



IH cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



MVOTMA
Ministerio de Vivienda
Ordenamiento Territorial
y Medio Ambiente



CTCN

CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE & NETWORK



**DESARROLLO DE HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA EVALUAR LOS
IMPACTOS, LA VULNERABILIDAD Y LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN
LA ZONA COSTERA DE URUGUAY**

**D3.2: PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO. OLEAJE, RESIDUO DEL NIVEL DEL MAR Y
NIVEL MEDIO DEL MAR EN URUGUAY**

IH cantabria

ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO	1
2. GENERACIÓN DE PROYECCIONES ESTADÍSTICAS DE CAMBIO CLIMÁTICO DEL OLEAJE Y RESIDUO DEL NIVEL DEL MAR EN URUGUAY.....	2
2.1. INTRODUCCIÓN	2
2.2. METODOLOGÍA.....	4
2.3. ANÁLISIS RESULTADOS	12
2.4. RESUMEN	25
3. PROYECCIONES REGIONALES DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN URUGUAY.....	30
4. REFERENCIAS	35

1. RESUMEN EJECUTIVO

- Esta actividad tiene como objetivo proporcionar información sobre los cambios futuros en el clima marítimo (oleaje y residuo del nivel medio del mar) y el nivel medio del mar para su consideración en la evaluación de los impactos y riesgos inducidos por el cambio climático en la zona costera de Uruguay dentro del marco del proyecto “Herramientas tecnológicas para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay”.
- Se ha optado por la aplicación de un modelo de downscaling estadístico basado en tipos de tiempo para la obtención de unas proyecciones robustas del clima marítimo (oleaje y residuo del nivel del mar). El predictor se ha definido a partir de las presiones al nivel del mar sobre un área espacial que abarca la zona occidental del Atlántico Sur.
- Las proyecciones han sido realizadas para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 a lo largo de todo el siglo XXI utilizando 30 modelos de circulación general (GCMs) lo que permite acotar y cuantificar la incertidumbre de los cambios futuros e identificar la existencia de concordancia en la señal de cambio entre modelos.
- El análisis de los cambios en los tipos de tiempo de las condiciones sinópticas atmosféricas ha permitido detectar un incremento de las situaciones anticiclónicas y una disminución de las tormentas extratropicales. Estos cambios de los patrones atmosféricos se reflejan en un aumento de los oleajes del Este (con alturas de ola del orden de 1.0-2.0 m y periodos den torno a 8.0-9.0 s) y una disminución de los oleajes del S (con periodos algo mayores).
- Se esperan aumentos máximos del percentil 95% de la altura de ola significativa del 4%, una disminución máxima del periodo de pico del orden de 3%; un giro de la dirección media del oleaje hacia el E del orden de los 3-4°, y aumentos del residuo del nivel del mar menores al 1% en el Río de la Plata a fin de siglo XXI (2070-2099) para el escenario RCP8.5, correspondientes al periodo y escenario con cambios más intensos.
- En cuanto al incremento del nivel medio del mar en aguas abiertas próximo a la desembocadura del Río de La Plata, la estimación media con su incertidumbre, definida por el percentil del 5% y del 95%, es de 41,8 [25,6-60,3] cm y 57,9 [35,2-85,4] cm para el escenario RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente.
- Los cambios en el oleaje y en el nivel del mar debido al cambio climático pueden producir impactos sobre la operatividad del sistema portuario, la inundación costera y el transporte de sedimentos en las playas. Un aumento de la altura de ola puede dificultar el acceso por el canal de navegación de un puerto y el aumento de la altura de ola en el interior del puerto disminuir su operatividad. El incremento del nivel del mar intensificado con un aumento del oleaje y de la componente atmosférica del nivel del mar es susceptible de producir un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos de inundación. El cambio en la dirección de oleaje generará un cambio en el transporte de sedimentos lo que podría conllevar un aumento de los procesos erosivos y un cambio en la orientación de las playas que podría traducirse en una pérdida de anchura de playa seca.

2. GENERACIÓN DE PROYECCIONES ESTADÍSTICAS DE CAMBIO CLIMÁTICO DEL OLEAJE Y RESIDUO DEL NIVEL DEL MAR EN URUGUAY.

2.1. INTRODUCCIÓN

Los escenarios globales de cambio climático son la principal fuente de información disponible para poder estimar futuros impactos en la costa. Estos escenarios se elaboran utilizando modelos físico-matemáticos del clima (modelos de circulación general, GCMs por sus siglas en inglés), que simulan la dinámica conjunta del sistema climático sometido al forzamiento de distintos escenarios hipotéticos de emisión de gases de efecto invernadero en el futuro. Los distintos escenarios climáticos, definidos en el quinto informe del IPCC (Fifth Assessment Report, AR5), están basados en rutas representativas de concentración (Representative Concentration Pathways, RCPs, Moss et al., 2010) de gases de efectos invernadero (GEIs). En la actualidad existen cuatro escenarios RCP con los que trabaja la comunidad científica. Cada uno de ellos representa distintas evoluciones de las concentraciones de GEIs a lo largo del siglo XXI, así el RCP2.6 representa un escenario optimista con bajas concentraciones de GEIs, los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 representan escenarios moderados con concentraciones de GEIs que se estabilizan antes (RCP4.5) y después (RCP6.0) del año 2100 y por último, el RCP8.5 representa un escenario pesimista con altas concentraciones de GEIs.

