nivel medio del mar global (3.2 mm al año desde 1993). Debido a la inercia del sistema climático, es muy probable que este efecto perdure durante mucho tiempo, aun mitigando totalmente la emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, se espera que los cambios del nivel medio del mar tengan un patrón regional fuerte, de forma que algunos lugares experimenten desviaciones significativas respecto del cambio medio global.

- Marea meteorológica

La marea meteorológica es la variable que define la variación del nivel del mar como consecuencia de agentes atmosféricos (cambios en la presión atmosférica y en el viento) sobre la superficie marina. Ciertas condiciones meteorológicas (ej. Ciclogénesis) dan lugar a una sobreelevación del nivel del mar que cuando coinciden con mareas astronómicas altas, pueden dar lugar a niveles del agua especialmente altos, generando inundación y erosión costera. Sin embargo, no existen estudios globales consistentes sobre posibles cambios futuros de esta variable. Además, no se incluye información, ni a escala global ni regional, de proyecciones climáticas de la marea meteorológica en el último informe del IPCC (AR5).

- Oleaje

El oleaje es la ondulación de alta frecuencia que genera el viento al soplar sobre la superficie del mar. Una vez generado viaja por el océano y puede propagarse hasta la costa, donde disipa la energía que transporta mediante distintos procesos (ej. rotura del oleaje). El oleaje es, por tanto, un fenómeno que contribuye de manera importante a la inundación y erosión costera y que, además, es susceptible de verse afectado por los efectos del cambio climático como consecuencia de cambios en los patrones de viento sobre el medio marino. Los procesos que disipan la energía cuando el oleaje se aproxima a costa dan lugar a cambios en la altura de ola y dirección (ej. refracción), lo que confiere unas características del oleaje cerca de la costa diferente al del mar abierto. En los estudios de impacto costero es necesario contar con datos de oleaje en costa que tengan una buena cobertura temporal (una serie de datos larga), pero también una cierta resolución espacial, ya que la variabilidad a lo largo de la costa es muy importante. Posibles cambios globales en el oleaje por efecto del cambio climático han sido mencionados por primera vez en el último informe del IPCC (AR5), donde se estima un descenso de las condiciones de altura de ola superior al 5% con respecto al clima presente para la región atlántica europea. No obstante, se requieren nuevos estudios a mayor resolución espacial y a partir de simulaciones con vientos de alta resolución espacial y temporal (horarios), para realizar un análisis de cambios en el oleaje en la costa española, especialmente durante condiciones de temporal marítimo.

- Temperatura superficial del agua del mar

Uno de los factores clave de cambio climático al que son especialmente sensibles los ecosistemas costeros es el aumento de la temperatura superficial del agua del mar. El aumento de dicha variable se estima superior a 2°C ante el actual escenario de emisión de gases invernadero para finales de siglo en la región española marina. El blanqueamiento de los corales, la pérdida de hábitat y especies o la migración de ciertas especies hacia otras latitudes son algunos de los impactos del aumento de la temperatura del mar. Dada la importancia de estas consecuencias, es necesario contar con proyecciones climáticas de esta variable a mayor resolución temporal y espacial a lo largo de la costa española, que permita llevar a cabo un análisis riguroso del riesgo y las posibles futuras consecuencias.

## 2. BASES DE DATOS DE PARTIDA

En este apartado se describen, por un lado, las bases de datos históricas más actuales que se consideran representativas del clima presente. En base a estos datos se determina la calidad de los distintos modelos climáticos, se corrige el sesgo de ciertas variables y se analizan los cambios en el futuro. Por otro lado, las proyecciones de cambio climático se obtienen a partir de simulaciones con modelos climáticos que, a su vez, han sido forzados con distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Cada uno de estos escenarios presenta, en base a distintas suposiciones, una evolución característica de estos gases durante las próximas décadas. Este apartado describe tanto los datos de partida utilizados para los escenarios como los modelos climáticos considerados para analizar la evolución del clima a lo largo del siglo XXI.

### 2.1. Bases de datos históricas

Las bases de datos históricas utilizadas varían de unas variables a otras. Mientras que en el estudio de proyecciones climáticas de oleaje y marea meteorológica se ha utilizado la base de datos del producto de reanálisis ERA5 (Centro Europeo de Previsiones Climáticas a Medio Plazo, ECMWF), en el caso de la temperatura superficial del mar se ha recurrido a la base de datos del grupo GHRSSST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature). Las proyecciones del nivel medio del mar se analizan respecto a un nivel de referencia, que en este caso ha sido el nivel medio en el periodo 1986-2005. Además de estas bases de datos históricas, en este estudio se han utilizado una serie de datos instrumentales procedentes de mareógrafos y boyas para verificar la calidad de los datos y las metodologías empleadas.

#### 2.1.1. Base de datos de reanálisis ERA-5

ERA-5 es la última base de datos de reanálisis global generada por el Centro Europeo de Predicciones Climáticas a Medio Plazo (ECMWF, Dee *et al.*, 2011), después de sus antecesores FGGE, ERA-15, ERA-40 y ERA-Interim. Como cualquier base de datos de reanálisis, ERA-5 combina datos de observaciones con modelos acoplados de los subsistemas climáticos mediante el proceso de asimilación de datos. El sistema de asimilación de datos que utiliza es el IFS Cycle 41r2 4D-Var. Actualmente cubre el periodo desde 1979 a 2018, con resolución horaria y a una resolución espacial de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , aunque para finales de 2019 se habrá extendido desde 1950 hasta el presente. Contiene información de multitud de variables no sólo atmosféricas, sino también de los estados de mar. Las principales ventajas que presenta esta base de datos con respecto a su predecesor ERA-Interim son: mayor resolución temporal y espacial; mejor representación de la troposfera y de los ciclones tropicales; mejor balance global de precipitación y evaporación; y mayor consistencia entre la temperatura superficial del océano y el hielo marino.

En este proyecto, se han utilizado los datos de ERA-5 para evaluar la calidad y corregir el sesgo de los distintos modelos climáticos. Con este objetivo, se ha simulado el oleaje y la marea meteorológica utilizando como forzamiento los datos de viento en superficie, presión atmosférica a nivel del mar y cobertura de hielo de ERA-5 y los resultados se han

comparado con los de los modelos climáticos en el periodo de 1985-2005. Los datos de ERA-5 están disponibles para descarga en: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>.

### **2.1.2. Base de datos de GHR SST**

Los datos históricos de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) son distribuidos por el grupo internacional de científicos GHR SST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) que aglutina a diferentes centros de investigación especializados en esta variable oceanográfica. Para la definición de SST a alta resolución en la costa española se ha utilizado una base de datos generada a partir de la combinación de satélites (infrarrojo, microondas y AVHRR Pathfinder) así como datos de observaciones in situ (barcos en ruta y boyas y datos in situ de ICOADS). Este producto, derivado del proyecto MyOcean2 desarrollado por el UK Met Office, proporciona una estimación de la variabilidad diaria de la SST a nivel global con una resolución horizontal de  $0.05^\circ$  (en torno a 6 km) en el periodo 1985-2017. Los campos de SST a una resolución más grosera - necesarios para la definición del modelo a partir del cual se generan las proyecciones de la SST en base a los modelos climáticos- se ha obtenido a partir de un reanálisis de SST a escala global a una resolución de  $0.25^\circ$  a escala mensual para el mismo periodo de tiempo (1985-2017). Estos datos también son proporcionados por GHR SST y han sido generados a partir de la combinación de datos satelitales y observaciones. Estos datos se transforman a una resolución de  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  para ser introducidos en el modelo estadístico a la misma resolución a la que están disponibles los modelos climáticos.

### **2.1.3. Datos instrumentales**

La validación de las metodologías empleadas en este estudio se ha llevado a cabo comparando los resultados obtenidos durante el periodo de reconstrucción histórica que representa el clima presente con datos in situ procedentes de boyas y mareógrafos de Puertos del Estado (<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia>). Para ello, se ha escogido una boya/mareógrafo en cada una de las regiones costeras españolas que presentan un clima oceánico característico (es decir, Cantábrico, Mediterráneo y Canarias), en donde está disponible la serie temporal de las variables de altura de ola/ marea meteorológica, respectivamente. A continuación, se ha seleccionado la ubicación más próxima de las bases de datos de oleaje y marea meteorológica generadas utilizando los datos atmosféricos de ERA-5 como forzamiento. Ambas series temporales se han comparado a fin de determinar la correlación entre ambas y validar la calidad de los datos simulados.

Las boyas utilizadas en este estudio para la validación de la metodología de las proyecciones climáticas de oleaje pertenecen a la Red de Boyas Costeras (REDCOS) de Puertos del Estado. Estas boyas se encuentran fondeadas a menos de 100 m de profundidad por lo que, en la mayoría de los casos, las medidas están perturbadas tanto por el perfil de la costa como por los efectos del fondo sobre el oleaje. Por ello, estas medidas son representativas de las condiciones locales del oleaje. En concreto, se han utilizado las boyas costeras situadas en Bilbao, Valencia y Las Palmas de Gran Canaria (Este). Estas medidas presentan una resolución temporal horaria. La Tabla 1 resume la posición, profundidad y cobertura temporal de las boyas utilizadas.

Boya	Ubicación [Lon, Lat]	Profundidad	Cobertura temporal
Bilbao	[-3.14°, 43.4°]	50 m	02/1985 – 04/2005
Valencia	[-0.28°, 39.46°]	21 m	09/1985 – 03/2005
Las Palmas	[-15.39°, 28.05°]	30 m	02/1992-presente

Tabla 1. Características de las boyas de REDCOS de Puertos del Estado utilizadas para la validación de las proyecciones climáticas de oleaje.

Por otro lado, los mareógrafos utilizados en este estudio para la validación de la metodología de las proyecciones climáticas de marea meteorológica, pertenecen a la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR). Estos mareógrafos aportan medidas horarias de las distintas componentes del nivel del mar, entre las que se encuentra la componente meteorológica. Este estudio utiliza los datos procedentes de los mareógrafos situados en Bilbao, Valencia y Gran Canaria, cuyas características se especifican en la Tabla 2.

Boya	Ubicación [Lon, Lat]	Cobertura temporal
Bilbao	[-3.05°, 43.35°]	07/1992– presente
Valencia	[-0.31°, 39.44°]	10/1992 – presente
Las Palmas	[-15.41°, 28.14°]	07/1992-presente

Tabla 2. Características de los mareógrafos REDMAR de Puertos del Estado utilizados para la validación de las proyecciones climáticas de marea meteorológica.

En el caso de la variable SST, la validación (y también calibración) del modelo utilizado se ha llevado a cabo con la serie histórica de GHRSSST, utilizando parte de la serie temporal para la calibración y, la otra parte, para la validación. Este procedimiento se explica de forma detallada en el apartado de proyecciones climáticas de SST de este documento.

## 2.2 Modelos climáticos

Las proyecciones de cambio climático se obtienen a partir de simulaciones utilizando modelos climáticos que simulan los intercambios de energía y masa entre los diferentes subsistemas climáticos (atmósfera, litosfera, hidrosfera, criosfera y biosfera) mediante ecuaciones matemáticas. Constituyen una de las principales fuentes de información sobre el cambio climático y, por ello, son la base para evaluar los impactos asociados a éste. Para realizar proyecciones a futuro, el forzamiento climático se ajusta a posibles escenarios futuros, que son los que se han descrito en el apartado 3.1.

### 2.2.1. Modelos climáticos globales (GCMs)

Los modelos climáticos globales (o modelos de circulación general, GCM) simulan multitud de procesos físicos mediante acoplamiento de simulaciones numéricas de la atmósfera y el océano, constituyendo así la herramienta más avanzada en la simulación de la respuesta del clima global al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero. Estos modelos utilizan una malla tridimensional global, con una resolución horizontal que generalmente varía entre los 200 y 500 km y cuentan con entre 10 y 20 capas verticales en la atmósfera y, a veces, hasta 30 capas sobre los océanos.

El Grupo de Trabajo en Modelos Acoplados (WGCM) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP), desarrolló el Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP), a fin de establecer un protocolo para las salidas de los modelos de circulación acoplados atmósfera-océano (AOGCMs). Este proyecto se divide en varias fases, que buscan mejorar los modelos climáticos existentes, así como informar a las agencias tanto nacionales como internacionales de las posibles acciones para mitigar los efectos del cambio climático. La fase 5 es la fase más reciente del CMIP (CMIP5) que ha sido completada (2010-2014), y persigue 3 objetivos específicos: (1) evaluar la capacidad de los modelos de simular el pasado reciente; (2) generar proyecciones de cambio climático en el futuro a dos escalas temporales, corto (hasta 2035) y largo plazo (hasta 2100); (3) comprender los factores que producen las diferencias en las proyecciones, como el efecto de las nubes o el del ciclo del carbono.

En este proyecto se utilizan como forzamientos los datos de distintos GCMs publicados en el CMIP5 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>). El criterio que se ha seguido para seleccionar los modelos climáticos ha sido: (1) la disponibilidad de las variables de interés a una resolución temporal adecuada; (2) la cobertura del periodo histórico (1985-2005), del corto plazo (2026-2045) y del largo plazo (2081-2100); (3) la disponibilidad de los dos escenarios de cambio climático de interés (es decir, rcp4.5 y rcp8.5); (4) por último, el "ensemble" de todas las variables de un mismo modelo ha de ser el mismo. Dicho ensemble es un código que hace referencia al punto de inicio, condiciones iniciales de la simulación y la física del modelo (por ejemplo, r1i1p1).

A partir de los condicionantes expuestos, los modelos que se han utilizado para generar las proyecciones de las distintas variables no son idénticos para todas variables marinas objetivo. La Tabla 3 muestra un resumen de los GCMs utilizados, con una última columna que indica para qué variable/s se ha usado cada uno (MM: Marea Meteorológica, NMM: Nivel Medio del Mar).

GCM	Institución	País	Resol. Atmosf. (lat x lon)	Variables proyectadas
MIROC5	MIROC	Japón	1,40° x 1,40°	Olas, MM, NMM
MIROC-ESM-CHEM	MIROC	Japón	2,79°x2,81°	NMM
MIROC-ESM	MIROC	Japón	2,79°x2,81°	NMM
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	Francia	1,25° x 1,25°	Olas, MM, NMM
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EEUU	2,0° x 2,0°	Olas, NMM
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EEUU	2,0°x2,5°	NMM
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EEUU	2,0°x2,5°	NMM
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia	1,40° x 1,40°	Olas, MM, NMM

CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italia	0,75° x 0,75°	Olas, MM
ACCESS1.0	CSIRO-BOM	Australia	1,25° x 1,90°	Olas, MM, NMM
ACCESS1.3	CSIRO-BOM	Australia	1,25° x 1,90°	NMM
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	1,25° x 1,90°	Olas, MM, NMM
CCSM4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EEUU	0,94°x1,25°	NMM
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-BOM	Australia	1,87°x1,87°	NMM
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá	2,79°x2,81°	NMM
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Alemania	1,86°x1,87°	NMM
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Alemania	1,86°x1,87°	NMM
MRI-CGCM3	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Alemania	1,12°x1,12°	NMM
NorESM1-M	Norwegian Earth System	Noruega	1,89°x2,5°	NMM
NorESM1-ME	Norwegian Earth System	Noruega	1,89°x2,5°	NMM
INM-CM4	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia	1,5°x2,0°	NMM
BCC	Beijing Climate Center	China	1,0° x 1,0°	SST
BCC_M	Beijing Climate Center	China	1,0° x 1,0°	SST
CCSM	National Center for Atmospheric Research	EEUU	0,42°x1,1°	SST
CES_BGC	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia	0,42°x1,1°	SST
CMCES_CAM	Community Earth System Model Contributors	EEUU	0,42°x1,1°	SST
CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EEUU	1,0°x1,0°	SST
CM5B	Institut Pierre-Simon Laplace	Francia	1,52°x1,43°	SST
CM5_LR	Institut Pierre-Simon Laplace	Francia	1,52°x1,43°	SST
CM5_MR	Institut Pierre-Simon Laplace	Francia	1,52°x1,43°	SST
CMC_CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italia	1,52°x1,43°	SST
CMC_CM5	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Italia	1,52°x1,43°	SST
CNR_CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia	0,75°x1,0°	SST
ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EEUU	1,0° x 1,0°	SST
ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	EEUU	1,0° x 1,0°	SST
GEM_CC	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	1,0° x 1,0°	SST

<b>GEM_ES</b>	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	1,0° x 1,0°	SST
<b>MIR_5</b>	MIROC	Japón	0,9°x1,19°	SST
<b>MIR_CHE</b>	MIROC	Japón	0,93°x1,4°	SST
<b>MIR_ESM</b>	MIROC	Japón	0,93°x1,4°	SST
<b>MPI_LR</b>	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Alemania	0,77°x0,83°	SST
<b>MPI_MR</b>	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Alemania	0,48°x0,56°	SST
<b>MRI_CGC</b>	Meteorological Research Institute	Japón	0,5°x1,0°	SST

Tabla 3. Modelos climáticos globales (GCMs) pertenecientes al CMIP5 utilizados en este estudio.

El periodo disponible para cada uno de estos modelos también varía de unas variables a otras, lo que se resume en la Tabla 4.

<b>Variable</b>	<b>Periodo histórico/control disponible</b>	<b>Periodo escenarios climáticos disponible</b>
SST	1985-2005	2006-2100
NMM	1986-2005	2007-2100
Olas	1985-2005	2026-2045; 2081-2100
Marea meteorológica	1985-2005	2026-2045; 2081-2100

Tabla 4. Periodos disponibles utilizados para las proyecciones climáticas de las distintas variables.

Es importante mencionar que algunos de estos modelos utilizan un calendario distinto al gregoriano o estándar. Es el caso de los GCMs: MIROC5, GFDL-ESM2G, IPSL-CM5-MR y CanESM2, que utilizan el calendario non-leap o 365-días y el HadGEM2-ES, que utiliza el de 360-días. En el caso de las proyecciones climáticas de oleaje y marea meteorológica, a fin de facilitar la simulación y post-proceso de los datos, se han convertido todos los calendarios a estándar.

### **2.2.2. Modelos climáticos regionales (RCMs)**

La información procedente de los GCMs no puede utilizarse para ciertos estudios regionales en áreas de geografía compleja (por ejemplo, el estrecho de Gibraltar o la costa Mediterránea), ya que tienen baja resolución espacial, del orden de cientos de kilómetros (IPCC, 2001). Por este motivo, es necesario disponer de información a menor escala espacial, lo que se consigue mediante el uso de los modelos climáticos regionales (RCM). Estos modelos aumentan la resolución de los GCM en un área limitada (normalmente, 5000 km x 5000 km). En este contexto, surgió, dentro del WCRP, el programa CORDEX (Experimento de *Downscaling* climático regional coordinado) (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>), que tiene como objetivo establecer un marco coordinado internacional para generar proyecciones de cambio climático a nivel regional a lo largo de todo el mundo, utilizando como forzamientos los datos de los GCMs.

Para el desarrollo de este proyecto, se revisaron dos iniciativas dentro del programa CORDEX:

(1) EURO-CORDEX (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>), que cubre el dominio europeo y se centra en el modelado atmosférico.

(2) MED-CORDEX (<https://www.medcordex.eu/>), que cubre el Mediterráneo y considera modelos acoplados atmósfera-oceáno.

Dentro de estas dos iniciativas se han seleccionado una serie de modelos climáticos en función de la disponibilidad de vientos en superficie con resolución horaria. La resolución espacial en horizontal es de  $0.11^{\circ} \times 0.11^{\circ}$  (Tabla 5).

RCM	GCM inductor	Institución	País	Periodo disponible
RCA4	MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie	Alemania	2006 – 2100
CCLM4-8-17	MIROC5	MIROC	Japón	2006 – 2100
RCA4	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace	Francia	2006 – 2100
RCA4	HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	2006 – 2099
RCA4	EC-EARTH	EC-EARTH consortium	Varios	2006 – 2100
RCA4	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia	2006 – 2100
CCLM4-8-17	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá	2006 – 2100
ALADIN52	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia	2006 – 2100

Tabla 5. Modelos climáticos regionales utilizados. Los 7 primeros pertenecen a la iniciativa EUROCORDEX, mientras que el último pertenece a MEDCORDEX.

Lo RCMs se han utilizado exclusivamente para las proyecciones climáticas de oleaje y marea meteorológica, mientras que las proyecciones de SST y nivel medio del mar provienen exclusivamente de la información procedente de los GCMs.

### 3. METODOLOGÍA

La modelización de los impactos de inundación y erosión sobre las infraestructuras o ecosistemas costeros se realiza mediante modelos de procesos que requieren información climática de las dinámicas marinas a una resolución espacial suficiente para representar la región costera. Por tanto, para poder realizar un análisis de los impactos costeros es necesario disponer de las variables marinas (por ejemplo, oleaje) con alta resolución temporal y espacial y durante periodos de tiempo que permitan el análisis climático (al menos décadas). Si además el objetivo es analizar el efecto del Cambio Climático sobre los impactos costeros, la metodología a emplear requiere no solo de una regionalización (downscaling) de las variables ambientales marinas en la costa, sino también de una serie de procesos que permitan estimar, cuantificar y reducir la incertidumbre asociada los posibles cambios regionales y costeros debidos al fenómeno global de calentamiento asociado al cambio climático.