Las proyecciones globales se llevan a cabo periódicamente (cada cinco años aproximadamente) de forma coordinada, contando con la participación de decenas de centros internacionales de modelización numérica del clima, cada uno de los cuales aporta su propio GCM (IPCC, 2013). Estas simulaciones caracterizan la evolución diaria (o incluso intra-diaria) de numerosas variables climáticas de interés (presión, temperatura, humedad, etc.), tanto en superficie, como en distintos niveles verticales de la atmósfera. Desafortunadamente, el oleaje es una variable que se sale fuera del alcance de estos GCMs, los cuales, además, presentan la limitación añadida de trabajar con resoluciones demasiado groseras como para forzar modelos de oleaje regionales.

Por tanto, la tarea de regionalizar estos escenarios es clave para poder llevar a cabo estudios de impacto y adaptación a nivel regional y en especial en la costa. Para ello se suelen utilizar dos metodologías de regionalización (o downscaling, en inglés): el método dinámico y el método estadístico. El downscaling dinámico, basado en el anidamiento de modelos numéricos, es quizás la metodología más utilizada (e.g. Erikson et al. 2015; Hemer et al. 2016; Mori et al. 2010; Semedo et al. 2013). El downscaling estadístico hace uso de modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables de circulación atmosférica a gran escala (dadas por un GCM) con las variables locales/regionales de interés, observadas en superficie. Ambas aproximaciones proporcionan resultados similares, llegándose a obtener mejores resultados mediante los métodos estadísticos, ya que permiten implementar ciertas correcciones para eliminar el sesgo sistémico de algunos GCMs (Wang et al. 2010). Por otra parte, la regionalización dinámica es muy costosa computacionalmente, especialmente en el caso del oleaje, ya que primero hay que generar el oleaje a escala global y posteriormente anidar mallas regionales con un incremento gradual de la resolución. Por lo tanto, la mayoría de los estudios de proyecciones de oleaje dinámicos se basan en solo uno o unos pocos GCMs (e.g., Mori et al. 2010; Semedo et al. 2013). Por el contrario, la metodología estadística requiere un

menor esfuerzo computacional, permitiendo analizar un gran número de escenarios y GCMs. El análisis de múltiples GCMs y escenarios climáticos es muy importante para obtener no sólo una estimación del cambio, sino del grado de consenso del mismo entre los distintos modelos y escenarios y poder caracterizar la incertidumbre asociada.

En este trabajo, la estimación de las proyecciones del cambio climático del oleaje y del residuo del nivel del mar en el Río de la Plata se obtendrá a partir de una metodología de downscaling estadístico basada en tipos de tiempo. IHCantabria ha venido trabajando en el desarrollo y aplicación de esta metodología para la generación de proyecciones del oleaje a escala regional (Europa, Pérez et al., 2015) y global (Camus et al., 2017). Esta aproximación permite generar proyecciones robustas a partir de un elevado número de GCMs y con la resolución espacial de la base de datos histórica de oleaje utilizada como referencia. En este caso, se dispone del hindcast del oleaje generado por IMFIA a una resolución de un 1.0 km a lo largo del litoral y dominio medio e interior del Río de la Plata. La opción de downscaling dinámico para obtener proyecciones a esta resolución espacial requería un enorme esfuerzo computacional (replicar la modelización seguida en la generación de los datos históricos para distintos GCMs) para equiparar los resultados en términos de la caracterización de la incertidumbre asociada a los distintos GCMs y escenarios de cambio climático.

La metodología aplicada en este proyecto se describe en la sección 2, las proyecciones de cambio climático del oleaje y residuo del nivel del mar en el Río de la Plata se analizan en la sección 3. El informe se concluye con un resumen de los resultados en la sección 4.

2.2. METODOLOGÍA

La generación de proyecciones estadísticas de cambio climático del oleaje y residuo del nivel del mar para diferentes escenarios socio-económicos y horizontes temporales: corto (2010-2039), medio (2040-2069) y largo plazo (2070-2099), conlleva una serie de tareas que se describen a continuación:

- Recopilación y procesado de bases de datos históricas del predictor (variables de circulación atmosférica de gran escala) y predictando (variables locales de interés, en este caso, los parámetros de estado de mar del oleaje y el residuo del nivel del mar) para la calibración, entrenamiento y validación del método de downscaling estadístico.
- Desarrollo de un modelo estadístico para la proyección del oleaje. En este trabajo se aplica un método de downscaling estadístico basado en tipos de tiempo (situaciones sinópticas) con un bajo coste computacional y capaz de proporcionar diferentes parámetros que responden al carácter multivariado del oleaje (Camus et al., 2014). Usualmente, el oleaje que llega a un tramo de costa está formado por oleaje de tipo swell generado lejos de la zona local de estudio y oleaje de viento, generado localmente. Para modelar correctamente el oleaje lejano es necesario identificar y caracterizar el predictor en la zona de generación potencial, es decir, áreas donde se genera/disipa la energía que llega hasta un punto objetivo y los tiempos de propagación de esta energía. Por último, es necesario validar el modelo de downscaling estadístico para la proyección del oleaje y del residuo del nivel medio del mar.
- Obtención de las proyecciones multi-modelo de oleaje y del residuo del nivel medio del mar a partir de los GCMs seleccionados para distintos escenarios de cambio climático. El modelo de downscaling estadístico planteado predice los cambios en el clima local (predictando: oleaje y residuo del nivel del mar) a partir de los cambios en el predictor (atmósfera), permitiendo una mejor comprensión del clima.