La metodología general para desarrollar proyecciones climáticas marinas teniendo en cuenta estos factores se muestra en la Figura 1. En primer lugar, es necesario definir los posibles escenarios de evolución climática futura que se considerarán en el trabajo. Este proceso es especialmente relevante si uno de los fines es evaluar cambios en la costa e impactos derivados a largo plazo (ej. fin del siglo XXI), ya que la evolución y desarrollo socio-económico global es determinante en cuanto a la emisión futura antropogénica de gases de efecto invernadero. Definidos los escenarios climáticos a futuro, el siguiente paso consiste en la recopilación de la información climática disponible a escala global que se requiere para realizar proyecciones de dinámicas marinas. Esta información está disponible en los resultados generados por modelos climáticos, principalmente a escala global mediante modelos acoplados AO (Atmosfera-Océano). Para considerar la incertidumbre asociada a los modelos climáticos es necesario analizar un conjunto de modelos, incluyendo los centros internacionales más relevantes en este campo. Para el caso de estudios en regiones singulares, como el Estrecho de Gibraltar o la cuenca occidental mediterránea, es deseable, además, disponer de datos de modelos climáticos 'regionalizados' (RCMs), para que se incluyan procesos físicos de meso-escala que la resolución espacial de los modelos climáticos globales (GCMs) no es capaz de simular. Una vez definidos los datos de entrada climáticos necesarios para simular variables marinas próximas a costa ya se puede configurar el método de simulación de las variables marinas, mediante regionalización. La regionalización puede realizarse mediante modelado numérico, métodos estadísticos, o una combinación de ambos. Es importante destacar que, para un cierto escenario climático definido, la incertidumbre en las simulaciones climáticas de los GCMs debe ir considerándose hasta este proceso. Para ello se trabaja con diferentes simulaciones o 'miembros', de forma que el cambio climático medio estimado finalmente se suele proporcionar como la media del conjunto de miembros ('ensemble') utilizados. Los resultados obtenidos para las proyecciones climáticas de las variables marinas en costa permiten evaluar cambios a futuro, proporcionando indicadores de cambio climático. No obstante, estos resultados no deberían ser utilizados directamente para alimentar modelos de impacto, ya que suelen presentar sesgos climáticos. Es por ello que se debe realizar una corrección del sesgo climático antes de que las magnitudes estimadas del clima marino sean incorporadas en la estimación de riesgo.

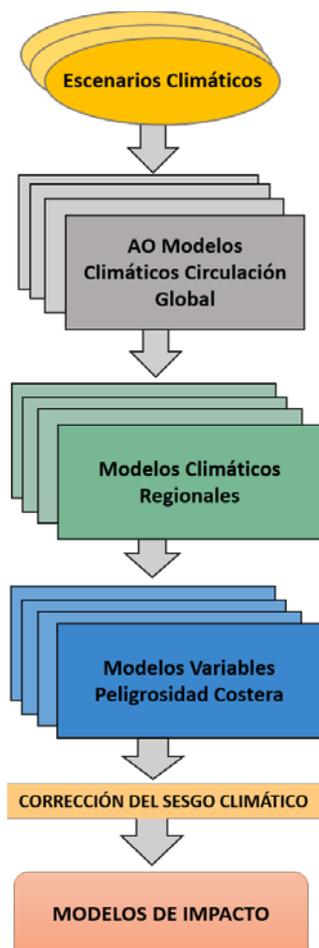


Figura 1. Esquema general de la metodología y procesos a tener en cuenta para elaborar proyecciones climáticas de variables marinas en costa.

### 3.1. Escenarios climáticos

Las proyecciones de cambio climático a lo largo del siglo XXI se basan en escenarios de emisión de gases de efecto invernadero teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas actuales y las perspectivas de crecimiento (Figura 2). En el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (Quinto informe de evaluación del IPCC o AR5, 2013) se definieron 4 nuevos escenarios de emisión, denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100, que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m<sup>2</sup>. De las 4 trayectorias RCP, una contempla un escenario de nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel alto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (RCP8.5).

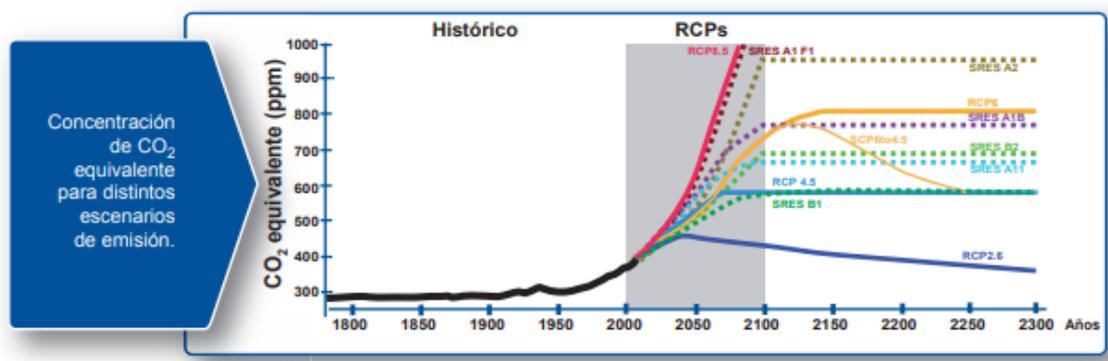


Figura 2. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> desde el siglo XIX hasta el XXIV para los distintos escenarios de cambio climático. Fuente: guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. WGI. "Cambio Climático: Bases Físicas" 2013.

Estos RCPs han sido desarrollados por 4 grupos/modelos diferentes (NIES/AIM, IIASA/MESSAGE, PNNL/MiniCAM, y PBL/IMAGE). La Tabla 6 muestra un resumen con la descripción y referencias de cada uno de estos cuatro escenarios.

	Description	IA Model	Publication – IA Model
RCP8.5	Rising radiative forcing pathway leading to 8.5 W/m <sup>2</sup> in 2100.	MESSAGE	Riahi et al. (2007) Rao & Riahi (2006)
RCP6	Stabilization without overshoot pathway to 6 W/m <sup>2</sup> at stabilization after 2100	AIM	Fujino et al. (2006) Hijioka et al. (2008)
RCP4.5	Stabilization without overshoot pathway to 4.5 W/m <sup>2</sup> at stabilization after 2100	GCAM (MiniCAM)	Smith and Wigley (2006) Clarke et al. (2007) Wise et al. (2009)
RCP2.6	Peak in radiative forcing at ~ 3 W/m <sup>2</sup> before 2100 and decline	IMAGE	van Vuuren et al. (2006; 2007)

Tabla 6. Descripción y referencias de cada uno de los escenarios del AR5.

En este proyecto se han analizado dos de estos cuatro escenarios: el rcp4.5 (representativo de un escenario de estabilización) y el rcp8.5 (el escenario más pesimista, que define la situación actual socio-económica):

- El escenario **RCP4.5** ha sido desarrollado por el grupo MiniCAM del JGCRI (Universidad de Maryland, EEUU). En este escenario el forzamiento radiativo total se estabiliza antes del 2100, gracias al uso de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de GEI. Los conductores (*drivers*) de este escenario y las opciones tecnológicas se detallan en Clarke *et al.* (2007). Detalles sobre la simulación de los usos del suelo y emisiones de carbono terrestre se pueden encontrar en Wise *et al.* (2009).
- El escenario **RCP8.5** ha sido desarrollado por el grupo MESSAGE y por el IIASA (Austria). Es representativo de escenarios con altas concentraciones de GEIs. Es un

escenario denominado “línea de base”, que no incluye ningún objetivo específico de mitigación. Se caracteriza por la ausencia de políticas de cambio climático. Además, combina supuestos de: alta densidad de poblaciones; un crecimiento relativamente lento de generación de ingresos; moderadas mejoras de cambio tecnológico y gasto energético, etc. A largo plazo conlleva a una alta demanda de energía y emisiones de GEI. Los conductores (*drivers*) de este escenario y demás características se detallan en Riahi *et al.* (2007).

### 3.2. Técnicas de regionalización (downscaling)

Las simulaciones del sistema climático terrestre para diferentes escenarios de cambio climático son la principal fuente de información disponible para llevar a cabo estudios asociados a impactos climáticos. Estas simulaciones, sin embargo, se elaboran utilizando modelos climáticos globales (GCM) que presentan una resolución espacial del orden de cientos de kilómetros.

Para poder realizar proyecciones regionales de variables marinas en la costa española se realiza un proceso de reducción de escala, denominado regionalización o downscaling. Existen diferentes técnicas de downscaling, aunque todas ellas parten de la misma premisa: el clima regional está conectado al sistema climático a escala global. De esta forma, el downscaling consiste en obtener relaciones cuantitativas entre la circulación a gran escala atmosfera-océano y el clima local mediante una función matemática de transferencia. Las funciones a emplear se han desarrollado mediante modelos analítico-matemáticos o estadísticos a partir de datos climáticos históricos, generalmente observaciones. A nivel general, los métodos se clasifican en dos grandes familias: el método dinámico y el método estadístico.

#### 3.2.1. Downscaling dinámico

El downscaling dinámico está basado en el empleo de modelos numéricos que simulan los procesos físicos. Mediante el empleo de esta técnica, los campos de alta resolución se obtienen anidando un modelo climático regional a un modelo global, o utilizando un modelo global que presente una resolución espacial variable con mayor definición en la zona objetivo. El empleo de esta técnica presenta ciertas ventajas con respecto a la técnica de downscaling estadístico (resolución espacio-temporal completa y consideración de la propagación espacial, obtención de series temporales con alta resolución temporal, mejor representación de los eventos extremos, etc.). No obstante, está condicionada por la habilidad del modelo numérico para resolver la variable objetivo (por ejemplo, modelo de propagación del oleaje para resolver la altura, periodo y dirección del oleaje en la costa) y conlleva un alto coste computacional en comparación con la técnica estadística. El modelo numérico y configuración a aplicar si se selecciona esta técnica está condicionada por la variable objetivo. En este proyecto se han utilizado los resultados procedentes de downscaling dinámico para las variables oleaje, marea meteorológica y nivel medio del mar.

### 3.2.2. Downscaling estadístico

El downscaling estadístico está basado en el uso de modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables climáticas a gran escala (dadas por un GCM) con las variables locales/regionales de interés. La metodología estadística requiere un menor esfuerzo computacional, permitiendo analizar un gran número de simulaciones. La selección de esta técnica se plantea cuando el downscaling dinámico no es abordable o idóneo, lo cual depende del tiempo computacional que requiere simular mediante modelo una variable climática (periodos de al menos 20 años) y la habilidad de los modelos numéricos para resolver dicha variable.

Existen diferentes técnicas estadísticas, como métodos de regresión, el método de los análogos, asociación en función de tipos de tiempo, redes neuronales, etc. En este proyecto se ha optado por la aplicación de una metodología de downscaling estadístico para realizar las proyecciones climáticas de SST a alta resolución a lo largo de la costa española. Para ello se ha partido de la información de SST procedente de 22 GCMs disponibles con una resolución temporal mensual y a resoluciones espaciales que varían desde 0.5° a 1.5°, dependiendo del GCM. Por otro lado, la resolución de SST a lo largo de la costa está condicionada por la disponibilidad de bases de datos históricas de esta variable con un periodo de años significativo para capturar la variabilidad interanual y proporcionar un ajuste estadístico robusto. Actualmente, la base de datos histórica de mayor resolución y mayor cobertura temporal presenta una resolución espacial de 0.05°. Por tanto, las proyecciones de SST se generarán a lo largo de la costa española a esta resolución para los escenarios de cambio climático considerados (RCP4.5 y RCP8.5) a lo largo de todo el siglo XXI. En la Figura 3 se muestra un esquema de la metodología propuesta: se establece una relación entre la SST a alta resolución a lo largo de un tramo de costa (en este ejemplo, el Cantábrico) y la SST en un dominio regional a una resolución de 1.0°. Los parámetros del modelo estadístico se ajustan utilizando los datos históricos del predictor (SST a 1.0°) y del predictando (0.05° ~6.0 km). Este modelo se aplica las proyecciones futuras de SST de los GCMs para obtener las proyecciones de SST de alta resolución a lo largo de la costa.

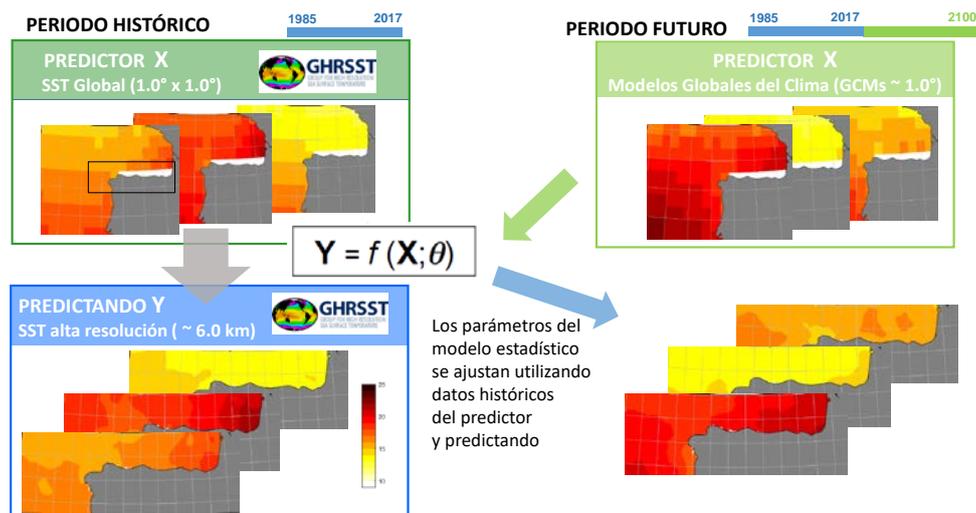


Figura 3. Esquema general de la metodología de downscaling estadístico empleada para la obtención de las proyecciones de SST a alta resolución a lo largo de la costa española.

### 3.3. Corrección del sesgo

Las variables climáticas que resultan de los modelos climáticos pueden presentar errores sistemáticos importantes debido a la falta de resolución espacial, simplificaciones de los procesos físicos y termodinámicos, esquemas numéricos, errores en las condiciones iniciales y de contorno, complejidad de los procesos climáticos, etc. Por este motivo, es importante aplicar una corrección en los datos mediante métodos que permitan reducir el sesgo en sus estadísticos. Para ello, se suelen utilizar métodos de corrección de sesgo cuyo objetivo es obtener unas proyecciones de cambio climático más realistas que se puedan utilizar en estudios de impacto y vulnerabilidad.

Existen diferentes métodos de corrección del sesgo, como por ejemplo *Delta Change* (DC) o el mapeo de cuantiles empíricos (*Empirical Quantile Mapping*, EQM). Este último es uno de los métodos más actualizados hoy en día (Déqué, 2007; Michelangeli *et al.*, 2009) y es el que se ha empleado en este proyecto para corregir los valores de distintas variables analizadas. El EQM se basa en estudiar la distribución estadística de los valores de la variable objetivo a partir de datos históricos/observaciones, y realizar un ajuste de algunas de las características de la función de distribución de probabilidad empírica con los valores simulados durante el periodo climático de referencia. Posteriormente, aplica el resultado de este ajuste a los datos obtenidos para diferentes proyecciones climáticas a futuro, de forma que las simulaciones queden corregidas.

El método para aplicar el EQM se calcula a partir de la distribución de probabilidad empírica, pero las correcciones se aplican sobre la función de distribución acumulada (CDF):

$$y = F_{obs}^{-1}(F_{model}(x)) \quad (1)$$

Donde  $y$  es la variable climática corregida y  $x$  el valor simulado;  $F_{model}$  y  $F_{obs}$  son las CDF de los datos simulados y observados, respectivamente.

Los cuantiles que se han utilizado para aplicar el EQM se han seleccionado de dos formas distintas para diferentes partes de la distribución:

- Linealmente: desde el percentil 1, cada 5 percentiles hasta el percentil 90%.
- En escala Gumbel: para caracterizar de forma más precisa la cola superior de la distribución, asociada a los eventos extremos. Se han seleccionado los cuantiles de acuerdo a una distribución de Gumbel y se han escogido aquellos valores por encima del 90%. La distribución estándar de Gumbel tiene la forma:

$$F(x) = e^{-e^{-x}} \quad (2)$$

En este trabajo, se ha corregido el sesgo mediante la técnica de EQM de los resultados de las proyecciones dinámicas de oleaje y marea meteorológica. En concreto, se han corregido las variables altura de ola significativa (hs), periodo medio (tm) y de pico (tp) y marea meteorológica (mm). Un ejemplo del sesgo que presentan los modelos climáticos se muestra en la Figura 4, en la que se representan los cuantiles de las variables Hs y marea meteorológica en 3 puntos de la costa española, para la base de datos de referencia ERA5 y para cada modelo climático, ambos en el periodo de control 1985-2005. Las figuras de la derecha muestran los resultados después de aplicar el método del EQM, en las que se observa que el sesgo ha sido corregido para todos los modelos y cuantiles.

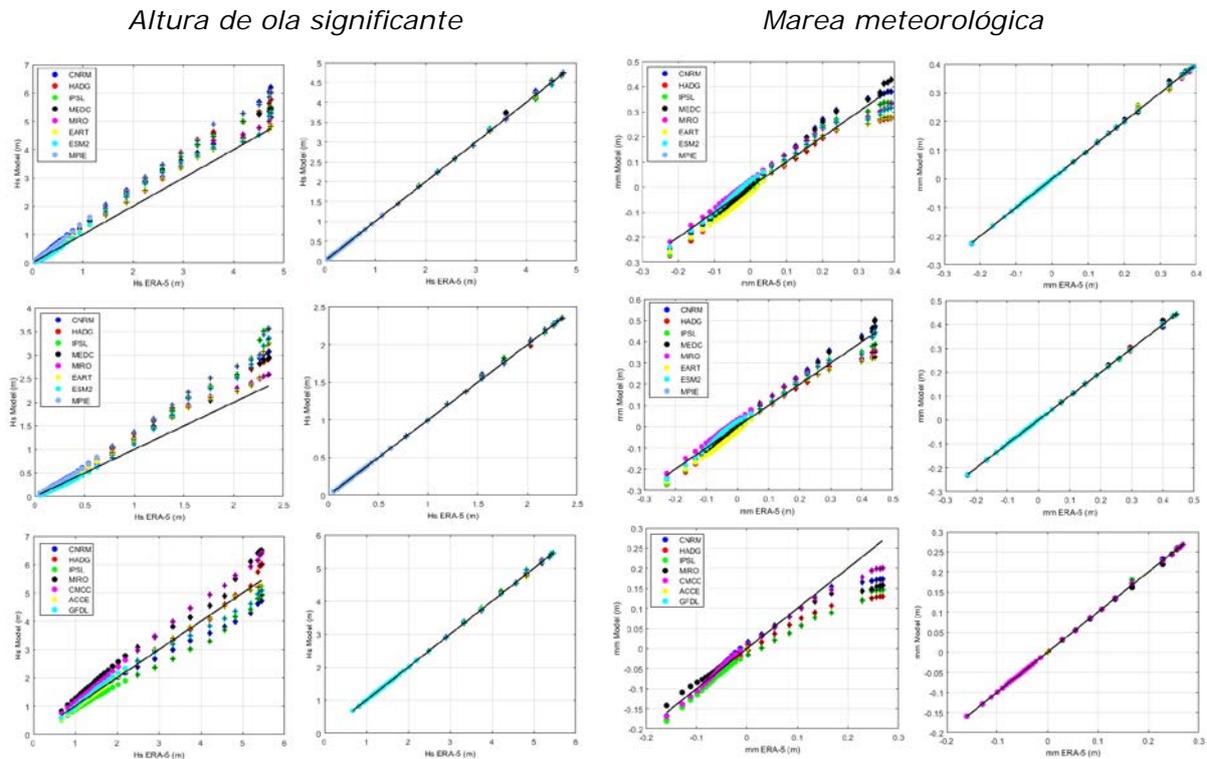


Figura 4. Comparación de los valores de los cuantiles de la base de datos de ERA5 con cada uno de los modelos climáticos antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar la corrección del sesgo, en 3 puntos de la costa española cuyas coordenadas [lon, lat] son: [2.583, 39.33], [1.5, 41.166] y [-16.1, 28.6]. La figura de la izquierda corresponde a la variable de altura de ola significativa y la de la derecha, a la marea meteorológica. Las cruces negras sobre los puntos representan los valores por encima del cuantil del 90%.

### 3.4. Cálculo del *mean ensemble* e incertidumbre

Una vez procesadas las bases de datos procedentes de las simulaciones climáticas para diferentes escenarios de cambio climático futuro, el análisis del cambio requiere de un tratamiento estadístico de todos los miembros (simulaciones asociadas a un modelo climático determinado), de forma que se estima el cambio medio (*mean ensemble*) y su incertidumbre (varianza del ensemble).

La estimación del valor medio del ensemble se ha realizado en este estudio sin ponderación de sus miembros, estimando la media aritmética.

Las diferencias en las condiciones iniciales y la formulación de los modelos dan lugar a diferentes evoluciones de los sistemas de los modelos y pueden aportar información sobre la incertidumbre asociada con el error de los modelos y con la variabilidad climática generada internamente. En este proyecto se ha cuantificado la incertidumbre asociada al cambio mediante estimación de la desviación típica de los miembros de cada ensemble y la banda de confianza del 90% (delimitada por el cuantil del 5% y 95%, respectivamente). Para la estimación de la banda de confianza del 90% del cambio medio se ha utilizado la distribución t-student. La aplicación de la t-student en vez de una distribución normal se debe al número de miembros disponibles (en todos los casos menor a 30 miembros). La Figura 5 ilustra estos estadísticos proporcionados para cada ensemble.

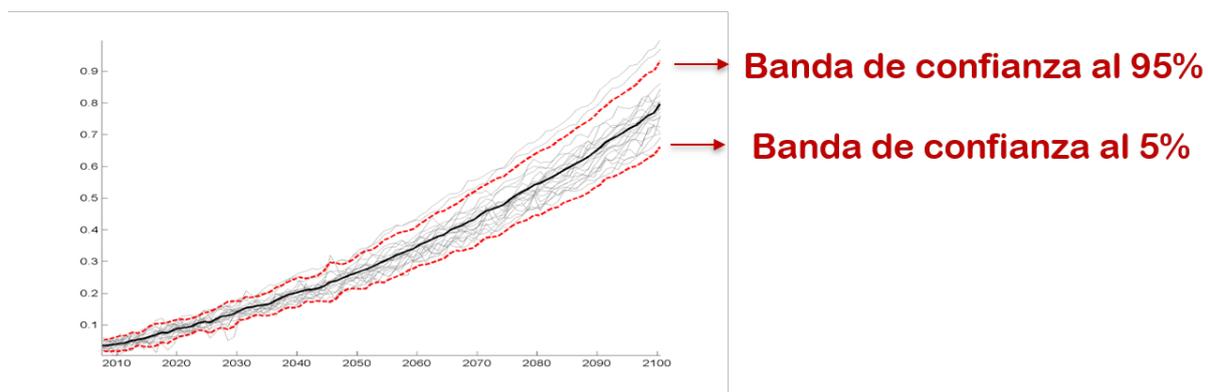
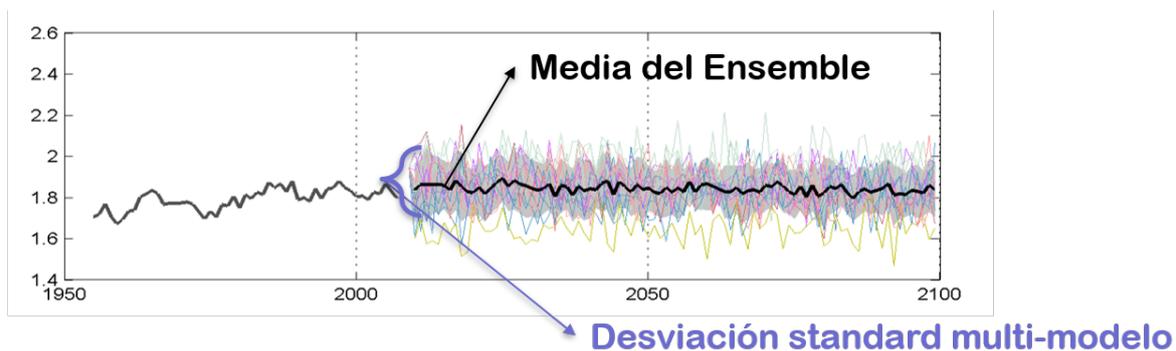


Figura 5. Ejemplo de reconstrucción de dos ensambles (arriba: altura de ola significativa; abajo: aumento de nivel del mar).