Datos históricos y proyecciones de cambios climático

Datos históricos de presiones a nivel del mar

Para la definición del predictor se utilizan los campos de presiones a nivel del mar (sea level pressure, SLP) de la base de dato CFSR y CFSRv2 [Saha et al., 2014]). En su conjunto, los datos cubren desde 1979 a 2017 con resolución temporal horaria y una resolución espacial de 0.3°-0.2°.

Datos históricos de oleaje

Para la definición del predictor se utiliza la nueva base de datos de oleaje para Uruguay realizada por el IMFIA en el marco de este proyecto. Este hindcast cubre un periodo de 32 años comprendido entre el 1/1/1985 y el 31/12/2016. Los productos generados tienen una resolución temporal horaria y consisten en campos espaciales de los principales parámetros descriptores del oleaje y las series temporales espectros direccionales 77 puntos distribuidos en toda el área de estudio. Estos datos han sido obtenidos con el modelo WaveWatchIII® versión 5.16 (WW3DG, 2016) en la modalidad multigrad compuesto por una malla global de aguas profundas de 1.0° de resolución, dos mallas intermedias para ir aumentando la resolución hasta llegar a resolver el exterior del Río de la Plata y la plataforma continental Atlántica a una resolución espacial de 2' (~3 km) y la zona media e interior y la costa de

Uruguay con una resolución espacial de 40'' (~1 km). Los datos de entrada del modelo de oleaje son los campos de viento en superficie obtenidos del reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al. 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al. 2014) en su formato de mayor resolución; y los campos de niveles y corrientes obtenidos de un hindcast regional realizado en base al modelo TELEMAR (Hervouet, 2007).

Datos históricos del residuo del nivel del mar

Para la definición del residuo del nivel del mar se utiliza la simulación retrospectiva de nivel del mar realizada por el IMFIA en el marco de este proyecto. Este hindcast cubre un periodo de 31 años (1985-2016) y ha sido generado mediante el modelo hidrodinámico bidimensional TELEMAR2D para el Río de la Plata, el cual fue calibrado y validado en base a información de niveles medidos en diversas estaciones de la costa Uruguaya. El modelo considera las principales características de la dinámica del Río de la Plata y sus forzantes (vientos 6-horarios CFSR, caudales diarios y ondas de marea en la frontera oceánica del modelo). El dominio cubre el Río de la Plata y su Frente Marítimo, incluyendo la desembocadura de los principales afluentes: los ríos Paraná y Uruguay en su borde Oeste, el Río de la Plata en su totalidad y la zona del Frente Marítimo hasta los 200 m de profundidad de la plataforma continental. La malla está formada por elementos triangulares de tamaño variable, desde aproximadamente 7.0 Km de lado en la zona del borde oceánico, 2.0 km en la zona estuarina del Río de la Plata, a 1.0 Km de lado sobre la costa Uruguaya.

Proyecciones de cambio climático

Los campos diarios de presiones al nivel del mar de los GCMs de la fase 5 del proyecto de intercomparación CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) son la base a partir de los cuales se obtienen los cambios en el predictor. En este estudio se han considerado un total de 30 GCMs (ver Tabla 1). Los datos utilizados se han obtenido a partir de Earth System Grid – Center for Enabling Technologies (ESG-CET, <http://pcmdi9.llnl.gov/>). La tabla 1 muestra los GCMs utilizados, así como, los centros de investigación donde han sido generados y la resolución espacial y vertical con la que han sido ejecutados estos modelos climáticos.

Modelo	Institución	Resolución atmosférica (lat x lon, número de niveles)
ACCESS1.0	CSIRO-BOM (Australia)	1.25º x 1.9º, L38
ACCESS1.3	CSIRO-BOM (Australia)	1.25º x 1.9º, L38
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center (China)	2.8º x 2.8º, L26
BCC-CSM1.1(m)	Beijing Climate Center (China)	1.12º x 1.12º, L26
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science (China)	2.8º x 2.8º, L26
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	2.8º x 2.8º, L35
CCSM4	National Center for Atmospheric Research (USA)	0.94º x 1.25º, L26
CESM1(BGC)	Community Earth System Model Contributors (USA)	0.94º x 1.25º, L26

Modelo	Institución	Resolución atmosférica (lat x lon, número de niveles)
CESM1(CAM5)	Community Earth System Model Contributors (USA)	0.94º x 1.25º, L26
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italy)	0.75º x 0.75º, L31
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italy)	1.9º x 1.9º, L95
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques (France)	1.4º x 1.4º, L31
CSIRO-Mk3.6.0	CSIRO-QCCCE (Australia)	1.9º x 1.9º, L18
FGOALS-g2	LASG-CESS (China)	2.8º x 2.8º, L26
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	2º x 2.5º, L48
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	2º x 2.5º, L48
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	2º x 2.5º, L48
HadGEM2-CC	Met Oficce Hadley Centre (UK)	1.25º x 1.9º, L60
HadGEM2-ES	Met Oficce Hadley Centre (UK)	1.25º x 1.9º, L38
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	1.5º x 2º, L21
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace (France)	1.9º x 3.75º, L39
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace (France)	1.25º x 2.5º, L39
IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace (France)	1.9º x 3.75º, L39
MIROC-ESM	MIROC (Japan)	2.8º x 2.8º, L80
MIROC-ESM-CHEM	MIROC (Japan)	2.8º x 2.8º, L80
MIROC5	MIROC (Japan)	1.4º x 1.4º, L40
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Germany)	1.9º x 1.9º, L47
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Germany)	1.9º x 1.9º, L95
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (Japan)	1.1º x 1.1º, L48
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre (Norway)	1.9º x 2.5º, L26

Tabla 1. CMIP5 GCMs (nombres, instituciones, resolución atmosférica) utilizadas en las proyecciones del oleaje.