## 4. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE OLEAJE

En este apartado se describe de forma detallada la realización de las proyecciones climáticas regionales de oleaje, la configuración del modelo numérico de oleaje, los dominios de cálculo, las condiciones iniciales y de contorno, así como los productos generados y la validación de la metodología.

### 4.1. Configuración del método de downscaling dinámico

Para calcular las proyecciones dinámicas de oleaje se ha utilizado el modelo numérico WaveWatchIII (WW3; versión 4.18; Tolman *et al.*, 2002). WW3 es un modelo espectral de tercera generación que permite simular la generación y propagación del oleaje. Para ello, resuelve la ecuación de balance de energía teniendo en cuenta, en aguas someras, el efecto de la profundidad, la refracción, la fricción con corrientes y fondo, el crecimiento y decaimiento de la energía de ola y las interacciones no lineales entre ellas. Un aspecto interesante de WW3 es que puede realizar simulaciones en varias mallas simultáneamente con retroalimentación entre ellas, lo que permite obtener mayor resolución en zonas de interés. WW3 ofrece distintos tipos de formulaciones para simular los procesos físicos, los cuales van a condicionar los resultados que se obtengan. Las formulaciones utilizadas en este estudio se especifican a continuación:

- Se ha utilizado la parametrización TEST451 (Ardhuin *et al.*, 2010), ya que los errores en las alturas de ola obtenidos con esta formulación son menores que cuando se emplean otras formulaciones más antiguas (Stopa *et al.*, 2016).
- La variable de concentración de hielo marino se ha introducido al modelo de modo continuo, considerando que los niveles de bloqueo de generación/propagación de oleaje aumentan progresivamente desde concentraciones de 0.25 (se considera que no tiene efecto) hasta 0.75 (por encima del cual, se considera bloqueo total).
- Se utilizó la formulación de SHOWEX para simular la fricción con el fondo (Ardhuin *et al.*, 2003) (en vez de utilizar la formulación empírica de JONSWAP), que se basa en medidas de campo realizadas dentro de los experimentos DUCK'94 y SHOWEX.
- El efecto sobre el oleaje que tienen las islas y elementos costeros que son más pequeños que el tamaño de celda de la malla pueden ser una fuente importante de error. Por ello se han tenido en cuenta 'obstrucciones', disminuyendo el flujo de energía a través de los contornos de las celdas (Tolman *et al.*, 2003).
- La reflexión con la costa se estableció con un valor de 0.05.
- La Aproximación de Interacción Discreta (DIA, Hasselmann *et al.*, 1985) se ha utilizado para calcular las interacciones no lineales del oleaje.
- La rotura del oleaje en aguas someras se ha calculado siguiendo la aproximación de Battjes y Janssen (1978) usando un limitador de máxima energía en aguas someras (Miche-style).
- Se ha activado el esquema de propagación de tercer orden Ultimate Quickest con la corrección por el "efecto aspensor" propuesta por Tolman *et al.* (2002).

## 4.2. Dominios de cálculo

Para este proyecto se han diseñado dos dominios de cálculo que abarcan toda la costa española: uno para la costa atlántica, Golfo de Cádiz, Cantábrico y Canarias (dominio atlántico) y, otro para la costa mediterránea, Estrecho de Gibraltar y mar de Alborán (dominio mediterráneo) (Figura 6 y Figura 7). Cada uno de estos dominios está formado por diferentes mallas rectangulares conectadas entre sí a través del sistema de simulación “multigrad” del modelo numérico. No obstante, con el objetivo de reducir el tiempo de cómputo y mejorar el ajuste a la zona de estudio, las mallas se han modificado y adaptado a la zona de interés mediante la activación y desactivación de nodos.

El dominio atlántico está compuesto por cuatro mallas numéricas de distinta resolución: (1) La malla global, abarca desde los 0° a los 359° de longitud y desde los -85° a los 88° de latitud; (2) la malla atlántico, se extiende desde los -35° a los 9° de longitud y de los 23° a los 61° de latitud; (3) la malla España-Atlántico, que tiene alta resolución para resolver con detalle toda la costa española. Esta malla se ha modificado de forma que la región activa siga la forma de la plataforma continental a lo largo de toda la costa de estudio. Por último, se diseñó una cuarta (4) malla que cubre la región del Ártico con el objetivo de delimitar esta zona que requiere pasos de tiempo más cortos y, de esta manera, aumentar la eficiencia del modelo. En la Tabla 7 se especifica la extensión y resolución de las 4 mallas.

Malla	Longitud mínima	Longitud máxima	Latitud mínima	Latitud máxima	Resolución horizontal
Global	0°	359°	-85°	88°	1°x1°
Ártico	0°	359°	75°	88°	1°x1°
Atlántico	-35°	9°	23°	61°	0.5°x0.5°
España (Atlántico)	-19.5°	0°	26.5°	45.5°	0.1°x0.1°

Tabla 7. Características de las mallas del dominio atlántico.

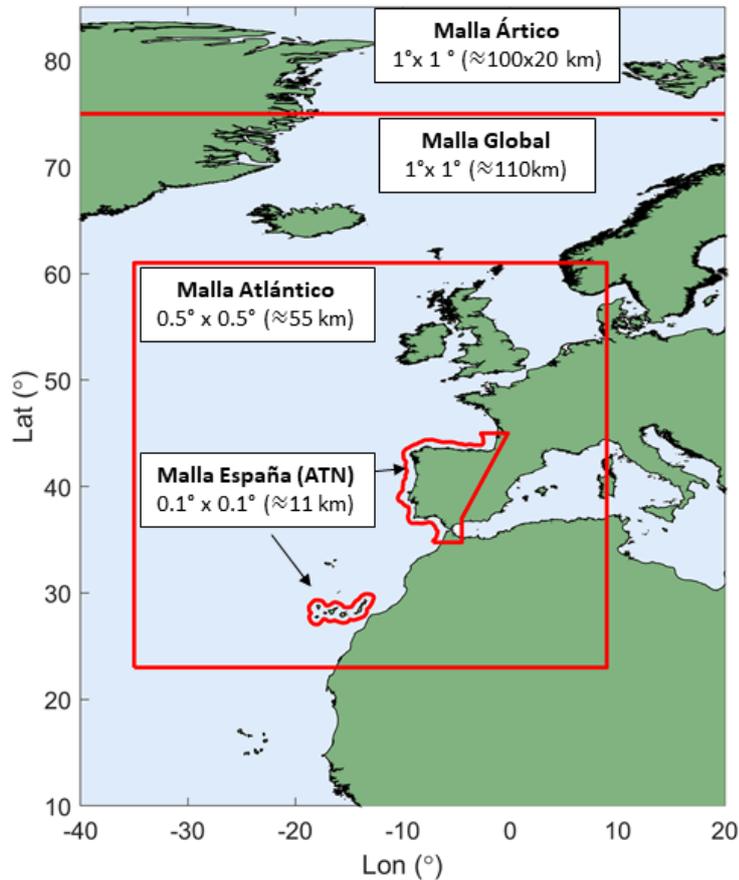


Figura 6. Mallas de cálculo de WW3 que componen el dominio atlántico.

En el modelo WW3 se necesitan definir 4 tipos de pasos de tiempo. En la Tabla 8 se recogen los valores de dichos pasos de tiempo en cada una de las mallas del dominio atlántico:

	Pasos de tiempo (s)			
	Global	Propagación espacial	Propagación intra-espectral	Término fuente
Malla Global	2880	720	1440	20
Malla Atlántico	1800	900	900	20
Malla España Atlántico	240	240	120	20
Malla Ártico	1800	900	900	20

Tabla 8. Pasos de tiempo en las mallas del dominio atlántico.

El dominio mediterráneo está compuesto por dos mallas numéricas: (1) la malla Mediterráneo que abarca todo el Mediterráneo Occidental, y (2) la malla España-Mediterráneo, que cubre la costa mediterránea española y el archipiélago Balear (Tabla 9). De nuevo, y como ocurría con la malla España-Atlántico, la zona activa de extracción de campos de oleaje sigue aproximadamente la forma de la plataforma continental.

Malla	Longitud mínima	Longitud máxima	Latitud mínima	Latitud máxima	Resolución horizontal
Mediterráneo	-14°	17.5 °	32.5 °	46.5°	0.25°x0.25°
España (Mediterráneo)	-7	6°	34°	44°	0.08°x0.08°

Tabla 9. Características de las mallas del dominio mediterráneo.

En la Tabla 10 se indican los pasos de tiempo considerados en cada una de las dos mallas:

	Pasos de tiempo (s)			
	Global	Propagación espacial	Propagación intra-espectral	Término fuente
Malla Mediterráneo	600	600	300	20
Malla España-Mediterráneo	240	240	120	20

Tabla 10. Pasos de tiempo en las mallas del dominio mediterráneo.

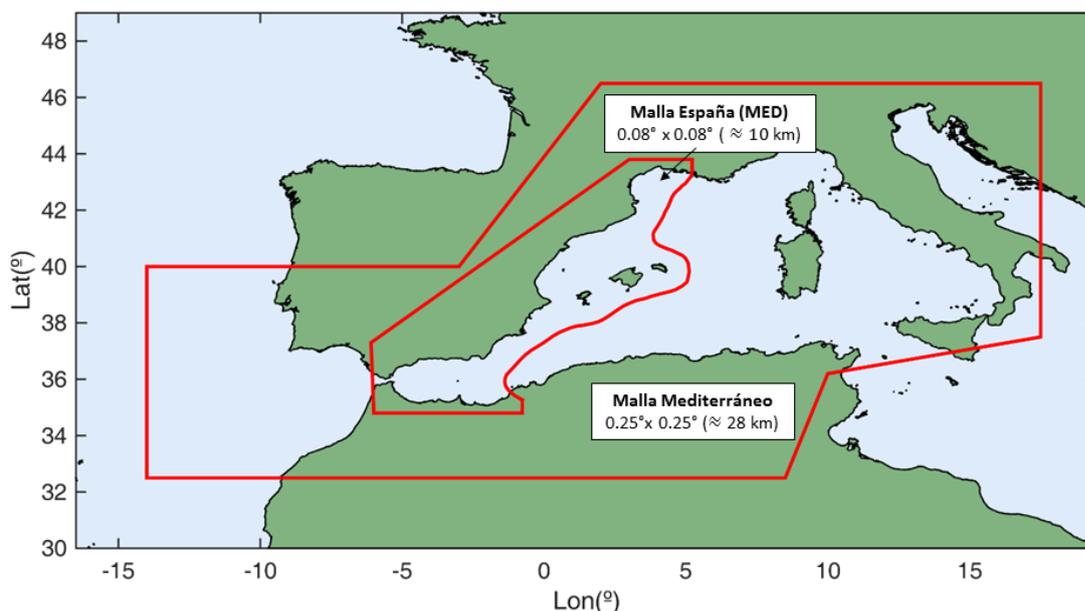


Figura 7. Mallas de cálculo de WW3 que componen el dominio mediterráneo.

### 4.3. Condiciones iniciales y de contorno

La batimetría, la máscara tierra-mar, y las obstrucciones para cada malla se obtuvieron a partir de una versión actualizada del software de generación para WAVEWATCHIII (Chawla and Tolman 2008). Como datos de batimetría se utilizó la base de datos Earth2014, que tiene una resolución espacial de, aproximadamente, 1.8 km (Hirt and Rexer, 2015). Por otro lado, las líneas de costa se extrajeron de GSHHG (Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Geography Database, Wessel and Smith 1996).

Los forzamientos con los que se alimenta el modelo se han obtenido de los distintos modelos climáticos que se especifican en el apartado 2.2. En concreto, se utilizan los datos de las siguientes variables:

- Campos de viento superficiales (en m/s): los datos de viento de los modelos climáticos se han interpolado a cada nodo de las mallas y a escala horaria para todo el periodo simulado. La resolución temporal original de estos datos es 3-horaria y 6-horaria en el caso de los GCM y RCM, respectivamente.
- Cobertura de hielo (en tanto por uno): este forzamiento se utiliza sólo en el dominio atlántico, mientras que el dominio mediterráneo sólo se alimenta de los campos de viento. Estos datos también se han interpolado a cada nodo de las mallas y a escala horaria. La resolución temporal original de los datos de cobertura de hielo es horaria.

#### 4.4. Validación del modelo

Con el objetivo de validar la metodología aplicada de downscaling dinámico se comparan los resultados obtenidos durante el periodo histórico de referencia 1985-2005. Para ello, se han utilizado las variables atmosféricas procedentes de la base de datos de reanálisis ERA-5 como forzamiento del modelo WW3 y las boyas descritas en el apartado 2.1.3.

Las Figuras 8-10, muestran los resultados de la comparación con las boyas de Bilbao, Valencia y Las Palmas de Gran Canaria, respectivamente. En los tres casos, se observa una concordancia en el comportamiento de la variable de altura de ola significativa, aunque los resultados obtenidos a partir de ERA-5 tienden a subestimar ligeramente la altura de ola, tal y como se deduce de los diagramas cuantil-cuantil. A pesar de ello, el coeficiente de correlación es superior a 0.9 en todos los casos y el comportamiento temporal coincide entre ambas fuentes de datos. Por tanto, estos resultados nos permiten validar tanto el modelo numérico, las características de las mallas de cálculo generadas, así como las condiciones iniciales y de contorno utilizadas.

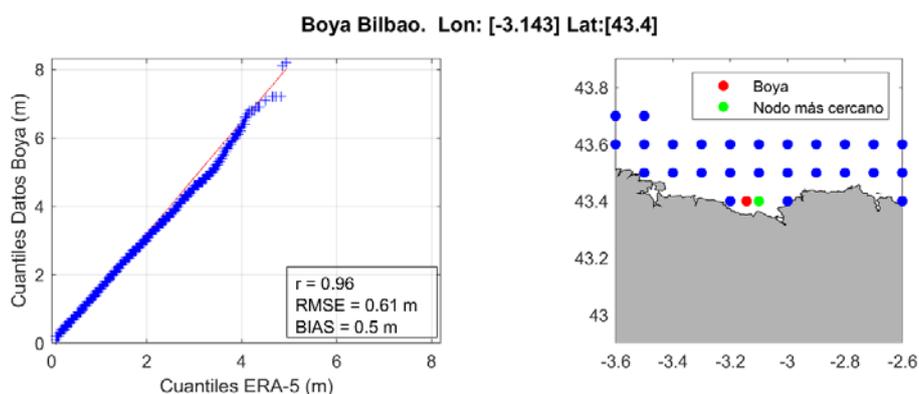


Figura 8. Validación del downscaling dinámico de oleaje. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los de la boya REDCOS de Bilbao de Puertos del Estado.

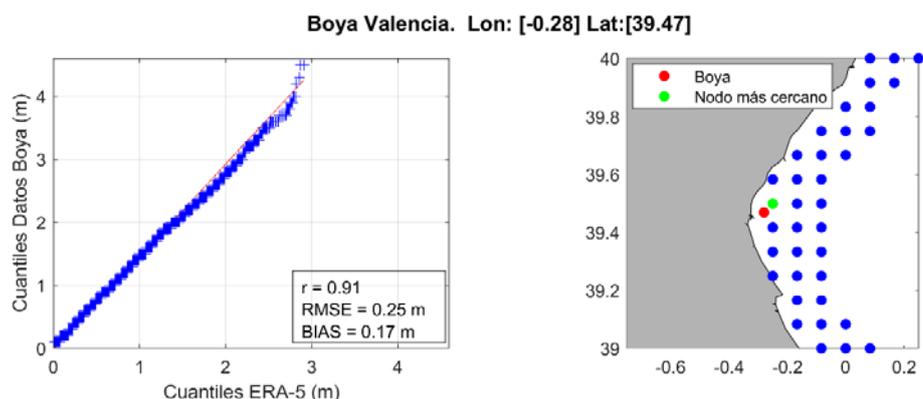


Figura 9. Validación del downscaling dinámico de oleaje. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los de la boya REDCOS de Valencia de Puertos del Estado.

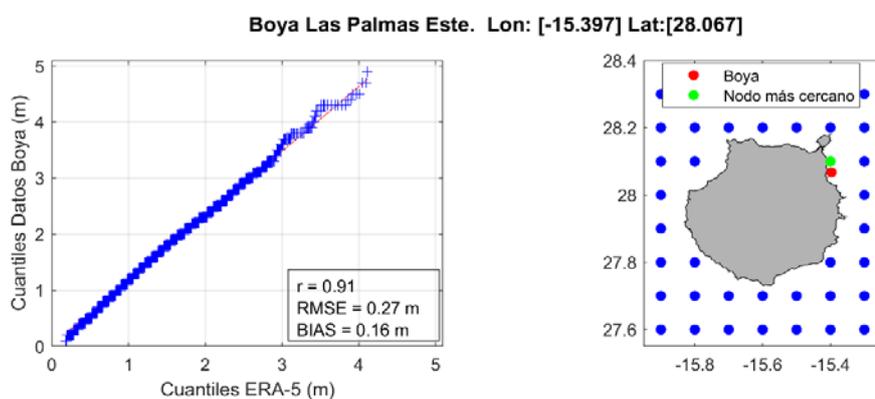


Figura 10. Validación del downscaling dinámico de oleaje. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los de la boya REDCOS de Las Palmas de Gran Canaria de Puertos del Estado.

#### 4.5. Productos generados

Como salidas del modelo WW3 se han obtenido los campos de oleaje en cada una de las mallas a resolución horaria. Las variables extraídas se detallan en la Tabla 11.

<b>Variables</b>
Altura de ola significativa ( $H_s$ )
Periodo medio ( $T_m$ )
Dirección media ( $Dir$ )
Periodo de pico ( $T_p$ )

Tabla 11. Variables de salida de los campos de oleaje del modelo WW3.

A partir de estos resultados se han generado dos tipos de productos: (1) series temporales de los distintos modelos y escenarios en puntos discretos a lo largo de toda la costa española y, además, en ellos se han calculado los cambios en diferentes indicadores climáticos; (2) mapas con los cambios en los principales indicadores climáticos. A continuación, se describen de forma detallada ambos productos:

#### **4.5.1. Puntos costeros**

Se han escogido un total de 1196 puntos a lo largo de la costa española, que abarcan desde los nodos de la malla de mayor resolución más próximos a costa (alcanzando profundidades inferiores a 10 m) hasta la zona de mar abierto (con profundidades, en algunos casos, superiores a los 1000 m) (Figura 11). De los 1196 puntos, 601 corresponden al dominio atlántico y 595, al mediterráneo. De esta manera, los datos se han extraído de las mallas España-Atlántico y España-Mediterráneo, con una resolución de 0.1° y 0.08°, respectivamente.

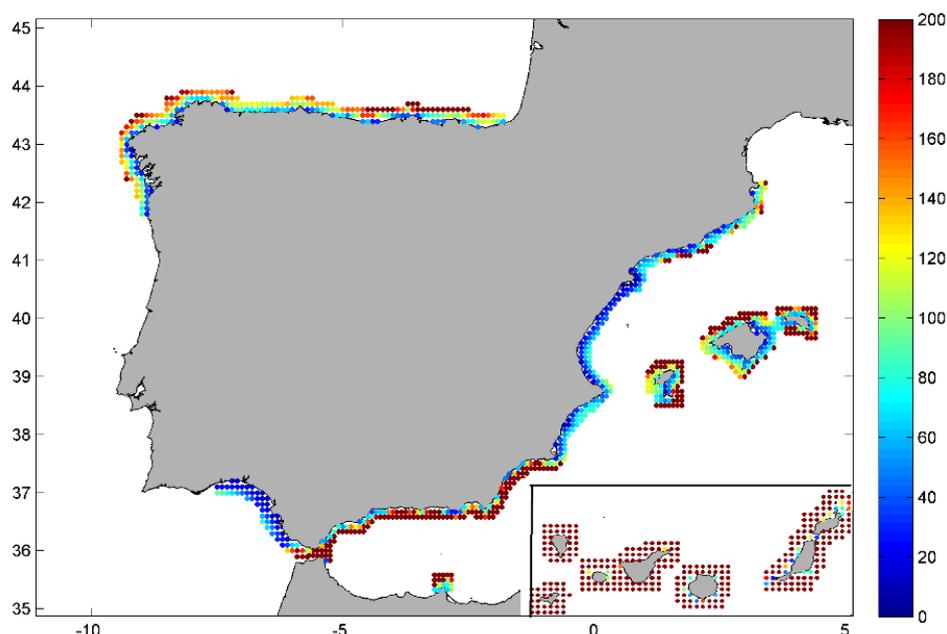


Figura 11. Ubicación y profundidad (en metros) de los 1196 puntos seleccionados a lo largo de la costa española

En cada uno de estos puntos, se han extraído las series temporales horarias de cada uno de los modelos y escenarios climáticos disponibles para las siguientes variables: altura de ola significativa (hs), periodo medio (tm), periodo de pico (tp) y dirección media del oleaje (dir). Para cada escenario climático, se han extraído los periodos a corto (2026-2045) y largo plazo (2081-2100) por separado. Por otro lado, se ha corregido el sesgo de cada una de estas series utilizando, para ello, el periodo histórico o de control de cada modelo y la base de datos de referencia ERA-5, para los años 1985-2005.

A partir de las series temporales horarias corregidas se han calculado los cambios a corto y largo plazo en distintos indicadores climáticos de las cuatro variables de interés. En concreto, se han determinado los cambios mensuales, anuales y en todo el periodo de 20 años (es decir, 2026-2045 o 2081-2100). Como indicadores climáticos se ha utilizado el valor medio y los percentiles [de 1 a 99% cada unidad, y el percentil del 99.5% y del 99.9%]. El procedimiento para determinar estos cambios ha consistido en calcular los valores medios y percentiles mensuales, anuales y 20-anuales de los escenarios climáticos de cada uno de los periodos analizados (corto y largo plazo) y restarles el correspondiente valor en el periodo de control. En el periodo de control se ha calculado el valor medio y los percentiles de (1) los 21 años de periodo de control (1985-2005) y de (2) cada uno de los

meses de estos 21 años. A fin de obtener un único valor de cada estadístico representativo de cada mes del año, se calculó la media de todos los meses.

En el caso de la dirección media del oleaje, sólo se han calculado los cambios en el valor medio teniendo en cuenta el comportamiento direccional de esta variable. Por último, se ha determinado el ensemble multi-modelo (valor medio e incertidumbre asociada) de los cambios 20-anuales (es decir, en los periodos 2026-2045 y 2081-2100) en los valores medios y percentil del 99.9% de las variables de interés.

El formato de los archivos en los que se entregan tanto las series temporales como los cambios es NetCDF, siguiendo el formato e indicaciones establecidas por *NetCDF CF (Climate and Forecast) Metadata conventions* (<http://cfconventions.org/>).

#### **4.5.2. Mapas de cambios**

Para tener una idea global de los cambios en las dinámicas marinas a lo largo del S.XXI en la costa española, se han generado unos mapas que abarcan toda la península ibérica hasta Canarias y parte del Mediterráneo. En concreto, el mapa se extiende desde la longitud  $-20^{\circ}$  a  $9^{\circ}$  y latitud  $25^{\circ}$  a  $46.75^{\circ}$ , que es el área común a las mallas de WW3 y ROMS. Estos mapas tienen una resolución de  $0.5^{\circ}$  en la región atlántica y de  $0.25^{\circ}$ , en la mediterránea, ya que se han extraído de las mallas Atlántico y Mediterránea del WW3. En cada nodo, se ha corregido el sesgo de cada modelo y escenario climático utilizando la base de datos de referencia ERA-5. Por último, para cada modelo y escenario se han calculado los cambios (en periodos de 20 años) en los valores medios y percentil 99 de cada una de las variables de interés, utilizando para ello el periodo de control. Estos cambios se han determinado para cada modelo y escenario por separado y, por último, se ha calculado el *mean ensemble* e incertidumbre de todos los modelos. Además de los cambios, se entregan los valores medios y percentil 99% en el periodo de control 1985-2005 de la base de datos de referencia ERA-5, que se utiliza como representativo del clima presente. Estos mapas se entregan en formato NetCDF, siguiendo el formato e indicaciones establecidas por *NetCDF CF (Climate and Forecast) Metadata conventions*.

## 5. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE MAREA METEOROLÓGICA

En este apartado se describe de forma detallada la metodología aplicada para desarrollar las proyecciones climáticas regionales de marea meteorológica, la configuración del modelo numérico, los dominios de cálculo, las condiciones iniciales y de contorno, así como los productos generados y la validación de la metodología.

### 5.1. Configuración del método de downscaling dinámico

Las proyecciones dinámicas de la componente meteorológica del nivel del mar (o marea meteorológica) se han simulado mediante el modelo de circulación oceánica ROMS, versión 3.5 (Regional Ocean Modeling System, Shchepetkin y McWilliams 2005). ROMS es un modelo hidrodinámico tridimensional de superficie libre con coordenada vertical adaptable al terreno (terrain-following coordinates). Este modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes con promediado de Reynolds (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations), asumiendo la hipótesis de presión hidrostática y la aproximación de Boussinesq. ROMS resuelve dichas ecuaciones mediante diferencias finitas, empleando un esquema explícito que considera diferentes pasos de tiempo para la resolución de los procesos barotrópicos (fast mode) y los baroclínicos (slow mode).

Para simular la marea meteorológica en la zona de estudio se ha forzado el modelo, tanto en superficie como en los contornos abiertos de la malla numérica utilizada, con información procedente de los modelos climáticos descritos en el apartado 2.2. Mientras que en superficie se ha forzado con información de presión a nivel del mar y tensiones de viento, en los contornos se ha utilizado una condición de tipo Chapman (Chapman 1985), incluyendo información de nivel de mar estimada mediante la aproximación de barómetro inverso. Dicha aproximación relaciona las variaciones en la presión atmosférica con las variaciones en el nivel del mar, de forma que 1 milibar de descenso en la presión ocasiona un incremento de 1 cm en el nivel del mar. El nivel de referencia utilizado en las simulaciones llevadas a cabo dentro de este proyecto corresponde con el nivel a una presión atmosférica de 1013 mb. Por este motivo, para las proyecciones a futuro en donde la presión media a nivel del mar puede diferir de 1013 mb se recomienda restar al valor de marea meteorológica, el valor medio de marea meteorológica en todo el periodo simulado, a fin de obtener una marea meteorológica media igual a cero.

### 5.2. Dominios de cálculo

Para obtener las proyecciones de marea meteorológica a lo largo de la costa española, se han diseñado dos mallas ortogonales: una que abarca tanto la costa atlántica (Canarias, Golfo de Cádiz y de Vizcaya) como la mediterránea (malla atlántico+mediterráneo); y otra exclusivamente para la costa peninsular, incluyendo la región mediterránea, Baleares, Estrecho de Gibraltar, mar de Alborán, Ceuta y Melilla (malla mediterráneo) (Figuras 12 y 13). El uso de estas dos mallas con resoluciones similares ( $0.08^\circ \times 0.06^\circ$ ) es debido a la disponibilidad de bases de datos procedentes de los modelos climáticos (véase 2.2): mientras los modelos regionales no cubrían la región Canaria, los modelos globales cubren toda la región de interés pero con menor resolución. Por tanto, la denominada malla mediterráneo es forzada con datos de modelos regionales con mayor resolución, mientras que la malla denominada malla atlántico+mediterráneo es forzada con los modelos

globales. Las características de ambas mallas se detallan en la Tabla 12. En lo referente al paso de tiempo utilizado, ambas mallas simulan en 2D utilizando un paso de tiempo de 20 s cumpliendo con la condición de Courant.

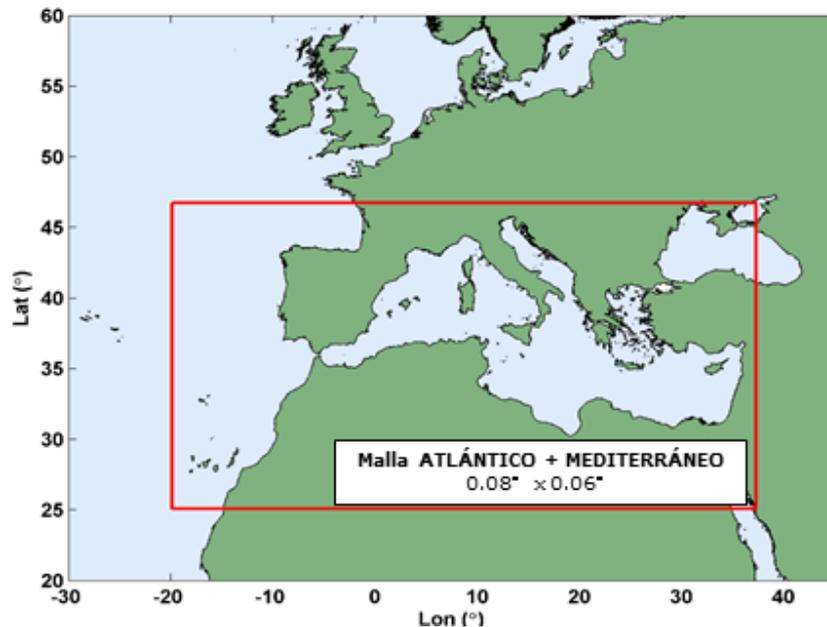


Figura 12. Mallas de cálculo del modelo ROMS que abarca el dominio atlántico y el mediterráneo.

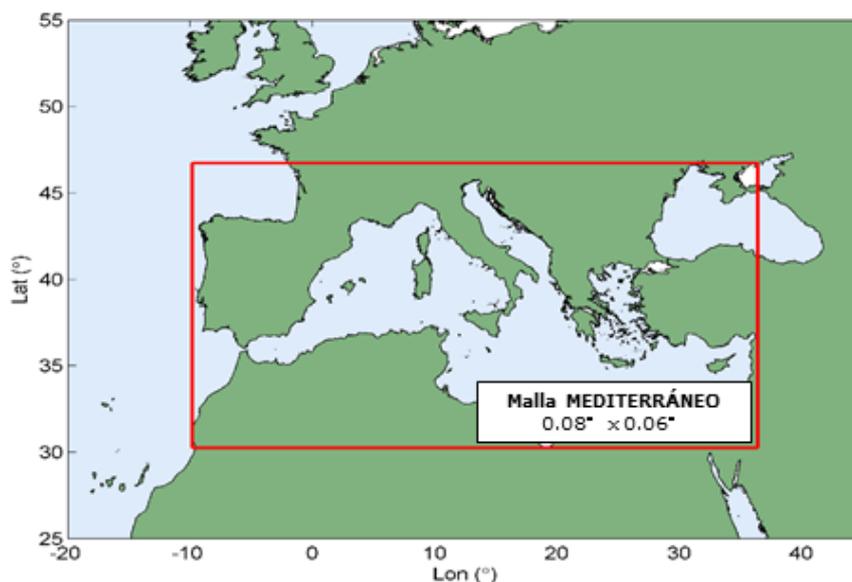


Figura 13. Mallas de cálculo del modelo ROMS que abarca el dominio mediterráneo.

Malla	Longitud mínima	Longitud máxima	Latitud mínima	Latitud máxima	Resolución horizontal
Atlántico	-19.9	37.33	25	46.75	0.08° x 0.06°
Mediterráneo	-9.83	36.42	30.25	46.75	0.08° x 0.06°

Tabla 12. Características de las mallas utilizadas en ROMS.

### 5.3. Condiciones iniciales y de contorno

El modelo ROMS necesita información batimétrica, que en este caso ha sido extraída de la base de datos de alta resolución EMODnet (<http://www.emodnet.eu/>), la cual cuenta con una resolución espacial de 115-240 m (1/16 – 1/8 minutos). Al igual que la información atmosférica, esta información batimétrica ha sido interpolada espacialmente a cada uno de los nodos de las mallas utilizadas. Además, utiliza la siguiente información en los contornos y en superficie:

- Campos de viento superficiales (en m/s): los datos de viento de los modelos climáticos se han interpolado a cada nodo de las mallas y a escala horaria para todo el periodo simulado. La resolución temporal original de estos datos es 3-horaria y 6-horaria en el caso de los GCM y RCM, respectivamente.
- Presión a nivel del mar (en milibares): estos datos también se han interpolado a cada nodo de la malla y a escala horaria. Su resolución temporal original es 3-horaria y 6-horaria en el caso de los GCM y RCM, respectivamente.

### 5.4. Validación del modelo

La metodología de downscaling dinámico utilizada para las proyecciones climáticas de marea meteorológica se ha validado mediante el uso de medidas in situ procedentes de los mareógrafos de Puertos del Estado descritos en el apartado 2.1.3. En concreto, la validación se ha hecho para el periodo de control 1985-2005, utilizando los resultados de las proyecciones dinámicas a partir de las variables atmosféricas del reanálisis de ERA-5. Las Figuras 14-16, muestran la comparación de estos resultados con los datos medidos por los mareógrafos de Bilbao, Valencia y Gran Canaria, respectivamente. El comportamiento temporal de la variable de marea meteorológica coincide entre ambas bases de datos, aunque la magnitud difiere ligeramente.

Se han obtenido coeficientes de correlación de 0.71, 0.61 y 0.62, para cada uno de los tres casos, mientras que el bias (sesgo) entre ambas fuentes de datos es inferior a 5.5 cm en todos los casos. Las diferencias observadas pueden ser debidas a que los mareógrafos se encuentran situados a pie de dique, mientras que los resultados de las proyecciones no llegan tan cerca de costa.

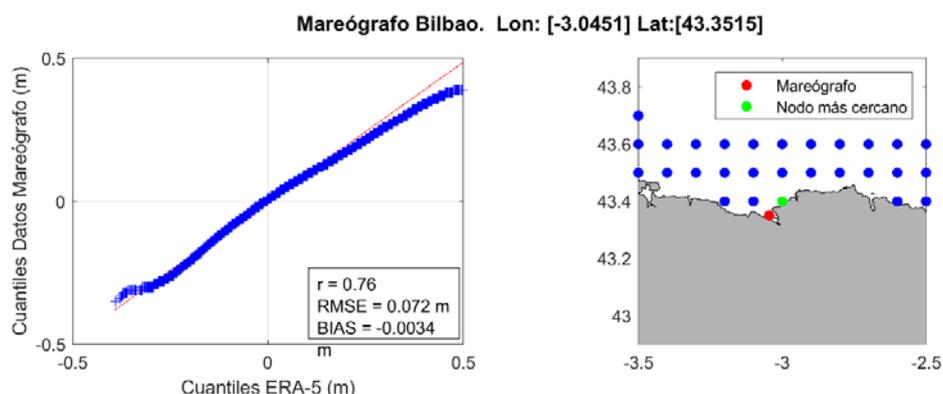


Figura 14. Validación del downscaling dinámico de marea meteorológica. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los del mareógrafo REDMAR de Bilbao de Puertos del Estado.

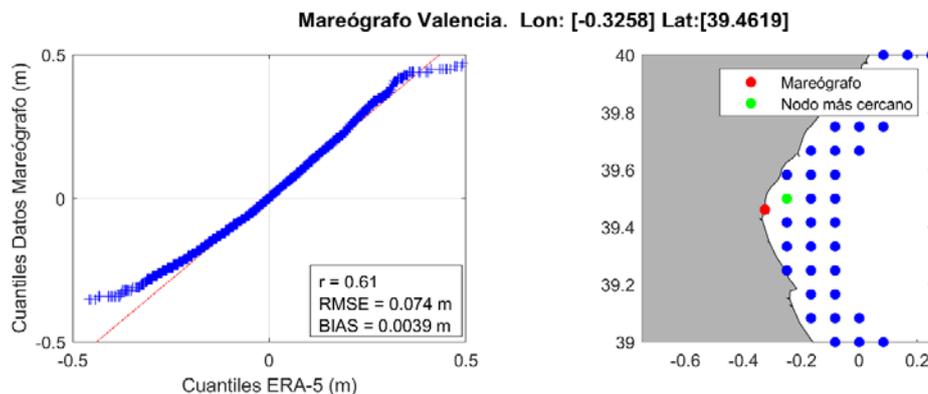


Figura 15. Validación del downscaling dinámico de marea meteorológica. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los del mareógrafo REDMAR de Valencia de Puertos del Estado.

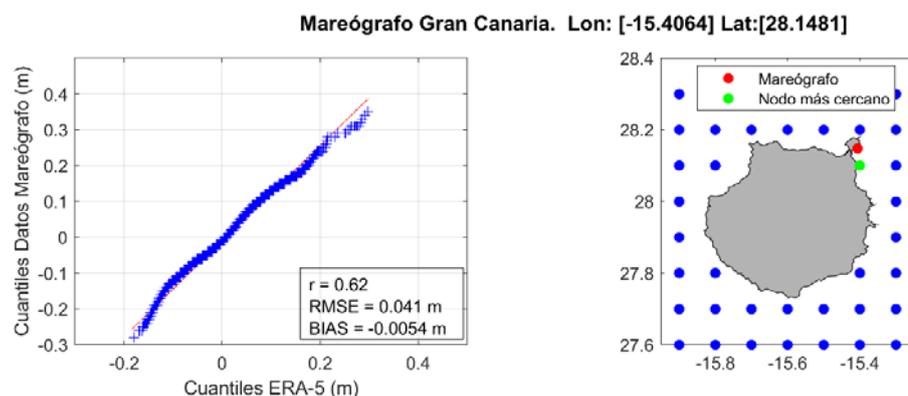


Figura 16. Validación del downscaling dinámico de marea meteorológica. Comparación de los resultados a partir de ERA-5 con los del mareógrafo REDMAR de Gran Canaria de Puertos del Estado.

## 5.5. Productos generados

Como salidas del modelo se han obtenido datos horarios de marea meteorológica a una resolución espacial inferior a 10 km. Estos datos utilizan como nivel de referencia el nivel del mar a una presión atmosférica (SLP) de 1013 mb.

A partir de estos resultados, se han generado los mismos tipos de productos descritos en el caso del oleaje (apartado 4.5), ya que ambas variables se entregan en el mismo fichero. De esta manera, se han generado (1) series temporales de los distintos modelos y escenarios en puntos discretos a lo largo de toda la costa española y, además, en ellos se han calculado los cambios en diferentes indicadores climáticos; (2) mapas con los cambios en los principales indicadores climáticos.

### 5.5.1. Puntos costeros

En cada uno de los 1196 puntos descritos anteriormente, se han extraído las series temporales horarias de marea meteorológica (mm). Esta variable no está disponible para

los modelos climáticos GFDL-ESM2G y MPI-ESM-LR por lo que, en estos casos, sólo se aporta información sobre las otras cuatro variables de oleaje.

A partir de las series temporales horarias corregidas se han calculado los cambios a corto y largo plazo en los percentiles de marea meteorológica. En concreto, se han determinado los cambios mensuales, anuales y en todo el periodo de 20 años (es decir, 2026-2045 o 2081-2100).

### **5.5.2. Mapas de cambios**

Para tener una idea global de los cambios en la marea meteorológica a lo largo del S.XXI en la costa española, se han generado los mapas descritos anteriormente que, tal y como se mencionó, abarcan desde la longitud  $-20^{\circ}$  a  $9^{\circ}$  y latitud  $25^{\circ}$  a  $46.75^{\circ}$ . Estos mapas se han generado a partir de los datos de marea meteorológica de la malla Atlántico-Mediterráneo (para la región del atlántico) y de la malla mediterránea del ROMS, interpolados a los nodos de la malla de WW3. En cada nodo, se ha corregido el sesgo de cada modelo y escenario climático utilizando la base de datos de referencia ERA-5. Por último, para cada modelo y escenario se han calculado los cambios (en periodos de 20 años) en el percentil 99 de la marea meteorológica, utilizando para ello el periodo de control. Estos cambios se han determinado para cada modelo y escenario por separado y, por último, se ha calculado el *mean ensemble* e incertidumbre de todos ellos.

## 6. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE NIVEL MEDIO DEL MAR

### 6.1. Origen de los datos

Las proyecciones de Nivel Medio del Mar (NMM) proporcionan las variaciones (incrementos) estimadas del NMM ante una serie de escenarios futuros de emisión de gases invernadero. En este apartado se describe la base de datos sobre proyecciones climáticas del NMM regional utilizada en el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), denominado AR5, para los escenarios climáticos denominados RCP4.5 y RCP8.5 (Trayectorias de Concentración Representativas: RCP).

El cambio en el nivel medio del mar es la consecuencia de una serie de procesos físicos que ocurren en el océano, pero también sobre la atmósfera, tierra, hielo y ciclo hidrológico. Por otro lado, es importante destacar que los cambios en estos procesos sobre una determinada zona pueden derivar en cambios en zonas remotas (por ejemplo, cambios en la temperatura del agua de mar en océano abierto puede dar lugar a cambios locales en un tramo costero). Los procesos que dan lugar a cambios en el NMM son de diferente índole. Los más relevantes a considerar son:

- cambios en las corrientes marinas y su densidad (a su vez, en la temperatura y salinidad de las masas de agua),
- anomalías en la presión atmosférica,
- intercambio de las masas hielo y agua entre la tierra y el océano,
- cambios en el aporte de agua dulce al océano (causando cambios en la temperatura y salinidad de las masas de agua),
- cambios en el campo de la gravedad y movimientos verticales del suelo oceánico asociado con la deformación visco-elástica,
- procesos antropogénicos que influyen en la cantidad de agua almacenada (subterránea, en lagos u otros reservorios), alterando el ciclo hidrológico.

Los procesos más relevantes para estimar cambios en el NMM son (i) la captación de calor y expansión térmica del océano, (ii) la contribución de los glaciares y (iii) las dinámicas de las masas de hielo asociadas a Groenlandia y Antártida. Las proyecciones del NMM ante escenarios climáticos que se presentan en este trabajo se han obtenido a partir de los resultados recogidas por el CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project). En concreto, se trata de simulaciones climáticas utilizando 21 modelos AOGCM (modelos de circulación acoplada atmósfera-océano) asociados con modelos sobre las capas de hielo terrestre. Dichos modelos se han descrito en la Tabla 3 del apartado 2.2.

Es importante mencionar que los cambios regionales pueden diferir sustancialmente de las estimaciones globales de incremento del NMM. Este hecho se debe a la complejidad de los patrones espaciales del sistema climático, que resultan de procesos dinámicos oceánicos, movimientos del fondo oceánico y cambios gravitacionales debidos a la redistribución de masas de agua. La distribución regional particular de cambios en el NMM se asocia con procesos naturales y antropogénicos e incluyen cambios en las masas de agua debidos a cambios en los vientos, presión atmosférica, flujos de calor atmósfera-océano, aportes de agua dulce y corrientes marinas.

Para cada modelo climático, se dispone de valores anuales de incremento del nivel medio del mar desde 2007 al 2100 (94 años), con una resolución espacial de 1.0°. Estos

incrementos están referenciados respecto al valor medio de NMM en el periodo de referencia 1986-2005.

## 6.2. Productos generados

Para generar los productos de las proyecciones climáticas de nivel medio del mar se ha calculado el *mean ensemble* multimodelo del incremento de esta variable respecto al valor medio en el periodo 1986-2005, así como la incertidumbre asociada (desviación típica y los límites (5%, 95%) del intervalo de confianza del 90%). A partir de esto, los resultados se entregan en las dos formas descritas en el apartado 4.5, es decir, en los puntos costeros y en los mapas. En los 1196 puntos costeros, se entregan las series temporales anuales (que abarcan 94 años, desde el 2007 al 2100) del ensemble multimodelo. Además, tanto en estos puntos como en los mapas, se han calculado los cambios para los periodos de 20 años 2026-2045 y 2081-2100, para ambos escenarios climáticos. En este caso, los mapas tienen una resolución de 1.0°x1.0°.