Modelo de downscaling estadístico

Para proyectar el oleaje y el residuo del nivel del mar se utiliza un método basado en tipos de tiempo que permite inferir variaciones en los predictandos de manera eficiente a partir de las presiones a nivel del mar (sea level pressure fields, SLP) de los distintos GCMs disponibles para los escenarios de cambio climático (Camus et al., 2014).

Los tipos de tiempo (Weather Types, WTs) se obtienen mediante la aplicación de la técnica de clasificación k-medias a la variable predictora. Se han considerado dos alternativas para la obtención de los WTs: i) clasificación no guiada, en la cual los tipos de tiempo se obtienen teniendo en cuenta

sólo el predictor (Camus et al., 2014); ii) clasificación semiguada, basada en la combinación de k-medias y una regresión multivariada previa entre el predictor y el predictando. Esta técnica de clasificación semisupervisada permite una detección de patrones de circulación atmosférica sinóptica con una mayor representatividad de las condiciones del oleaje local. El nivel de influencia del predictando se controla mediante un factor de ponderación que establece un balance entre la pérdida/ganancia de la representatividad del predictor/predictando (Cannon et al., 2012). Se ha implementado un factor igual a 0.6 basado en un análisis de sensibilidad de la influencia de la regresión guiada en la dispersión del clima marítimo multivariado dentro de cada WT y la pericia del modelo estadístico en el Atlántico Norte (Camus et al., 2016). El modelo de regresión multivariada entre el predictando y el predictor (SLP y GSLP) se ajusta a escala diaria. En este trabajo se ha particularizado el modelo estadístico (Camus et al., 2017), desarrollado a escala global, para obtener las proyecciones de cambio climático en Uruguay. La alternativa 1, a diferencia de la regresión guiada, supone un menor tiempo de computación y un análisis más sencillo de la relación entre predictor y predictando ya que los WTs son los mismos para todos los nodos del oleaje considerados.

El esquema de la metodología de downscaling estadístico se muestra en la Figura 1, a continuación, se describen brevemente los pasos a seguir:

- 1) Definición del predictor (dominio espacial y cobertura temporal) basado en un análisis previo de la génesis del oleaje en la zona de Uruguay.
- 2) Clasificación de las presiones medias diarias a nivel del mar en un número determinado de patrones/tipos de tiempo (WTs) mediante las dos alternativas descritas anteriormente: i) clasificación no guiada; ii) clasificación semiguada. La clasificación semiguada se ha aplicado a cada nodo del oleaje definiendo el predictando multivariado mediante los parámetros del oleaje: altura de ola significativa (H_s), periodo de pico (T_p) y dirección media del oleaje (θ) de la base de datos IMFIA.
- 3) Determinación la función de distribución empírica de cada variable (H_s , T_m , T_p , θ , residuo del nivel del mar) asociada a cada WT en cada nodo de la base de datos del oleaje IMFIA. Esta relación entre las condiciones sinópticas de las presiones sobre la superficie del mar y las condiciones locales del oleaje se considera constante en el tiempo.
- 4) Las proyecciones del oleaje se determinan a partir de las funciones de distribución de los parámetros del oleaje en los distintos periodos de tiempo (2010-2039, 2040-2069, 2070-2099), calculadas a partir de la suma de probabilidades futuras de los WTs multiplicadas por las funciones de distribución de cada variable asociadas a cada WT en cada nodo de la base de datos IMFIA (determinadas en el paso 3).

Definición del predictor

El predictor se define a escala diaria a partir de la SLP y los su gradientes al cuadrado (GSLP). El dominio espacial y la cobertura temporal del predictor son específicos cada punto a analizar. El dominio espacial debe cubrir el área de la cuenca oceánica de generación de las olas que llegan a ese lugar en particular mientras que el dominio temporal debe cubrir las escalas de tiempo que dominan en oleaje en dichas localizaciones (generación, propagación, disipación etc.).

Alves et al. (2001) identificó cuatro regiones de generación del oleaje en el océano Sur Atlántico que determinan los cuatro patrones de oleaje dominantes en la costa este de Sudamérica: oleaje de viento generados por vientos locales con una dirección del ENE, oleaje de viento generados por vientos locales con una dirección del SSE, oleaje del Este y oleaje de fondo del SE. Los oleajes del ENE están producidos por una intensificación del anticiclón subtropical del Atlántico Sur y por tanto de los vientos del NE en las aguas uruguayas. Esta intensificación suele preceder al paso de un sistema frontal debido al desarrollo de intensos gradientes de presiones sobre esta zona costera. Los oleajes del SSE están generados por vientos producidos por sistemas de bajas presiones que viajan a lo largo de la costa asociados a frentes fríos. El oleaje del Este se produce por el desplazamiento hacia el norte de un anticiclón asociado al paso de un sistema frontal que se propaga hacia el noreste en el océano Atlántico donde permanece estacionario durante varios días generando persistentes vientos del Este sobre una mayor área de generación, siendo capaz de generar oleajes de mayor periodo. Los oleajes de fondo del SE están generados por tormentas extra-tropicales que se forman en las latitudes medias y altas (30°S - 70°S) y se desplazan en dirección NE.