## 7. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

### 7.1. Configuración del modelo de downscaling estadístico

En este apartado se describe la metodología de downscaling estadístico propuesta para la generación de proyecciones de SST de alta resolución a largo de la costa española basada en el análisis de correlación canónica. En primer lugar, se describe la técnica de correlación canónica; posteriormente se particulariza este método para la regionalización de SST y finalmente, se expone el proceso para la proyección en el futuro de SST a lo largo de la costa.

#### 7.1.1. Análisis de Correlación Canónica

La correlación canónica (Canonical Correlation Analysis, CCA) fue desarrollada por Hotelling (1936) y una de las primeras aplicaciones en meteorología consistía en la relacionar patrones de anomalías de temperatura media estacional de la superficie del mar sobre el Pacífico con anomalías de la temperatura del aire en superficie sobre EEUU (Barnett y Preisendorfer, 1987).

Esta técnica detecta pares de patrones dentro de dos conjuntos de datos multidimensionales (multivariados) mediante la obtención de sendos espacios de proyección de forma que las variables proyectadas en estos vectores presenten máxima correlación. Esta técnica puede parecer similar al análisis de componentes principales o funciones empíricas ortogonales, pero en este caso la proyección sobre los vectores canónicos maximiza la correlación entre dos muestras de datos, mientras que la proyección sobre los EOFs (funciones empíricas ortogonales) maximiza la varianza de un único conjunto de datos.

Por tanto, se dispone de dos muestras simultáneas de tamaño N:

$$x_k = (x_{k1}, \dots, x_{kn})^T, \quad y_k = (y_{k1}, \dots, y_{km})^T; \quad k = 1, \dots, N \quad (3)$$

ó

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{N1} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{1n} & \dots & x_{Nn} \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{N1} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{1m} & \dots & y_{Nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Se trata de hallar dos subespacios proyectores ( $\{f_1, \dots, f_d\}$  y  $\{g_1, \dots, g_d\}$ , respectivamente, con  $d \leq \min\{n, m\}$ ) para los dos espacios de datos:

$$\bar{x}_k = F^T x_k = \begin{pmatrix} f_{11} & \dots & f_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{d1} & \dots & f_{dn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{k1} \\ \vdots \\ x_{kn} \end{pmatrix}, \quad \bar{y}_k = G^T y_k = \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & g_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{d1} & \dots & g_{dm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{k1} \\ \vdots \\ y_{km} \end{pmatrix} \quad (5)$$

de forma que las proyecciones  $\bar{x}_{ki}$  y  $\bar{y}_{kj}$  tengan correlación máxima para cada pareja  $i=j$  de vectores y estén incorrelacionadas para  $i \neq j$ . El cálculo de estos vectores se realiza a partir de la matriz de varianza-covarianza de los datos. En este caso los autovalores son

los cuadrados de las correlaciones canónicas. Las columnas de la matriz  $F^T$  y  $G^T$  son los vectores correspondientes a cada espacio de proyección que definen los patrones canónicos. En este texto se opta por la nomenclatura  $CCP_{X_i}$  y  $CCP_{Y_i}$  para referirnos a los patrones correspondientes a cada variable; es decir,  $CCP_{X_i} = \{f_{i1}, \dots, f_{id}\}$  y  $CCP_{Y_i} = \{g_{i1}, \dots, g_{id}\}$ . Las proyecciones de las variables originales sobre estos patrones son los coeficientes temporales canónicos que se denominan  $CCC_{X_i}(t)$  y  $CCC_{Y_i}(t)$ , respectivamente. Si se compara esta técnica con el análisis de componentes principales (*Principal Component Analysis*, PCA), se puede establecer un paralelismo en la nomenclatura, de tal manera, que CCP sería similar a EOF (*empirical orthogonal functions*) y CCC a PC (principal components, componentes principales).

El análisis de la correlación canónica permite expresar las muestras  $X$  e  $Y$  como una combinación lineal de los patrones canónicos y de los coeficientes canónicos, siendo  $d$  en este caso el número de pares de patrones canónicos considerados en el modelo.

$$X \approx \sum_{i=1}^d CCP_{X_i}(s) \cdot CCC_{X_i}(t) \quad (6)$$

$$Y \approx \sum_{i=1}^d CCP_{Y_i}(s) \cdot CCC_{Y_i}(t) \quad (7)$$

Esta técnica puede ser empleada como método de downscaling estadístico debido a las correlaciones existentes entre las componentes temporales de datos proyectados sobre los vectores canónicos. Una vez obtenidos los vectores canónicos en cada espacio de proyección, dada una nueva predicción  $x_k$ , se proyecta sobre el espacio de vectores canónicos del predictor  $\bar{x}_k$ . Las componentes temporales de cada variable del espacio de predictores están correlacionadas con las componentes de las proyecciones del predictando. De esta manera se obtiene el valor estimado de  $\bar{y}_k$ , y se invierte la proyección para recuperar el vector estimado en el espacio original  $\hat{y}_k$ . La capacidad predictiva de la Correlación Canónica está limitada por la capacidad de los predictores para explicar de forma lineal los predictandos, por este motivo, esta técnica se suele aplicar sobre campos de naturaleza fundamentalmente gaussiana. Los datos mensuales de la temperatura superficial del mar cumplen con este requisito.

### **7.1.2. Modelo de downscaling estadístico para SST**

La correlación canónica se ha aplicado para relacionar los campos de SST a escala mensual a una resolución espacial de  $0.05^\circ$  en la zona costera (predictando del modelo de downscaling estadístico) con los campos de SST mensuales a una resolución espacial de  $1.0^\circ$  en un área más extensa que pueda recoger la variabilidad de esta variable en los GCMs (preditor del modelo de downscaling estadístico).

Las proyecciones estadísticas de la temperatura superficial del mar se han obtenido dividiendo la costa española en cuatro zonas: 1) Cantábrico; 2) Islas Canarias; 3) Estrecho; 4) Mediterráneo.

La primera fase de la metodología consiste en la definición del dominio espacial del predictor (temperatura superficial del mar a 1.0°) y el predictando (temperatura superficial del mar a 0.05°) para cada una de las cuatro zonas establecidas. Posteriormente, se define el modelo de downscaling estadístico que conlleva una serie de pasos que se describen a continuación.

1. Se han considerado las anomalías mensuales del campo de SST a 1.0° en el dominio espacial establecido previamente ( $SST_{1.0^\circ \times 1.0^\circ}(s, t)$ ) como variable X o, predictor. Por otro lado, las anomalías mensuales de SST a resolución 0.05° en la costa ( $SST_{0.05^\circ \times 0.05^\circ}(\hat{s}, t)$ ), que definen la variable Y o predictando. En ambos casos, los campos de SST se han estandarizado (restando la media y dividiendo por la varianza), desestacionalizado (restando la correspondiente media mensual) y se ha eliminado la tendencia histórica.

2. Se aplica un prefiltrado de los datos mediante un análisis de las componentes principales con el objetivo de eliminar información redundante de los campos originales de las anomalías de SST, además de reducir la dimensionalidad de los datos. De esta manera, el cálculo de los patrones canónicos sólo se aplica a variables no correlacionadas (primeras componentes principales) que tienen en cuenta prácticamente la varianza completa de los datos originales. Se calculan los EOFs, tanto para el predictor  $EOF_{SST1.0^\circ, i}$  como para el predictando  $EOF_{SST0.05^\circ, j}$  y se proyectan en las correspondientes nuevas bases de tal manera que quedan representados por las  $d_{SST1.0^\circ}$  primeras PCs del predictor y las  $d_{SST0.05^\circ \times 0.05^\circ}$  primeras PCs del predictando.

$$SST_{1.0^\circ \times 1.0^\circ}(s, t) = \sum_{i=1}^{d_{SST1.0^\circ}} EOF_{SST1.0^\circ, i}(s) \times PC_{SST1.0^\circ, i}(t) \quad (8)$$

$$SST_{0.05^\circ \times 0.05^\circ}(\hat{s}, t) = \sum_{j=1}^{d_{SST0.05^\circ}} EOF_{SST0.05^\circ, j}(\hat{s}) \times PC_{SST0.05^\circ, j}(t) \quad (9)$$

3. A estas PCs de ambos campos de las anomalías de SST se les aplica el análisis de correlación canónica de tal manera que se pueden expresar como una combinación lineal de los  $d_{CCA}$  primeros patrones canónicos 'adjuntos' (adjoint canonical patterns, von Storch y Zwiers, 1999), que son los vectores canónicos en el espacio en el espacio de las EOFs correspondientes a cada campo. Estos patrones adjuntos se han denominado  $\overline{CCP}_{SST1.0^\circ, k}$  y  $\overline{CCP}_{SST0.05^\circ, k}$ , respectivamente. Por otro lado, a los coeficientes canónicos, que presentan máxima correlación, se les ha definido como  $CCC_{SST1.0^\circ, k}$  y  $CCC_{SST0.05^\circ, k}$ .

$$PC_{SST1.0^\circ}(t) = \sum_{k=1}^{d_{CCA}} \overline{CCP}_{SST1.0^\circ, k} (EOF_{SST1.0^\circ}) \times CCC_{SST1.0^\circ, k} (t) \quad (10)$$

$$PC_{SST0.05^\circ}(t) = \sum_{k=1}^{d_{CCA}} \overline{CCP}_{SST0.05^\circ, k} (EOF_{SST0.05^\circ}) \times CCC_{SST0.05^\circ, k} (t) \quad (11)$$

4. Se invierte la proyección de los patrones canónicos adjuntos para obtener los patrones canónicos  $CCP_{SST1.0^\circ}$  y  $CCP_{SST0.05^\circ}$  en el espacio original de los datos. Los campos originales se pueden expresar como una función lineal de estos patrones y los coeficientes canónicos:

$$SST_{SST1.0^\circ}(s, t) = \sum_{k=1}^{d_{CCA}} CCP_{SST1.0^\circ, k}(s) \times CCC_{SST1.0^\circ, k}(t) \quad (12)$$

$$SST_{SST0.05^\circ}(\hat{s}, t) = \sum_{k=1}^{d_{CCA}} CCP_{SST0.05^\circ, k}(\hat{s}) \times CCC_{SST0.05^\circ, k}(t) \quad (13)$$

En la Figura 17 se representa gráficamente los pasos de la metodología planteada: 1) definición de las anomalías de SST a 1.0°x1.0° de resolución (predictor) y a 0.05°x0.05° de resolución (predictando); 2) aplicación de PCA para reducir la dimensionalidad del

predictor y predictando; 3) aplicación de CCA para la obtención de los patrones correlacionados del predictor ( $SST_{1.0^\circ \times 1.0^\circ}$ ) y predictando ( $SST_{0.05^\circ \times 0.05^\circ}$ ).

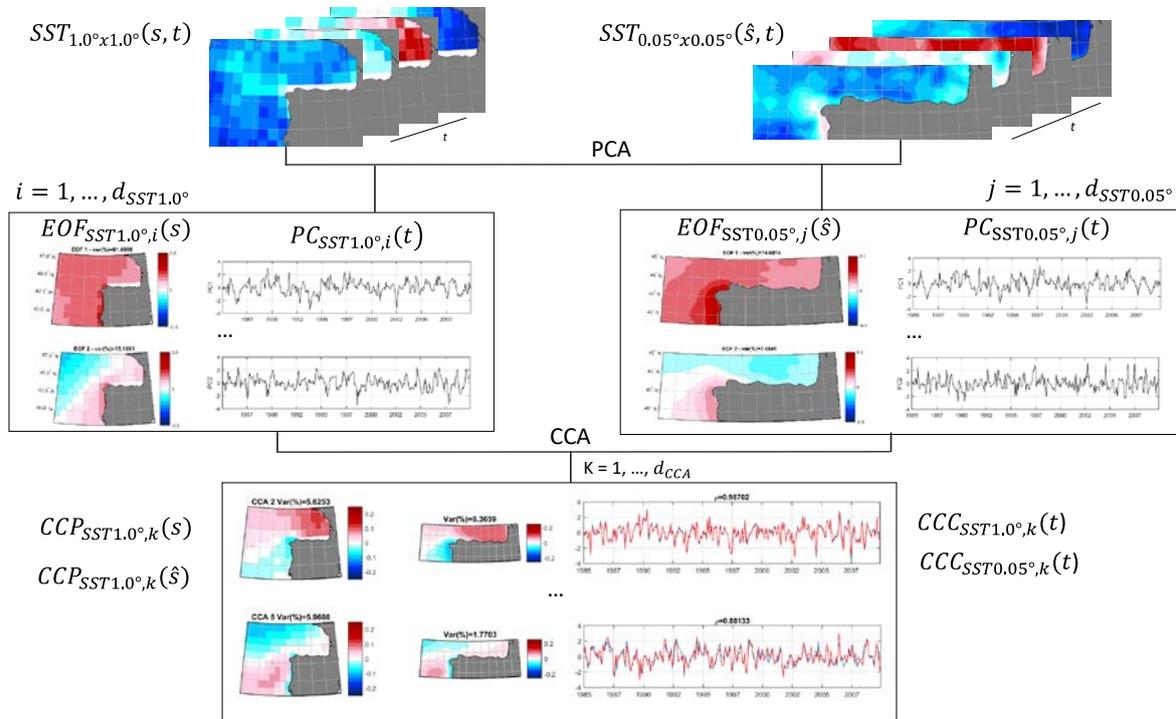


Figura 17. Pasos de la metodología de downscaling estadístico basada en el análisis de correlación canónica para las proyecciones de SST a alta resolución a lo largo de la costa española.

### Definición del predictor y predictando

La costa española se ha dividido en cuatro zonas, en las que se van a llevar a cabo las proyecciones climáticas a una resolución espacial de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ . Estas 4 zonas son: Cantábrico, Estrecho, Canarias y Mediterráneo. En cada una de estas zonas se ha definido el dominio espacial del predictor ( $SST$  a  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ ) y del predictando ( $SST$  a  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ). El dominio del predictando viene condicionado por la configuración de la costa española mientras que el dominio del predictor se define de tal manera que recoja la variabilidad espacial a gran escala que determine los patrones espaciales de menor escala en las áreas próximas a la costa. En la Figura 18 se muestran los dominios para las cuatro zonas en las que se ha dividido la costa española. Los campos de SST representados se corresponden con el valor medio de SST en el periodo histórico 1986-2005 (coincidente con el periodo histórico de las proyecciones).

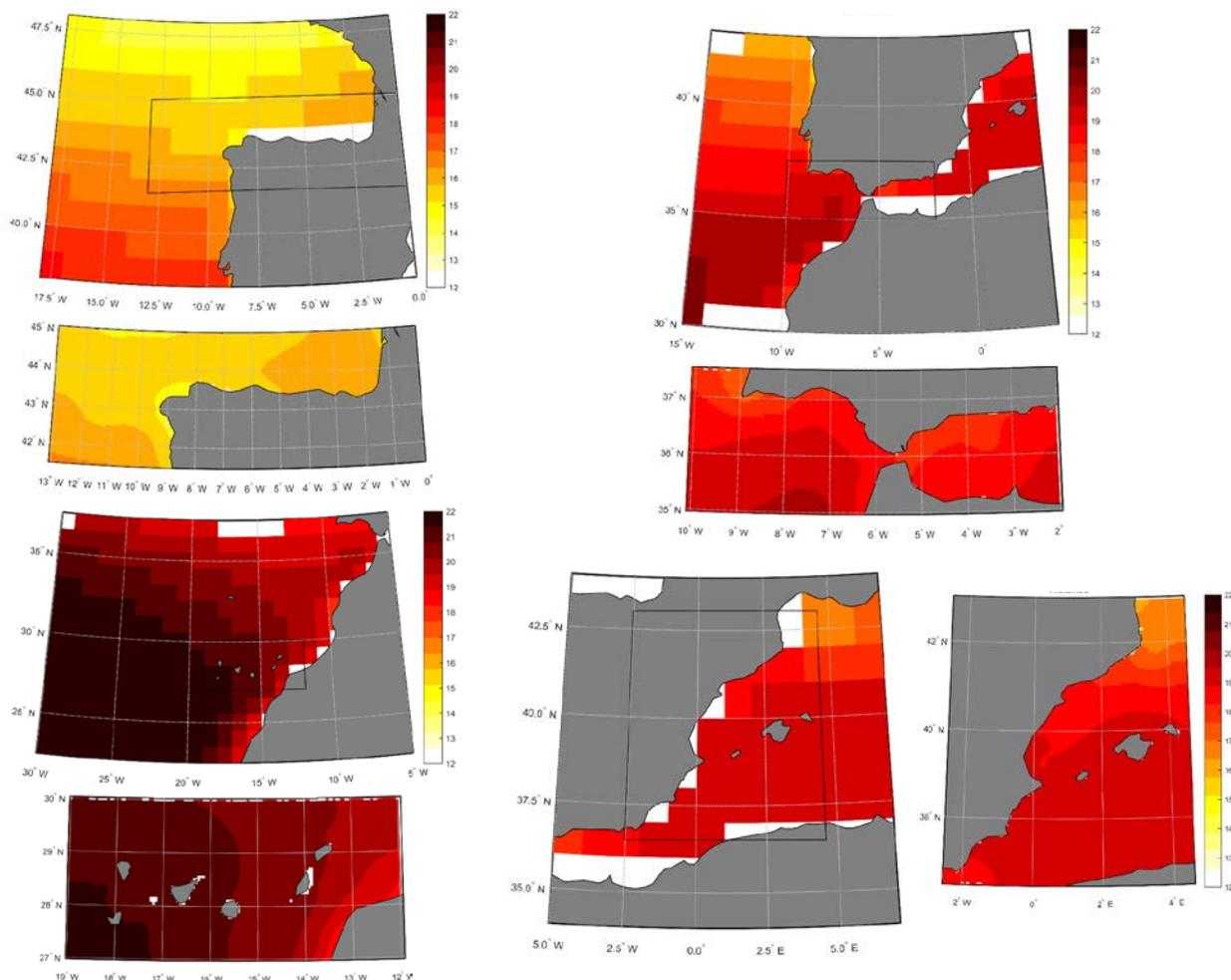


Figura 18. Dominios espaciales del predictor (SST 1.0°x1.0°) y del predictando (SST 0.05°x0.05).

### **Condiciones iniciales y de contorno**

La proyección de SST a alta resolución a lo largo de la costa española mediante el método de downscaling estadístico se ha llevado a cabo a partir de 22 GCMs disponibles públicamente (apartado 2.2). La información de estos GCMs son datos de SST mensuales a resoluciones espaciales que varían desde 0.5° a 1.5°, dependiendo del modelo. Por otro lado, la resolución de SST a lo largo de la costa está condicionada por la disponibilidad de bases de datos históricas de esta variable con un periodo de años significativo (mayor de 30 años) para capturar la variabilidad interanual y proporcionar un ajuste estadístico robusto. Actualmente, la base de datos histórica de mayor resolución y mayor cobertura temporal presenta una resolución espacial de 0.05°. Por tanto, las proyecciones de SST se generarán a lo largo de la costa española a esta resolución para los escenarios de cambio climático considerados (RCP4.5 y RCP8.5) a lo largo de todo el siglo XXI.

## 7.2. Calibración y validación del modelo

El ajuste del modelo de downscaling estadístico requiere en primer lugar la definición del dominio espacial de los campos mensuales de SST a  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  de resolución (predictor) y de los campos mensuales de SST en la costa a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  de resolución (predictando). La calibración del modelo es necesaria para la determinación del número óptimo de patrones canónicos del ajuste del modelo de regresión mediante el análisis de correlación canónica. La validación del modelo en un periodo de tiempo distinto al utilizado en el ajuste del modelo permite cuantificar la capacidad predictiva del modelo.

Los datos históricos mensuales del predictor (SST  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ ) y del predictando (SST  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ) se han dividido en un periodo de calibración 1985-2009 y un periodo de validación 2010-2017. Los datos en el periodo de calibración se han normalizado, desestacionalizado y eliminado la tendencia. Se ha aplicado el análisis de componentes principales para reducir la dimensionalidad de los datos. El análisis de correlación canónica se ha aplicado sobre las componentes principales que explican el 95% de la varianza de los datos originales, tanto para el predictor como el predictando.

En la Figura 19 se muestran a modo de ejemplo los 7 patrones espaciales (CCP) del predictor y predictando y los correspondientes coeficientes temporales (CCC) obtenidos mediante correlación canónica. El número de patrones canónicos está condicionado por la menor dimensión del predictor (12 PCs que explican el 95% de la varianza) o predictando (7 PCs que explican el 95% de la varianza). Se puede observar como la estructura espacial de los patrones del predictor y predictando son similares pero como el predictando presenta una estructura espacial más definida. Al ser el predictor y el predictando la misma variable la correlación de los cuatro primeros patrones es muy elevada (0.998, 0.987, 0.978, 0.931), disminuyendo de forma gradual (0.881 el quinto patrón, 0.720 el sexto patrón y 0.539 el séptimo patrón).

Los datos del predictor en el periodo de validación (normalizados, desestacionalizados y sin tendencia) se han proyectados sobre los EOFs obtenidos con los datos históricos en el periodo de calibración para posteriormente aplicar el modelo estadístico definido a partir de la correlación canónica. Las anomalías de SST a alta resolución en la costa reconstruidas a partir del modelo de downscaling estadístico se han comparado con las anomalías de los campos históricos de SST (datos GHRSTT) en el periodo de validación 2010-2017. En la Figura 20 se muestran los resultados de la validación para cada una de las zonas en las que se ha dividido la costa española. Teniendo en cuenta los valores de la varianza explicada (%) y el coeficiente de correlación en función del número de patrones canónicos, el número óptimo se ha establecido en 6, 6, 5 y 7 en el Cantábrico, Estrecho, Canarias y Mediterráneo, respectivamente.