Los eventos extremos de oleaje están asociados al fenómeno meteorológico denominado “sudestada”, caracterizado por fuertes vientos del SE (Escobar et al., 2004, Dragani et al., 2013). Estas situaciones se producen durante todo el año con una mayor frecuencia durante el verano austral. La duración media de estas condiciones atmosféricas es de 47 horas. Los patrones de circulación atmosférica que caracterizan de las sudestadas están definidos por situaciones de altas presiones localizadas al sur del Río de la Plata (más frecuentes) o intensos centros de bajas presiones localizados al norte del Río de la Plata (más intensos).

Por lo tanto, se ha considerado un dominio espacial del predictor que se extiende desde la latitud 56°S hasta 22°S y desde la longitud 72°W hasta 20°W. La cobertura temporal del predictor es de 2 días, es decir, el predictor se calcula a escala diaria como la media de ese mismo día y un día antes (en Camus et al., 2014 se pueden encontrar una descripción más detallada de la definición del predictor).

Los datos de las presiones al nivel del mar de la base de datos CFSR, utilizados para la caracterización histórica del predictor, y de las proyecciones CMIP5 se convierten a una rejilla común de resolución 2.0° x 2.0°. Esta resolución está condicionada por la resolución de los GCMs, que varía entre 0.75° y 2.8° (ver Tabla 1). Los campos diarios de las presiones se han estandarizado para evitar resultados sesgados como consecuencia de la diferente escala de las variables (presiones y gradientes). En el caso de los datos de los GCMs, la estandarización utilizándose ha hecho en base a la climatología media y la desviación estándar del periodo histórico (1997-2005) del mismo modelo, disminuyendo así también el bias que el propio modelo climático pudiera contener.

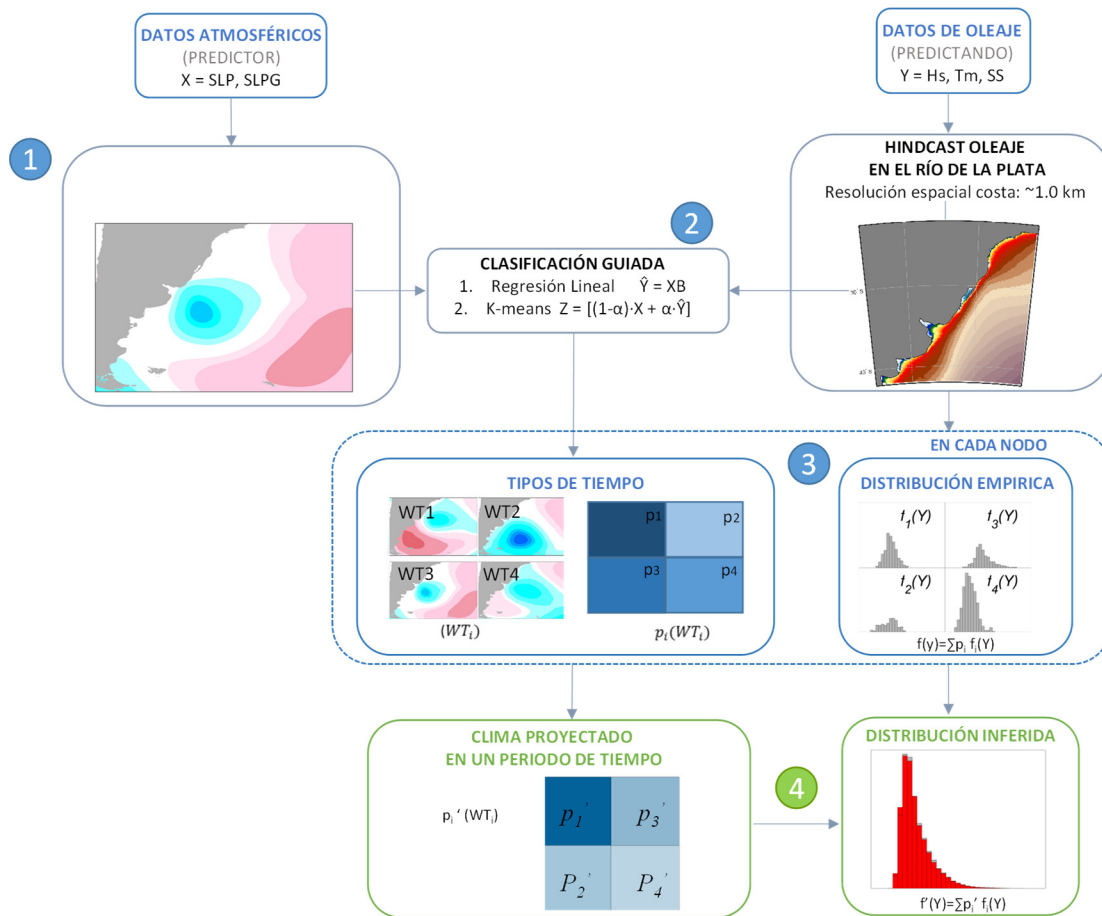


Figura 1: Esquema de la metodología de downscaling estadístico para la proyección del oleaje.