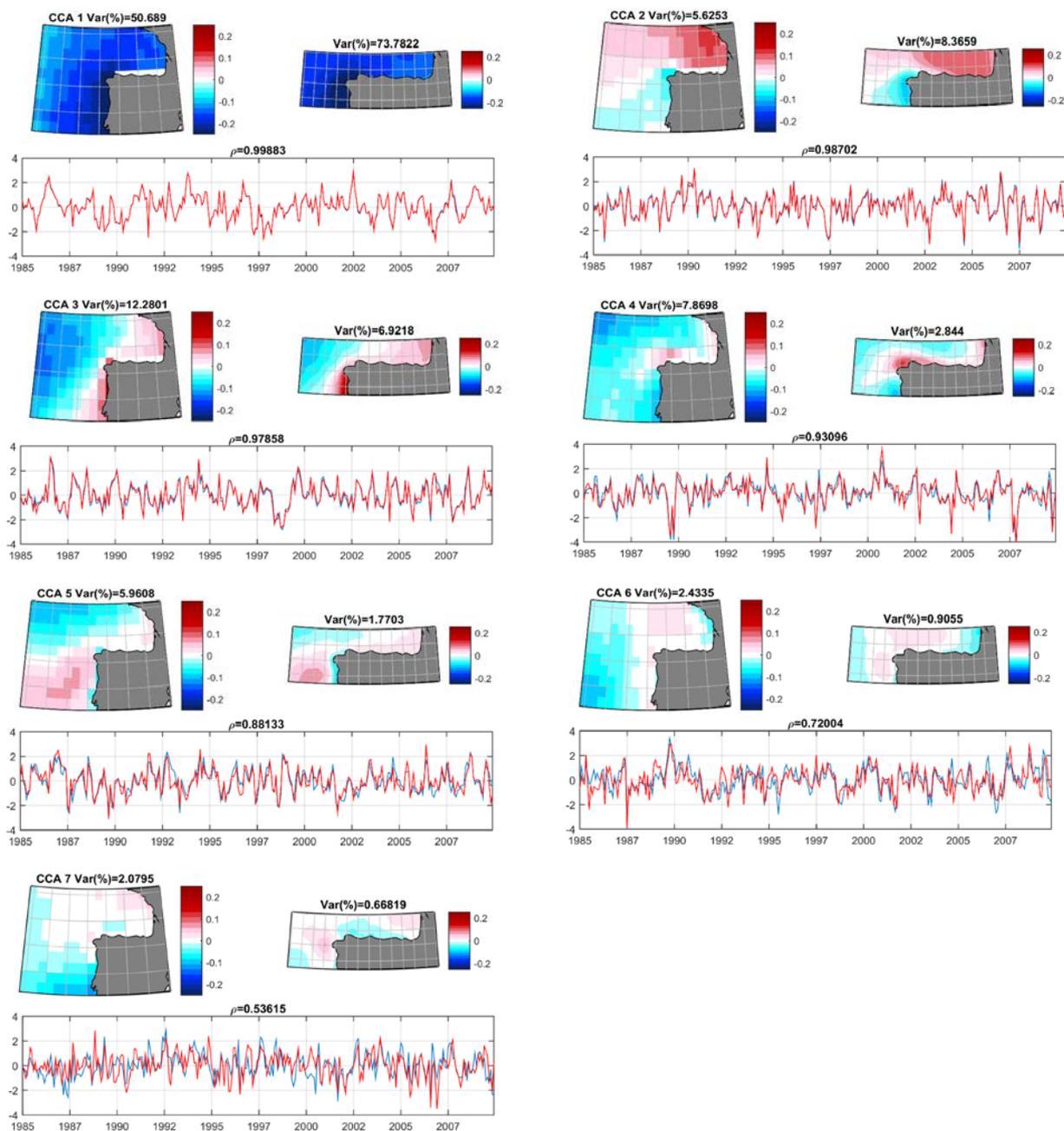


Figura 19. Patrones espaciales y coeficientes temporales del análisis de correlación canónica en la zona del Cantábrico.

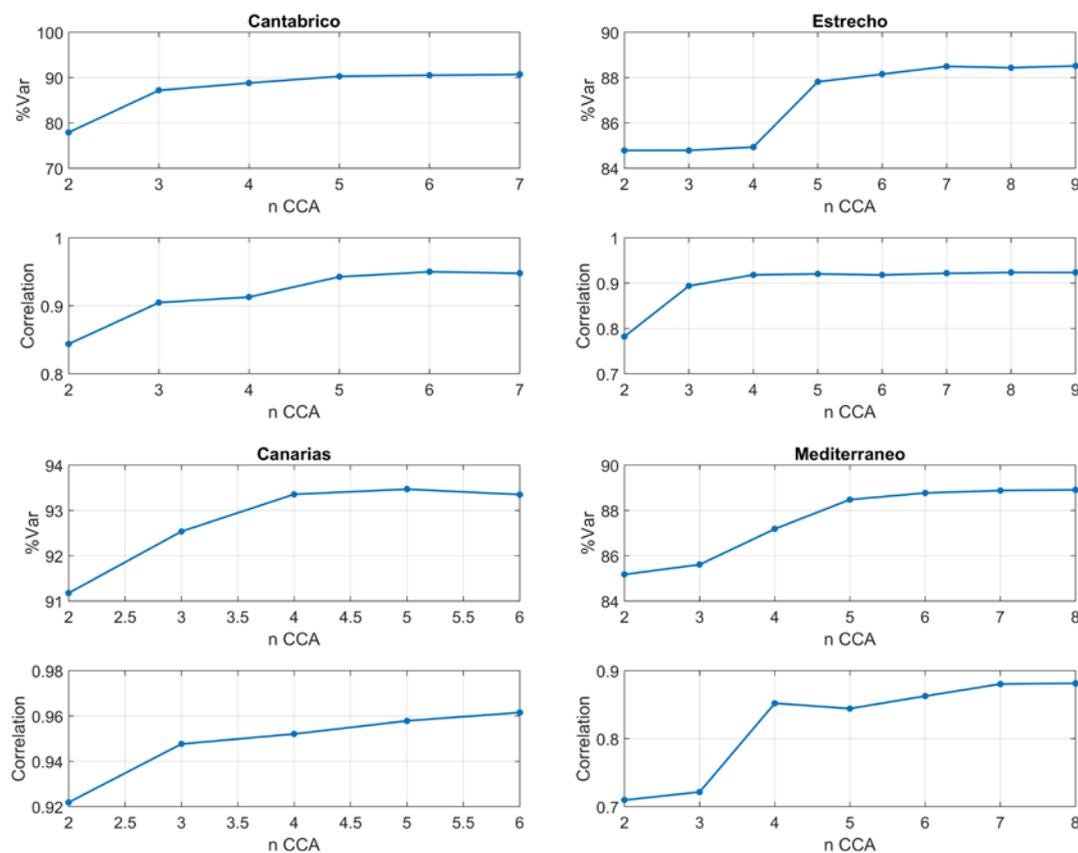


Figura 20. Validación del modelo de downscaling estadístico en las cuatro zonas consideradas: Cantábrico, Canarias, Estrecho y Mediterráneo.

### 7.3. Productos generados

Las proyecciones de SST se han generado para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo continuo 2006-2100 para el conjunto de 21/22 GCMs disponibles. El sesgo climático de cada GCM ha sido corregido en el proceso de downscaling estadístico ya que se proyectan las anomalías de SST, que se obtienen sustrayendo la media y dividiendo por la desviación típica, y eliminando la estacionalidad del correspondiente GCM en el periodo histórico.

Se proporcionan las medias mensuales de SST en el periodo histórico (1985-2005) y a lo largo de todo el siglo XXI (2016-2100) en cada uno de los nodos de las cuatro zonas en las que se ha dividido la costa española (Cantábrico, Estrecho, Canarias y Mediterráneo) a una resolución espacial de  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  para cada uno de los GCMs proyectados.

También se suministra el valor medio del ensamble y la cuantificación de la incertidumbre mediante la desviación típica y el intervalo de confianza del 90% de los cambios de SST para los periodos de tiempo 2026-2045 y 2081-2100, respecto al periodo histórico 1986-2005, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Por último, estos cambios de SST se han obtenido en los 1196 puntos distribuidos a lo largo de la costa. El formato en el que se entregan estos datos es NetCDF, siguiendo el formato e indicaciones establecidas por *NetCDF CF (Climate and Forecast) Metadata conventions* (<http://cfconventions.org/>).

## 8. RESULTADOS

En este apartado se describen los resultados más relevantes obtenidos de las proyecciones climáticas de las distintas variables consideradas. Se analizan los cambios estimados en las distintas variables y se comparan con sus valores en clima presente. Para ello, debido a la gran cantidad de información generada, nos vamos a centrar en mostrar y comentar parte de los resultados obtenidos, los referentes a los cambios en los mapas creados.

Los cambios se analizan para los dos periodos y escenarios analizados. Los puntos representados en los mapas de cambios indican que, al menos, el 80% de los modelos climáticos coinciden en el signo del cambio (positivo si aumenta y negativo si disminuye el valor del estadístico respecto al periodo de control (1985-2005 en el caso de oleaje y marea meteorológica y 1986-2005, para el nivel medio del mar y temperatura superficial del mar).

### 8.1. Resultados de las proyecciones regionales del Oleaje

A continuación, se presentan los cambios en las variables altura de ola significativa (valor medio y percentil del 99%), periodo de pico (percentil del 99%) y dirección media del oleaje. Además, y a modo de referencia, se muestran sus valores en clima presente utilizando, para ello, los resultados obtenidos a partir de las variables atmosféricas de la base de datos de ERA-5 (considerada como la base de datos histórica de referencia).

Las Figura 22 y 23 representan el ensamble multimodelo de los cambios en el valor medio y percentil del 99% de la altura de ola significativa, respectivamente. Para facilitar su interpretación, estos cambios se han representado en tanto por cien respecto al valor que presentan en la base de datos histórica de referencia (Figura 21).

Respecto a sus valores en clima presente, la altura de ola significativa media abarca de forma genérica el rango comprendido entre 0.21 m y 2.3 m, mientras que este rango para sus valores extremos (percentil del 99%) oscila entre 0.5 y 6.0 m. Los resultados de las proyecciones a futuro, muestran que el valor de ambos estadísticos tiende a disminuir tanto a corto como a largo plazo, en toda la costa española salvo en el mar de Alborán e islas Canarias. El descenso más acusado se espera en el Golfo de Cádiz para el escenario rcp8.5 y el periodo 2081-2100, donde se estima que tanto el valor medio como el percentil del 99% disminuyan en un 10% respecto a su valor actual (Figuras 22 y 23). Existe concordancia en el signo del cambio de la Hs media en la mayoría de los modelos climáticos, a excepción de las islas Canarias y mar de Alborán. Esta concordancia disminuye cuando se analizan los valores extremos, principalmente a corto plazo.

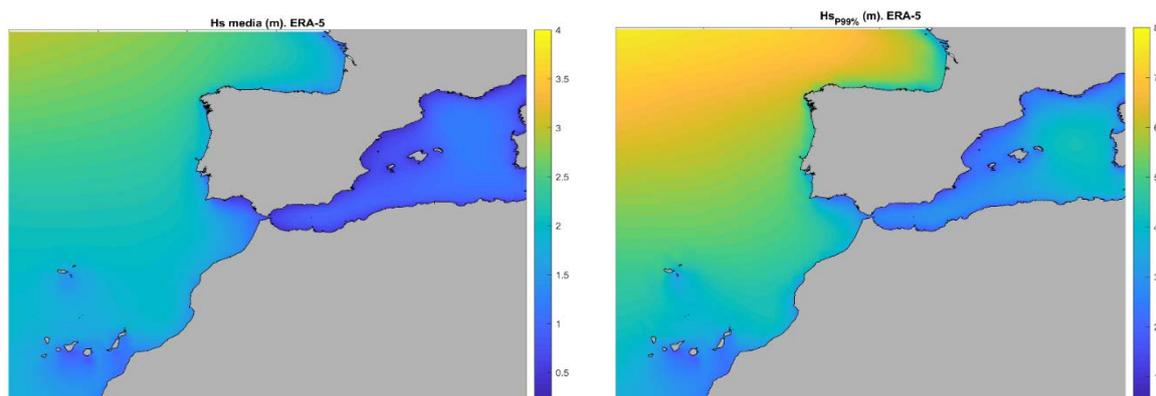


Figura 21. (Izquierda) Valores medio y (Derecha) percentil del 99% de la altura de ola significativa (m) obtenidos a partir de las variables atmosféricas procedentes del reanálisis ERA5 (1985-2005). Las escalas de ambos gráficos son distintas a fin de observar diferencias espaciales en cada una de ellas.

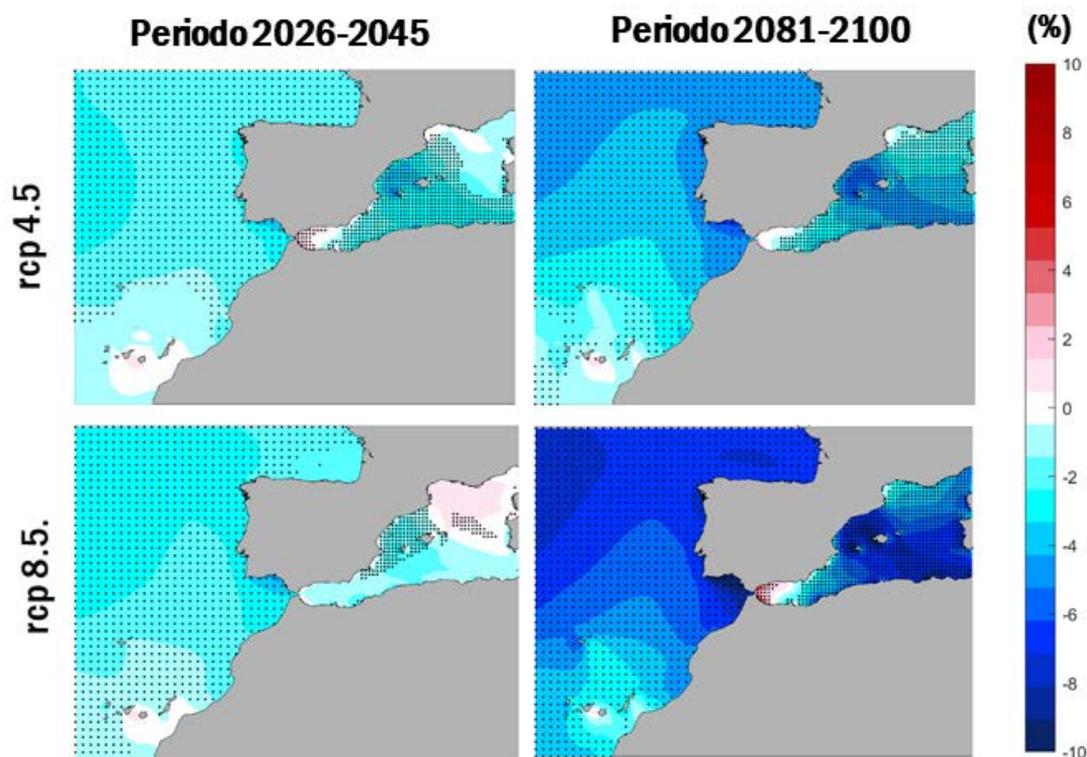


Figura 22. Cambios en el valor medio de la altura de ola significativa (Hs) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios de la base de datos histórica de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80% de los modelos climáticos analizados.

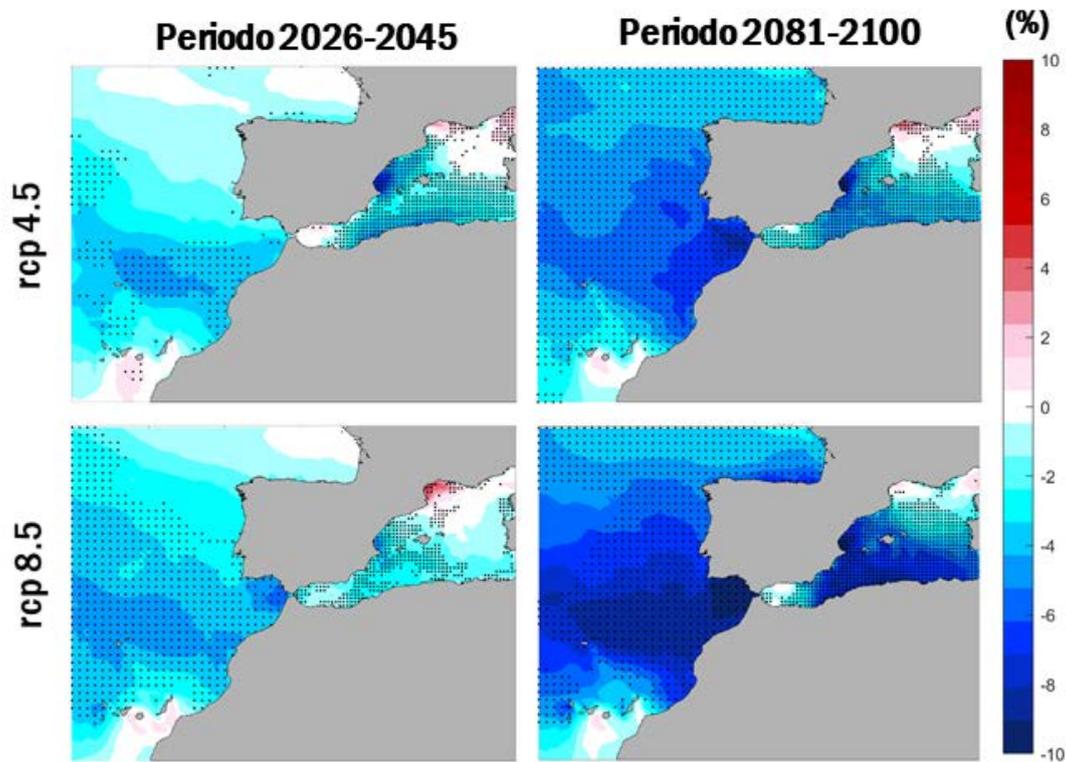


Figura 23. Cambios en el percentil del 99% de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios de la base de datos histórica de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados.

El valor medio del periodo de pico oscila entre los 4-12 s en las costas españolas (Figura 24). Los resultados de las proyecciones estiman un ligero descenso en este valor en toda la costa atlántica (del orden del 1% a corto plazo y hasta un máximo del 4% a finales de siglo). Por otro lado, se observa un ligero aumento en este estadístico en el mar de Alborán y costa mediterránea, principalmente a corto plazo (Figura 25).

Respecto al percentil del 99% del periodo de pico, su valor oscila entre los 8-18 s a lo largo de la costa española (Figura 24). Se espera que este valor disminuya ligeramente (descenso inferior al 4%) en la mayor parte de la costa, a excepción del Golfo de Cádiz, aunque llama la atención que esta disminución en su valor coincida con una menor concordancia entre los distintos modelos. A corto plazo este valor puede aumentar en ciertas zonas de Galicia y mar Cantábrico, tal y como muestran los paneles de la izquierda de la Figura 26.

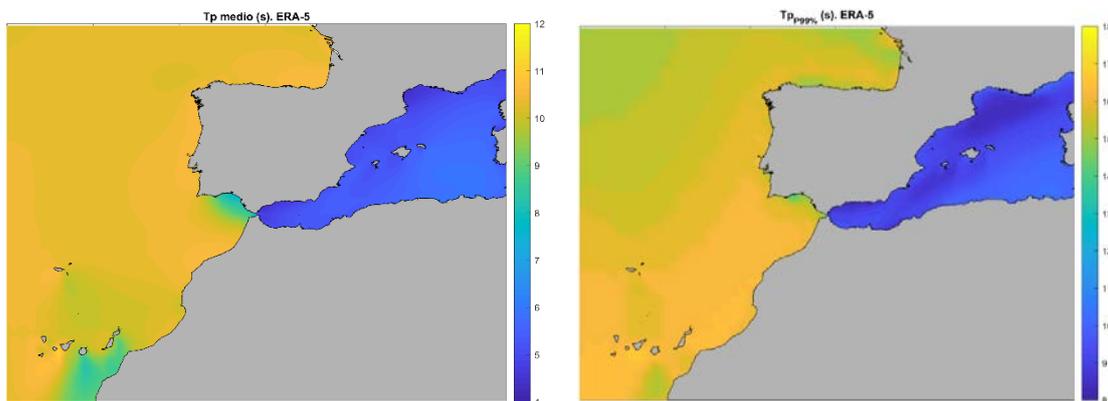


Figura 24. (Izquierda) Valores medio y (Derecha) percentil del 99% periodo de pico (s) obtenidos a partir de las variables atmosféricas procedentes del reanálisis ERA5 (1985-2005). Las escalas de ambos gráficos son distintas a fin de observar diferencias espaciales en cada una de ellas.

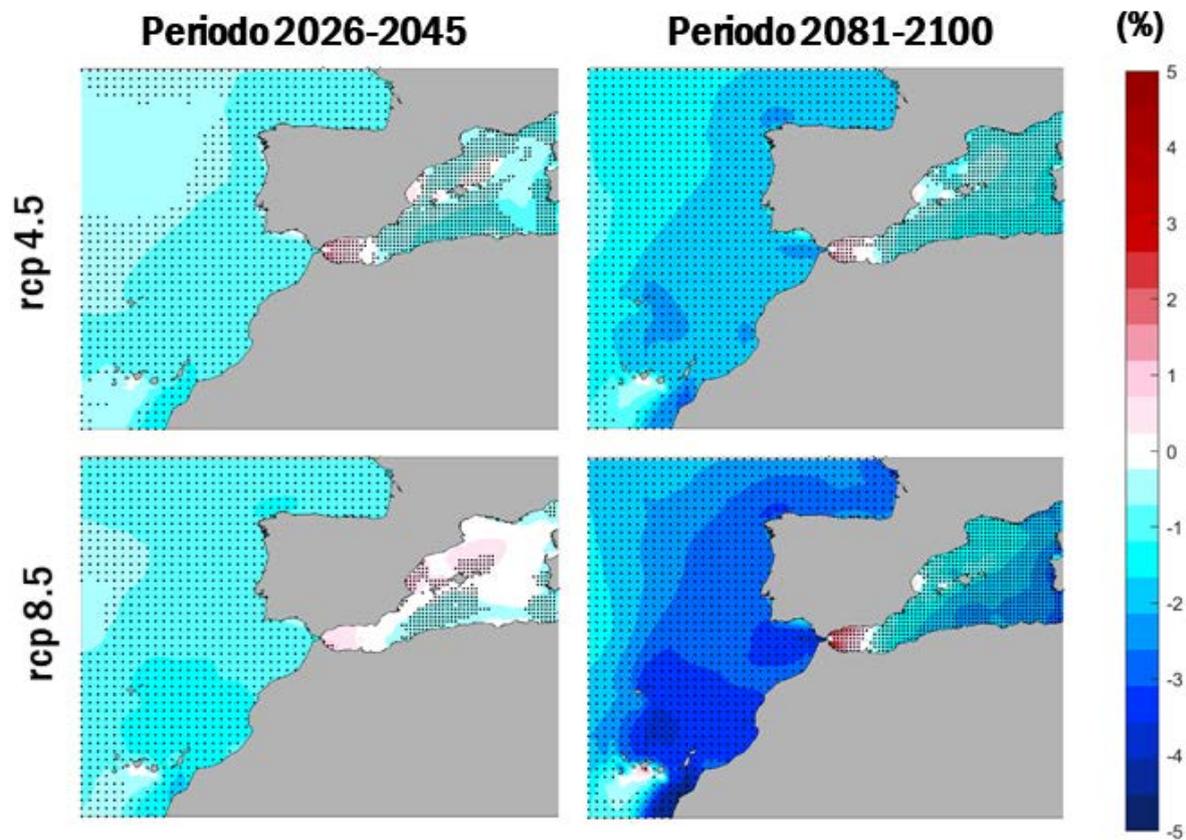


Figura 25. Cambios en el valor medio del periodo de pico ( $T_p$ ) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados.