Validación del modelo de downscaling estadístico

Los modelos de downscaling estadísticos utilizan datos históricos (tanto del predictor como del predictando) para su calibración, siendo importante realizar una validación del modelo en periodo histórico que no esté incluido en el periodo de entrenamiento del modelo. La validación cruzada consiste en realizar la calibración y validación con periodos independientes de datos históricos. El método más habitual en aplicaciones climáticas divide los datos en dos submuestras que no se solapan en el tiempo (por ejemplo, 80% de los datos se utilizan en la calibración del modelo, 20% restantes en la validación). Sin embargo, esta aproximación puede verse influenciada por las condiciones climáticas en los periodos de calibración y validación y obtener resultados muy distintos según los periodos considerados. El proceso de validación debe repetirse varias veces para obtener una validación robusta evitando el solapamiento de las submuestras de validación. La validación cruzada de k-iteraciones permite una validación más rigurosa mediante la combinación de múltiples periodos de calibración/validación (Gutiérrez et al., 2013). Este tipo de validación cruzada divide la muestra de datos disponible en k subconjuntos no solapados (de igual tamaño). Cada submuestra k sirve como periodo de validación del modelo calibrado con las k-1 muestras restantes. Las estimaciones para cada submuestra k se unen en una única predicción que se compara con la muestra total de observaciones para obtener un único resultado de validación (Gutiérrez et al., 2013). La selección de k estaba basada

en un compromiso entre un tiempo computacional aceptable y un tamaño de la submuestra de calibración adecuado para asegurar la total captura de la distribución de los datos. Otro aspecto importante es la definición de las submuestras de calibración/validación que pueden estar definidas por años consecutivos (continuas), un año cada k años (estratificadas) o muestreadas aleatoriamente de forma no continua en el tiempo (aleatorias).

En este trabajo se ha realizado una validación del modelo de downscaling estadístico mediante una validación cruzada de $k=5$ iteraciones mediante un muestreo estratificado de los 32 años datos disponibles (1985-2016), seleccionando un año cada 5 (por ejemplo, la primera submuestra de validación estaría formada por los años 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015). Se han considerado dos alternativas del modelo: 1) una única clasificación para toda el área de estudio, en esta alternativa se obtiene un único conjunto de tipos de tiempo; 2) una clasificación guiada en cada nodo de la base de datos de oleaje considerada, en este caso, el conjunto de tipos de tiempo es diferente para cada nodo del oleaje. En la Figura 2 se muestra el coeficiente de correlación entre las estimaciones y las observaciones de los parámetros mensuales H_s media, percentil 95 de H_s , T_m medio, Θ_m media, representados de izquierda a derecha, utilizando una única clasificación de los tipos de tiempo (panel superior) y una clasificación semiguada en cada localización (panel inferior). Se puede comprobar como el modelo de downscaling estadístico tiene una mayor pericia aplicando una clasificación particularizada en cada nodo (la correlación aumenta de un valor medio de 0.75 a un valor de 0.9 en la altura de ola, de 0.65 a 0.9 en la dirección media del oleaje). Las mejoras del modelo también se reflejan en los resultados de otros indicadores como el error cuadrático medio normalizado y la dispersión (no se muestran).

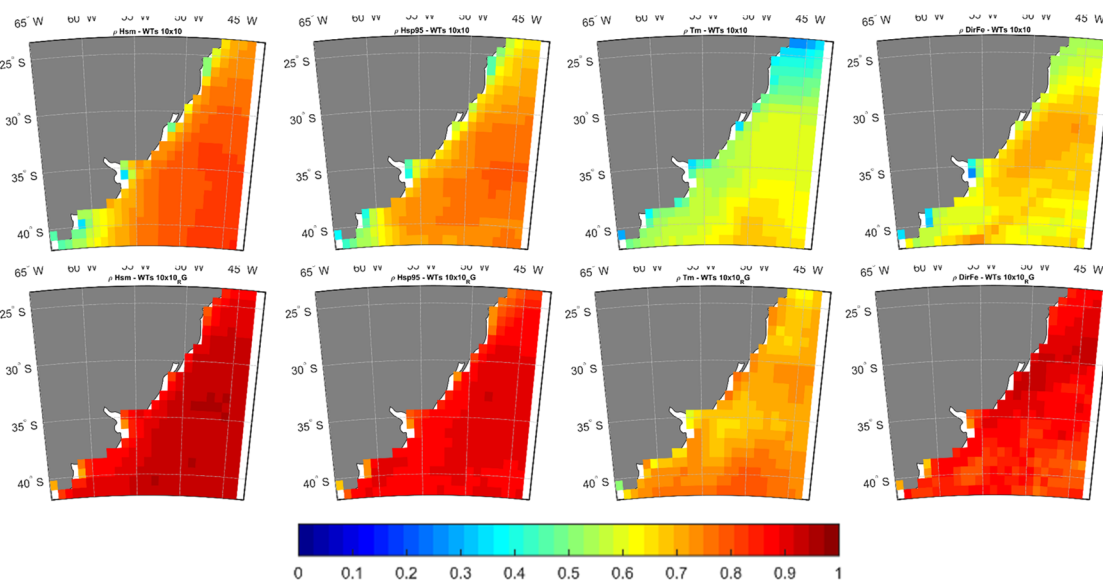


Figura 2: Validación (coeficiente correlación) del modelo de downscaling estadístico para los parámetros mensuales: H_s media, percentil 95 de H_s , T_m medio, Θ_m media (columnas de izquierda a derecha) para una única clasificación de los tipos de tiempo (paneles superiores) y con una clasificación semiguada en cada localización (paneles inferiores).

La validación del modelo estadístico para la proyección del residuo del nivel del mar se muestra en la Figura 2. Se ha representado el coeficiente de correlación entre las estimaciones y las observaciones de los parámetros mensuales del valor medio y el percentil 95 del residuo del nivel del mar, columna izquierda y derecha, respectivamente, utilizando una única clasificación de los tipos de tiempo (paneles superiores) y una clasificación semiguada en cada localización (paneles inferiores). En este caso, la pericia del modelo con regresión guiada es ligeramente superior a la aplicación de una única clasificación. Los coeficientes de correlación son superiores a 0.75 en la zona interior del Río de la Plata, alcanzándose valores del orden de 0.9 en el resto del dominio de estudio. El error medio cuadrático (no se muestra) presenta valores máximos entorno al 8.0% para el percentil 95% del residuo del nivel del mar.

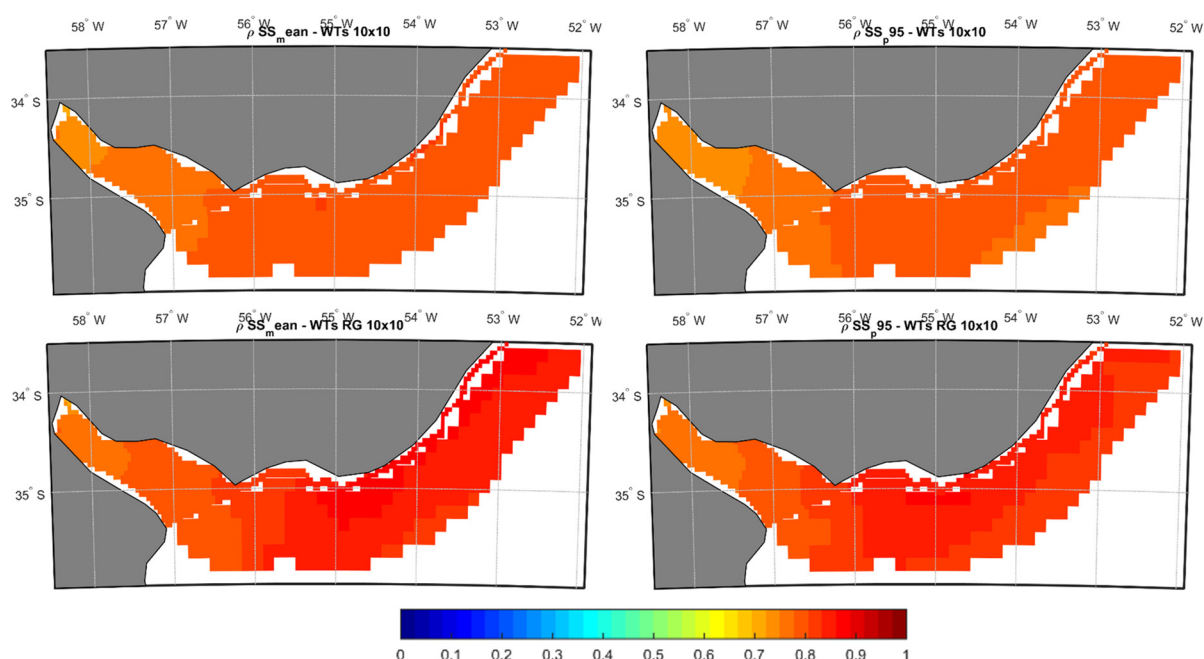


Figura 3: Validación (coeficiente correlación) del modelo de downscaling estadístico para los parámetros mensuales: media, percentil 95 del residuo del nivel del mar (columna izquierda y derecha, respectivamente) para una única clasificación de los tipos de tiempo (paneles superiores) y con una clasificación semiguada en cada localización (paneles inferiores).

Una vez validado el modelo estadístico, la clasificación semiguada final de los tipos de tiempo en cada nodo se realiza considerando la totalidad de datos históricos.

2.3. ANÁLISIS RESULTADOS

A continuación, se describen y analizan los resultados de la proyección climática del oleaje en la zona de estudio para el escenario RCP8.5 a largo plazo (2070-2099). La magnitud de cambio más intensa para este escenario, el más pesimista, y para el final de siglo XXI facilitará la explicación física de los resultados.