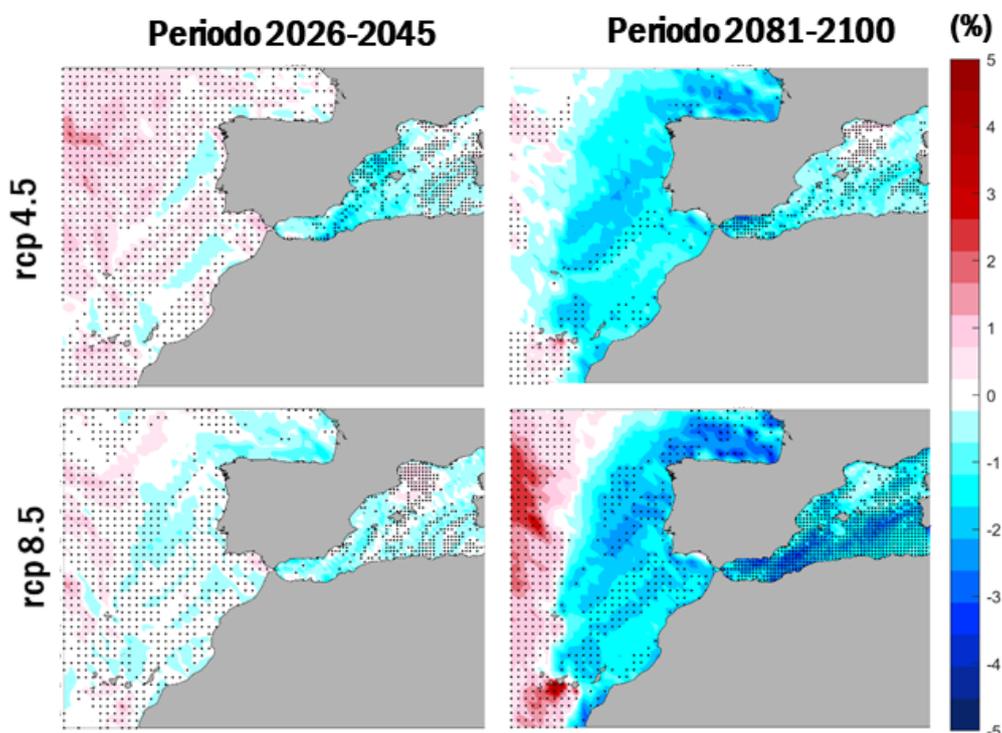


Figura 26. Cambios en el percentil del 99% del periodo de pico ( $T_p$ ) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados.

En relación a la dirección media del oleaje, en las costas cantábricas y gallegas predomina el oleaje del noroeste (NO) y, en el Golfo de Cádiz, del SO. Mientras, en la región norte de las islas Canarias el oleaje tiene, principalmente, componente norte. Por otra parte, en la costa mediterránea predomina la componente este y sureste (Figura 27). Respecto al valor de esta variable a lo largo del S.XXI, no se esperan cambios significativos en esta dirección en las costas cantábricas y Golfo de Cádiz. Sin embargo, en el mediterráneo la dirección media del oleaje tiende a aumentar o disminuir de forma local, aunque siempre estos cambios se esperan que sean inferiores al 10% (Figura 28).

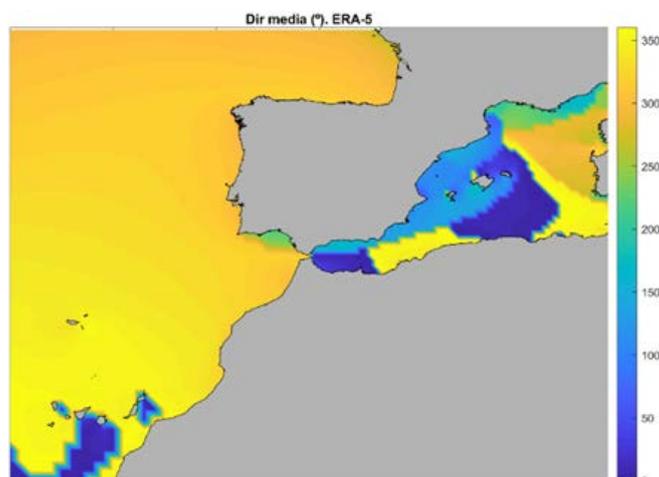


Figura 27. Valor medio de la dirección media del oleaje ( $^{\circ}$ ) del periodo histórico de referencia (periodo 1985-2005).

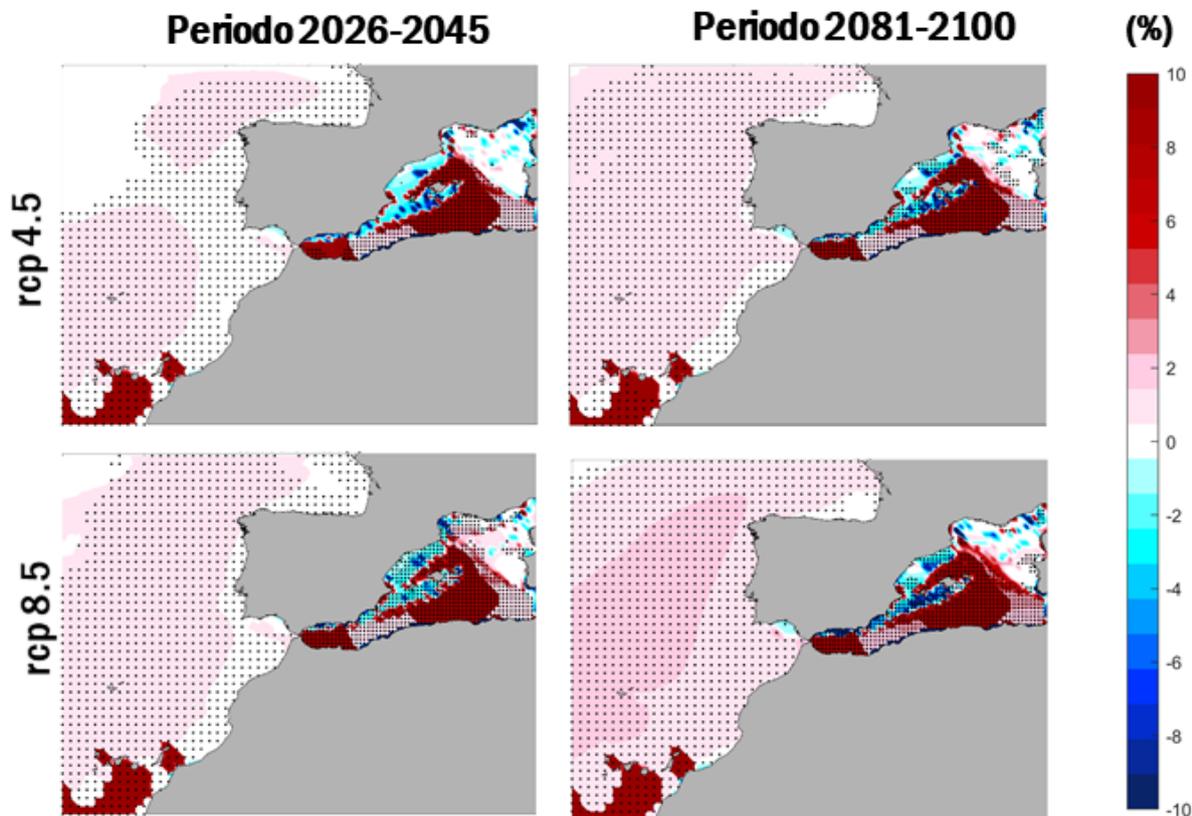


Figura 28. Cambios en la dirección media del oleaje (Dir) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Valores positivos indican cambio en la dirección en sentido horario mientras que los negativos representan cambios en sentido anti-horario. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados.

## 8.2. Resultados de proyecciones dinámicas de marea meteorológica

Para analizar los cambios a lo largo del siglo XXI en la variable de marea meteorológica, se ha examinado el valor del percentil del 99%, ya que el valor medio de esta variable es cero. La Figura 29 muestra el valor de este percentil en el periodo 1985-2005 para la base de datos ERA-5, que se considera característica del clima presente. Se observa que los valores máximos de esta variable se alcanzan en la costa Cantábrica y Galicia (hasta 0.3 m) disminuyendo a 0.15 m en la costa mediterránea. Por otro lado, el efecto de la marea meteorológica en las islas Canarias es prácticamente nulo. Respecto a los cambios que se estiman en el futuro, existe bastante discordancia entre los distintos modelos climáticos, tal y como se deduce por la baja densidad de puntos en los mapas de la Figura 30. No obstante, en general se prevé una disminución en el valor del percentil del 99% de la marea meteorológica en toda la costa española salvo Canarias, donde tiende a aumentar (hasta en un 10%). En el escenario rcp4.5 esta disminución se espera que sea inferior al 5% respecto a su valor actual (valor de ERA-5), a excepción del Golfo de Cádiz, donde se estima que disminuya hasta en un 12%. Un cambio similar se espera a corto plazo (2026-

2045) para el escenario rcp8.5. Sin embargo, a largo plazo, disminuye hasta en un 20% en la costa mediterránea y Golfo de Cádiz.

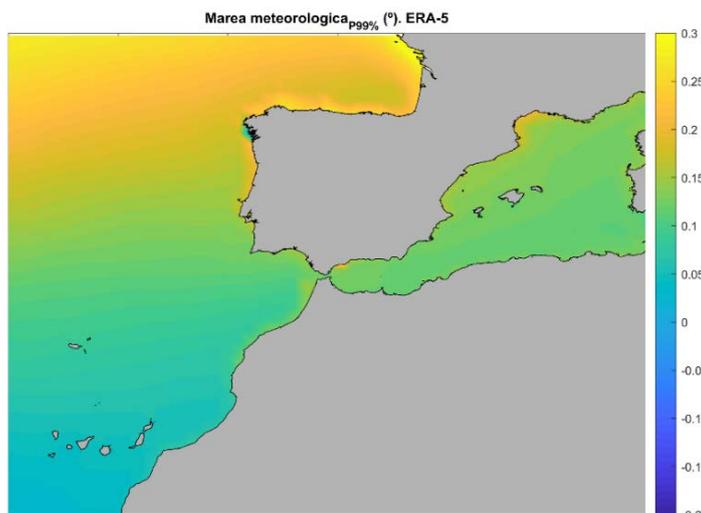


Figura 29. Percentil del 99% de marea meteorológica (m) durante el periodo histórico de referencia (1985-2005)

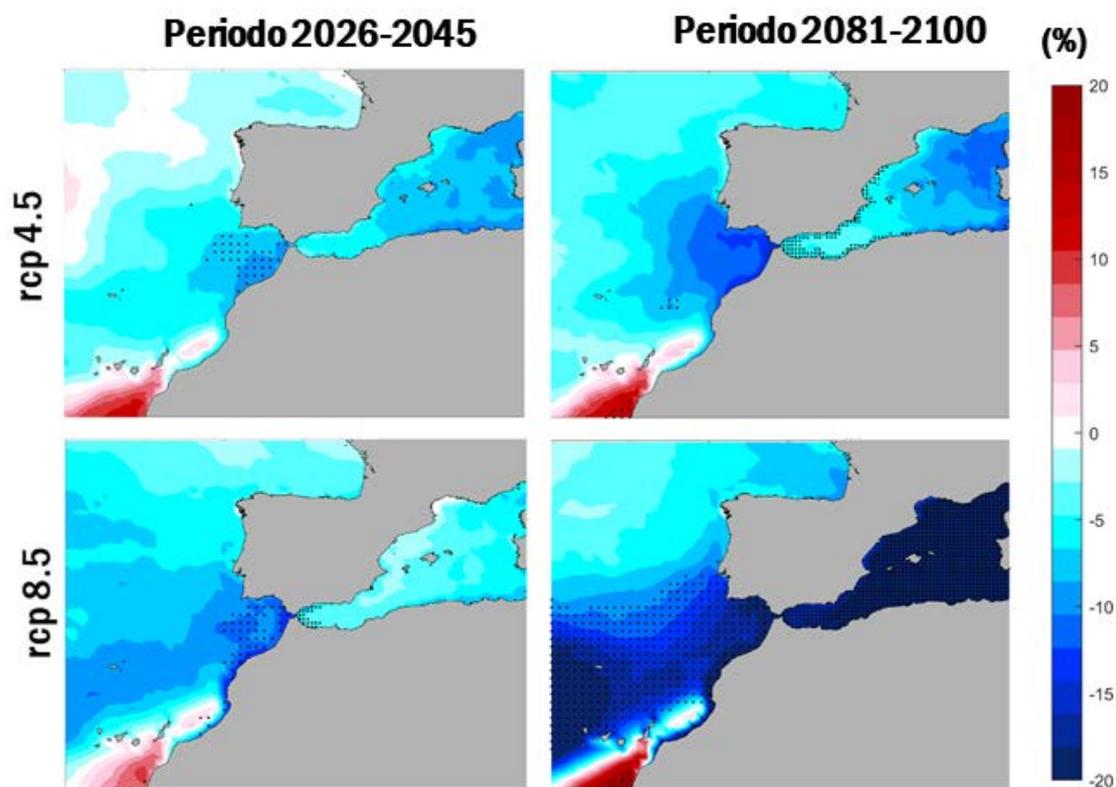


Figura 30. Cambios en el percentil 99% de la marea meteorológica (mm) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se han representado en tanto por cien respecto a los valores medios del periodo histórico de referencia. Los puntos indican una coincidencia en el signo del cambio en, al menos, el 80 % de los modelos climáticos analizados.

### 8.3. Resultados de proyecciones nivel medio del mar

Los resultados de las proyecciones climáticas de nivel medio del mar muestran un aumento a corto plazo (periodo 2026-2045) de entre 0.13-0.17 m ( $\pm 0.03$  m SD) en las costas españolas, para ambos escenarios climáticos. Sin embargo, el aumento estimado a largo plazo (periodo 2081-2100) varía en función del escenario climático. Mientras que para el escenario rcp4.5 se estima un ascenso de entre 0.38-0.5 m ( $\pm 0.1$  m SD), para el escenario rcp8.5, se prevé una subida del nivel medio del mar de entre 0.52-0.68 m ( $\pm 0.15$  m SD), respecto al valor medio en el periodo 1986-2005 (Figura 31). Si nos fijamos en la banda de confianza del 95%, el ascenso del nivel medio del mar a finales de siglo oscila entre 0.71 m y 0.98 m. Si se observa con más detalle, el ascenso es superior en Canarias que en el resto de la Península. En concreto, el máximo ascenso en el nivel medio del mar se espera al oeste de la isla de La Palma, con un valor medio de 0.68 m y un valor del límite superior (95%) del intervalo de confianza del 90% de 0.98 m.

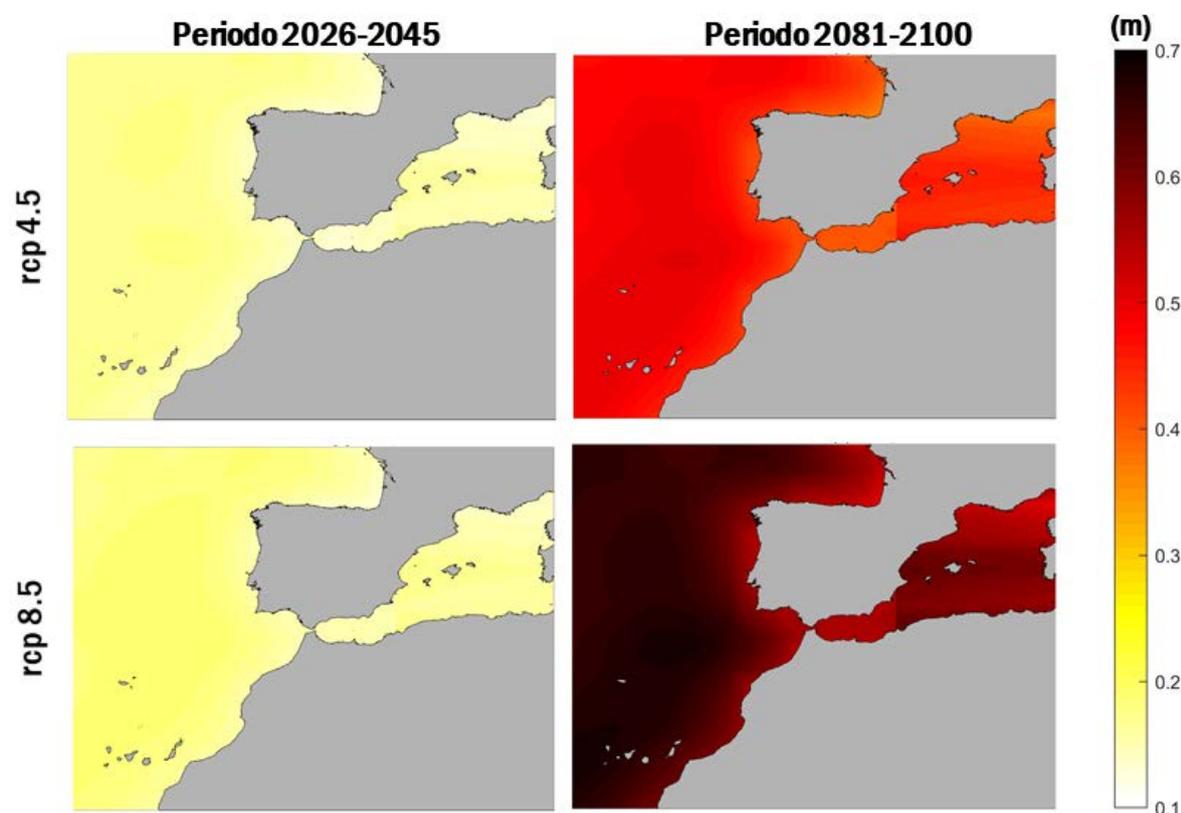


Figura 31. Aumento en el nivel medio del mar (NMM) para los dos escenarios y periodos analizados. Los cambios se expresan respecto al valor medio del nivel del mar en el periodo de control 1986-2005.

### 8.4. Resultados de proyecciones estadísticas de temperatura superficial del mar

Una vez ajustado el modelo de downscaling estadístico utilizando todos los datos históricos disponibles (1985-2017), se proyectan los distintos GCMs disponibles para el periodo histórico (1985-2005) y a lo largo del siglo XXI (2006-2100) para los escenarios de cambio

climático RCP4.5 y RCP8.5. En este apartado se muestra en primer lugar la verificación del desempeño de los GCMs en el periodo histórico y posteriormente, las proyecciones de cambio climático de SST.

#### **8.4.1. Verificación del desempeño de las proyecciones de SST a alta resolución**

Se han calculado las cuatro métricas consideradas para la verificación de la calidad de las proyecciones de SST tanto a los datos brutos proporcionados por el conjunto de GCMs a una resolución espacial de  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor, como a las proyecciones estadísticas obtenidas a lo largo de la costa a una resolución de  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ . Estas métricas se han calculado a escala anual y estacional: invierno (enero-febrero-marzo, EFM), verano (julio-agosto-septiembre, JAS), con lo que al final se dispone de un conjunto de 12 métricas para cada zona en la que se ha dividido la costa española, para cada uno de los GCMs disponibles.

Los valores del ensemble de GCMs para cada métrica se han normalizado, transformado las magnitudes a una escala de 0 a 1 mediante la resta del mínimo y la división entre la diferencia entre el máximo y el mínimo. En el caso de la correlación espacial se ha utilizado el valor  $|1-sc|$ , de tal manera, que cuanto menor correlación, menor desempeño del GCM.

Las Figuras 32-35 muestran los resultados de la verificación para la zona del Cantábrico, el Estrecho, Canarias y Mediterráneo, respectivamente. En líneas generales puede observarse como el modelo de downscaling estadístico fuerza a las proyecciones de los GCMs a representar los patrones históricos anuales y estacionales de SST a alta resolución en la costa y elimina el sesgo climático. La reproductibilidad de interanualidad histórica de SST también mejora considerablemente, aunque es menos significativa en Canarias. El GCM MIR\_ESM no se ha proyectado en el Estrecho y Mediterráneo por la no disponibilidad de datos en todos los nodos de la malla a resolución  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en los dominios del predictor de estas dos zonas.

Respecto a la SST original de los GCMs a una resolución de  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  se puede observar como una serie de modelos presentan los mayores sesgos (Bias) y errores de la desviación (rmsd), que también se refleja en la mayor variabilidad del sesgo (VB). Estos modelos se corresponden con los CM5 (Institut Pierre-Simon Laplace, Francia) y CMC (Centro Euro-Mediterráneo per I Cambiamenti Climatici, Italia), con una resolución más grosera (Tabla 3).

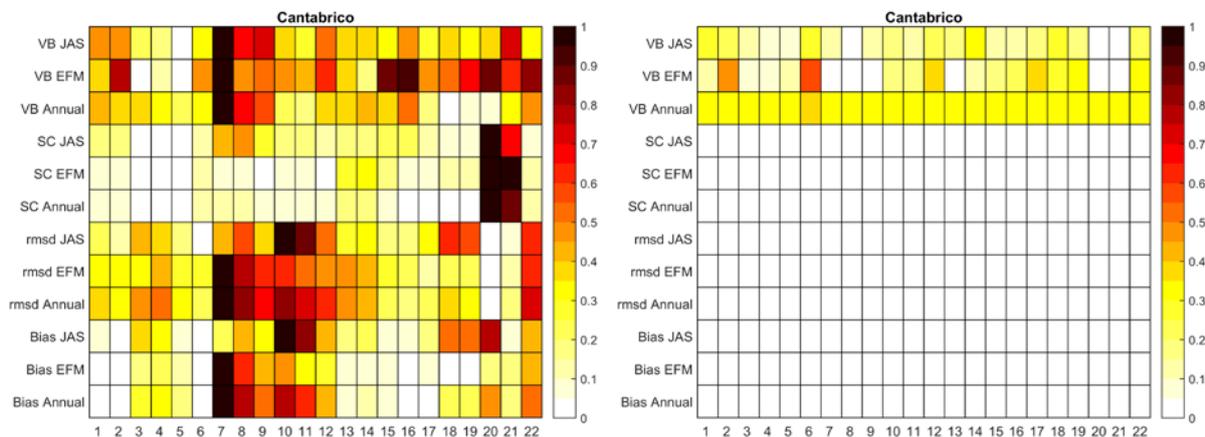


Figura 32. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona del Cantábrico (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC.

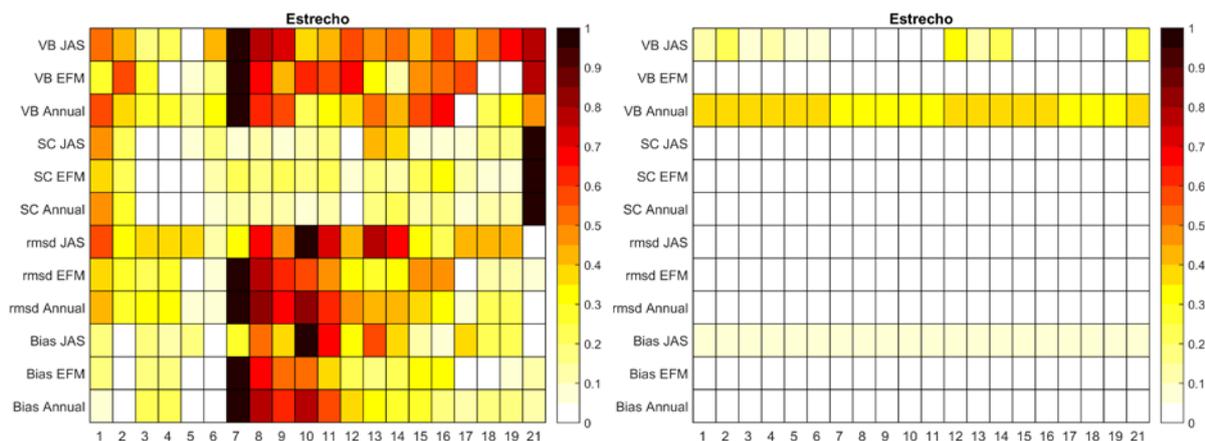


Figura 33. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona del Estrecho (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC.

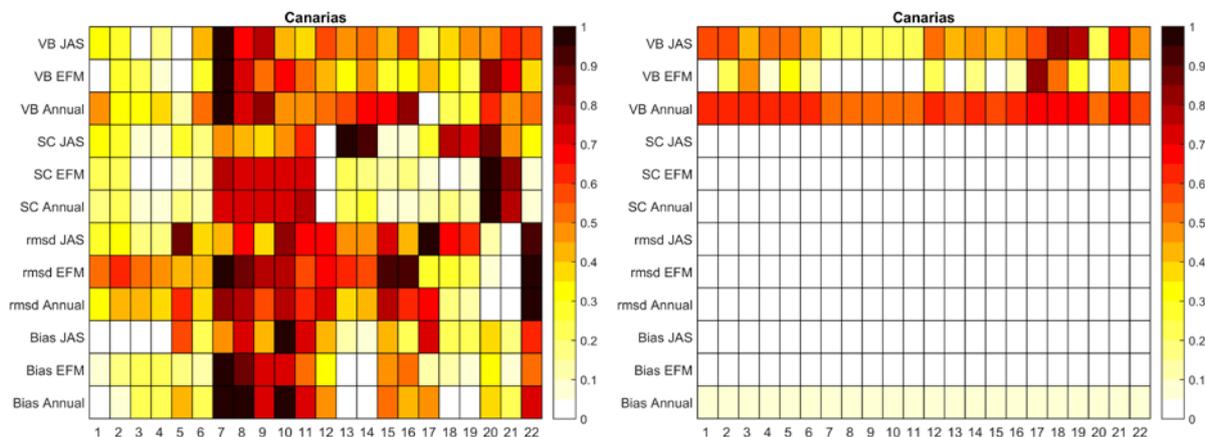


Figura 34. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona de Canarias (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC.

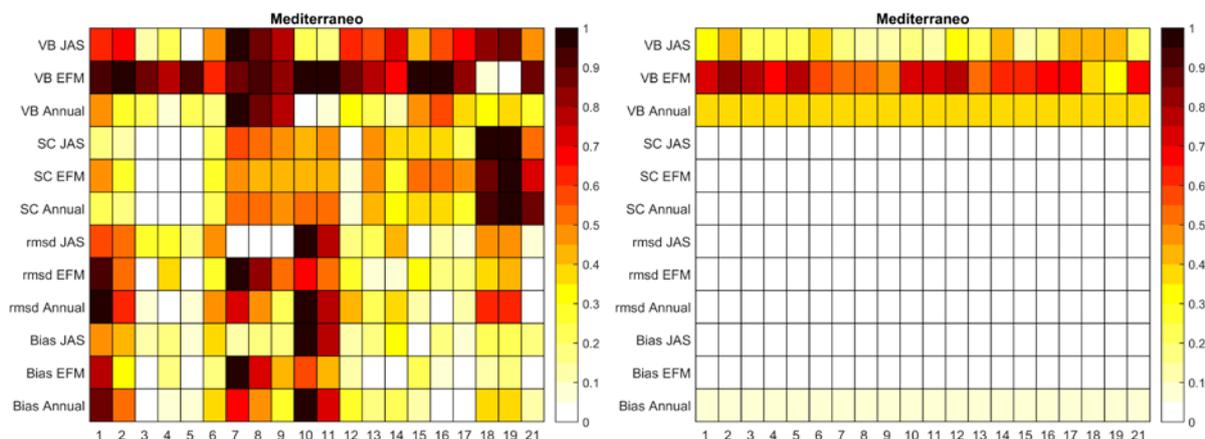


Figura 35. Verificación de las proyecciones de SST en el periodo histórico (1986-2005): a partir de la información original de los GCMs a escala  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  en el dominio del predictor (panel izquierdo) y a partir de las proyecciones estadísticas a  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  en la zona del Mediterráneo (panel derecho). GCMs: 1) BCC; 2) BCC\_M; 3) CCSM; 4) CES\_BGC; 5) CMCES\_CAM; 6) CM3; 7) CM5B; 8) CM5\_LR; 9) CM5\_MR; 10) CMC\_CM; 11) CMC\_CMS; 12) CNR\_CM5; 13) ESM2G; 14) ESM2M; 15) GEM\_CC; 16) GEM\_ES; 17) MIR\_5; 18) MIR\_CHE; 19) MIR\_ESM; 20) MPI\_LR; 21) MPI\_MR; 22) MRI\_CGC.

#### 8.4.2. Proyecciones de SST en la costa española

Se ha calculado el valor medio del ensemble, junto con la significancia (cuando más del 80% de los modelos coinciden en el cambio), y la cuantificación de la incertidumbre mediante la desviación típica y el intervalo de confianza del 90% de los cambios de SST para cuatro periodos de tiempo: 2026-2045 (coincidente con las proyecciones dinámicas del oleaje y marea meteorológica); 2016-2035; 2046-2065; 2081-2100 (establecidos en el quinto informe del IPCC), respecto al periodo histórico 1986-2005, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Como ejemplo, se muestra la SST media en el periodo histórico (1986-2005) y los cambios proyectados en la SST a finales de siglo (2081-2100) respecto al periodo histórico para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para la zona del Cantábrico, Estrecho, Canarias y Mediterráneo en las Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39, respectivamente. Estos cambios se han obtenido a partir de la media del ensemble de GCMs, indicando si el cambio es significativo si más del 80% de los modelos coincide en el cambio de signo. Se puede observar como se espera un aumento de SST en todas las zonas (cambios máximos del orden de  $3.0^{\circ}$ ), siendo más intenso en la zona de las Islas Baleares (cambios máximos de  $4.0^{\circ}$ ), especialmente para el escenario RCP8.5.

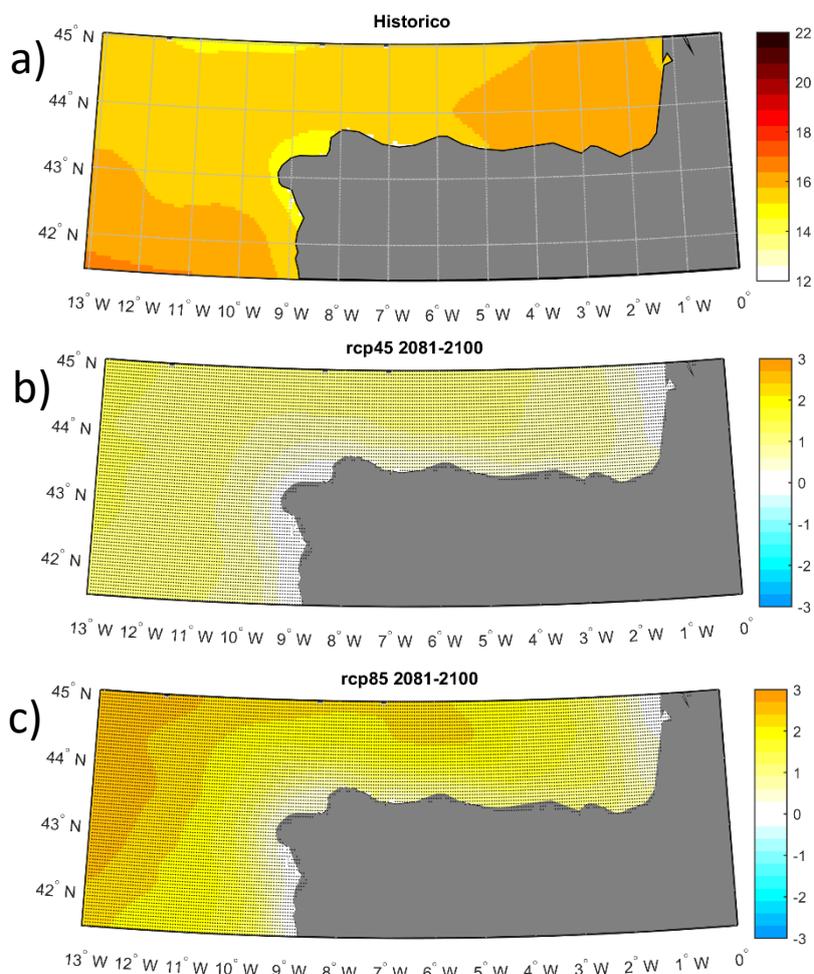


Figura 36. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en el Cantábrico a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

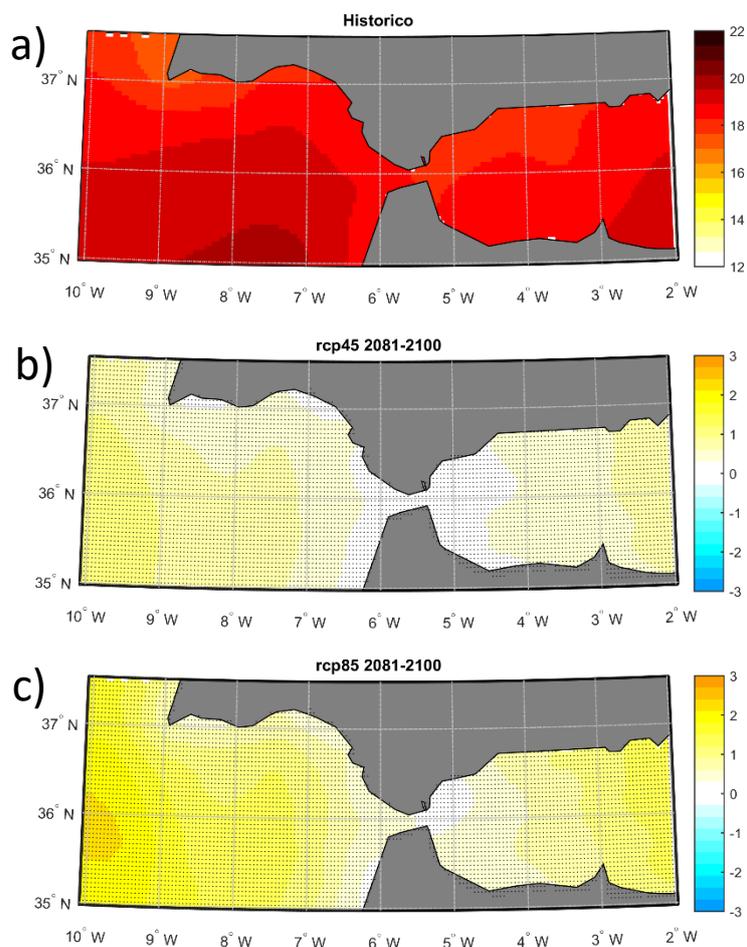


Figura 37. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en El Estrecho a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

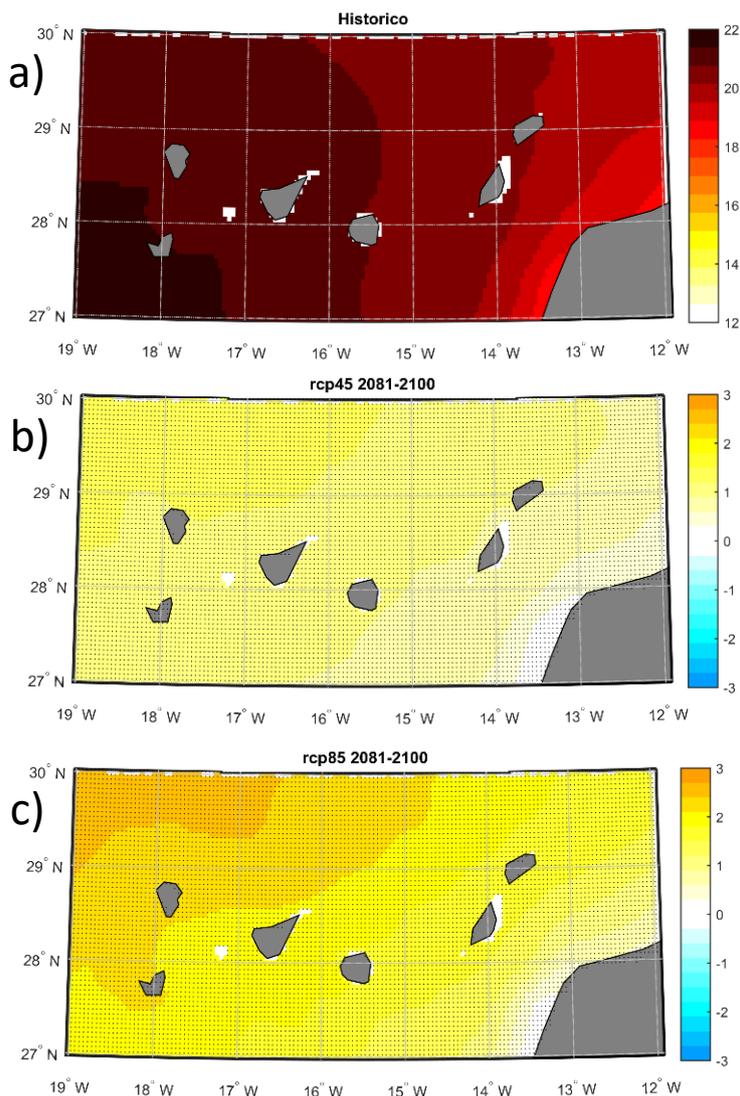


Figura 38. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en las islas Canarias a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

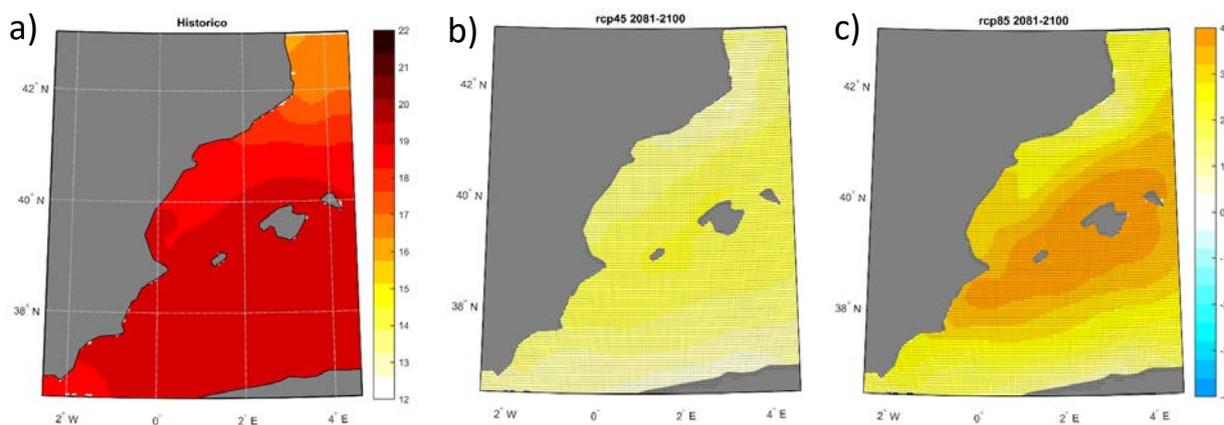


Figura 39. a) Temperatura media de la superficie del mar en el periodo histórico 1986-2005; Proyecciones multi-modelo de SST en El Mediterráneo a partir del conjunto de los 22 GCMs para el periodo futuro 2081-2100 relativo al periodo histórico para el escenario RCP4.5 (b) y RCP8.5 (c). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

## 9. REFERENCIAS

1. Ardhuin, F., E. Rogers, A.V. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. Van der Westhuysen, P. Queffelec, J.-M. Lefevre, L. Aouf, F. Collard, Semiempirical Dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration, and validation, *J. Phys. Oceanogr.* 40 (9) (2010) 1917–1941. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>.
2. Ardhuin, F., W.C. O'Reilly, T.H.C. Herbers, P.F. Jessen, Swell transformation across the continental shelf. Part I: attenuation and directional broadening, *J. Phys. Oceanogr.* 33 (9) (2003) 1921–1939. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(2003)).
3. Barnett, T.P. y R.W. Preisendorfer (1987). Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Monthly Weather Review*, 115, 1825-1850.
4. Battjes, J., and J. PAEM, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, in: *Proceedings of the 16th Conference on Coastal Engineering*, pp. 569e587. cedb.asce.org, 1978.
5. Busuioc A., H. von Storch y R. Schnur (1999). Verification of GCM-Generated Regional Seasonal Precipitation for Current Climate and of Statistical Downscaling Estimates under Changing Climate Conditions. *Journal of Climate*, 12, 258-272.
6. Chapman, D. C., 1985: Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1060--1075.
7. Church, J. A., P. Clark, A. Cazenave, J. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. Merrifield, G. Milne, R.S.Nerem, P. Nunn, A. Payne, W. Pfeffer, D. Stammer, and A. Unnikrishnan (2013), Sea level change, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY. USA.
8. Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change Supplementary Material. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Available from [www.climatechange2013.org](http://www.climatechange2013.org) and [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
9. Clarke, L., J. Edmonds, H. Jacoby, H. Pitcher, J. Reilly, R. Richels, 2007. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA, 154 pp.
10. Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the dataassimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 553 – 597. DOI:10.1002/qj.828.
11. Déqué, M., Rowell, D. P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., de Castro, M. and van den Hurk, B., 2007. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53-70.
12. Hasselmann, S., K. Hasselmann, J. Allender, T. Barnett, Computation and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II:

- parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models, *J. Phys. Oceanogr.* (1985). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015).
13. Hemer, M.A., McInnes, K.L., y Ranasinghe, R. (2013). Projections of climate change-driven variations in the offshore wave climate off south eastern Australia. *Int. J. Climatol.* 33, 1615-1632.
  14. Hirt, C. and M. Rexer (2015). Earth2014: 1 arc-min shape, topography, bedrock and ice-sheet models – available as gridded data and degree-10,800 spherical harmonics, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 39, 103-112, doi:10.1016/j.jag.2015.03.001.
  15. Hotelling, H. (1936). Relations between two sets of variables. *Biometrika*, 28, 238-377.
  16. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. Available: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/> 2.
  17. Michelangeli, P.A., Vrac, M. and Loukos, H. (2009). Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT.* 36. 10.1029/2009GL038401.
  18. Riahi, K. Gruebler, A. and Nakicenovic N.: 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 7, 887-935.
  19. Stopa, J.E., F. Ardhuin, A. Babanin, S. Zieger, Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models, *Ocean Model.* 103 (2016) 2–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.003>.
  20. Tolman, H.L., Treatment of unresolved islands and ice in wind wave models, *Ocean Model.* 5 (3) (2003) 219–231. [http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003\(02\)00040-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00040-9).
  21. Tolman, H.L., Alleviating the Garden Sprinkler effect in wind wave models, *Ocean Model.* 4 (2002) 269–289. [http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003\(02\)00004-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00004-5).
  22. von Storch H. y F. W. Zwiers (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge.
  23. Wise, MA, KV Calvin, AM Thomson, LE Clarke, B Bond-Lamberty, RD Sands, SJ Smith, AC Janetos, JA Edmonds. 2009. Implications of Limiting CO2 Concentrations for Land Use and Energy. *Science.* 324:1183-1186. May 29, 2009.
  24. Xoplaki, E. (2002). *Climate variability over the Mediterranean*. Ph. D. Thesis. Universidad de Berna (Suiza).