En la Figura 4 se muestra la media de la altura de ola significativa obtenida a partir de los 30 GCMs en la zona de estudio, que abarca las mallas regional, costera y local de los datos de oleaje de IMFIA, junto con los cambios proyectados en la media anual y la media de verano (Enero-Febrero-Marzo, EFM) e invierno (Julio-Agosto-Septiembre, JAS) para el periodo 2070-2100, relativo al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5. Los cambios se consideran consistentes cuando la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio. Los cambios en los valores medios anuales de altura de ola presentan un gradiente que varía desde un descenso del orden de los 0.04-0.05 m al sur de la zona de estudio a un incremento del orden de 0.03-0.04 m en la zona costera más al norte. Un patrón similar de cambios se espera en el invierno, mientras que se puede observar un patrón de cambio diferente para el verano con una intensificación del descenso de la altura de ola al sur de la zona de estudio llegándose a valores de 0.1 m, y un aumento de la altura de la ola del orden de 0.03-0.04 m a la entrada del Río de la Plata. En la

Figura 5 se muestran los resultados con mayor detalle en el Río de la Plata, pudiéndose observar un ligero aumento en la altura de ola media anual (del orden de los 0.02 m), cambios inapreciables durante el verano y un aumento algo superior durante el invierno (del orden de los 0.04 m). Las proyecciones regionales y locales en el Río de la Plata del percentil 95% de la altura de la ola significativa se muestran en la Figura 6. El patrón del cambio del percentil 95% es similar al de la altura de ola media con una disminución ligeramente superior (máximos cambios negativos del orden de 0.09 m al sur del dominio regional). Sin embargo, el número de localizaciones con cambios robustos es menor.

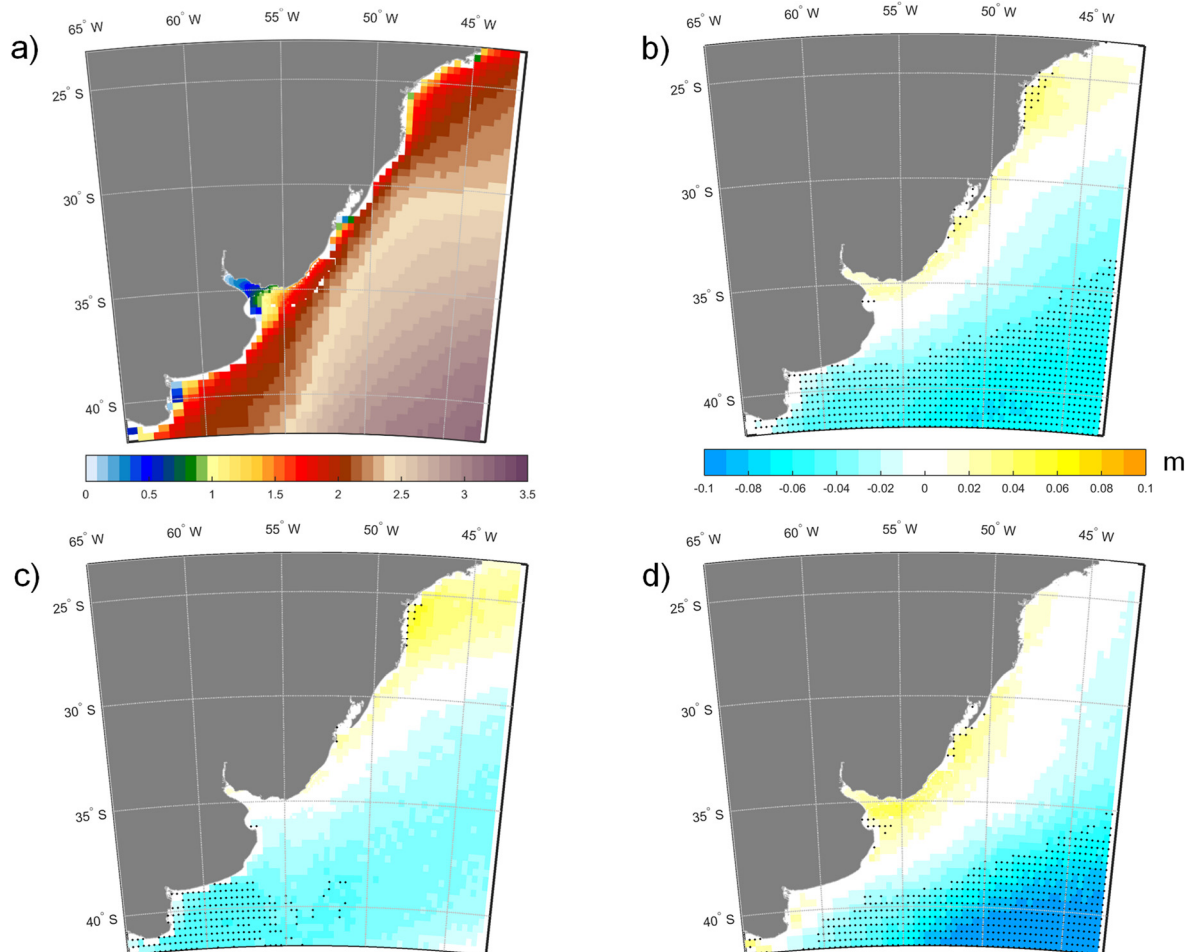


Figura 4. Proyecciones multi-modelo regionales de la altura de ola significativa: a) Valor medio de la altura de ola significativa media en el periodo histórico 1979-2005. b, c, d) Cambios en la media anual, del verano (EFM) y del invierno (JAS) en el periodo futuro 2070-2099 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5. Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

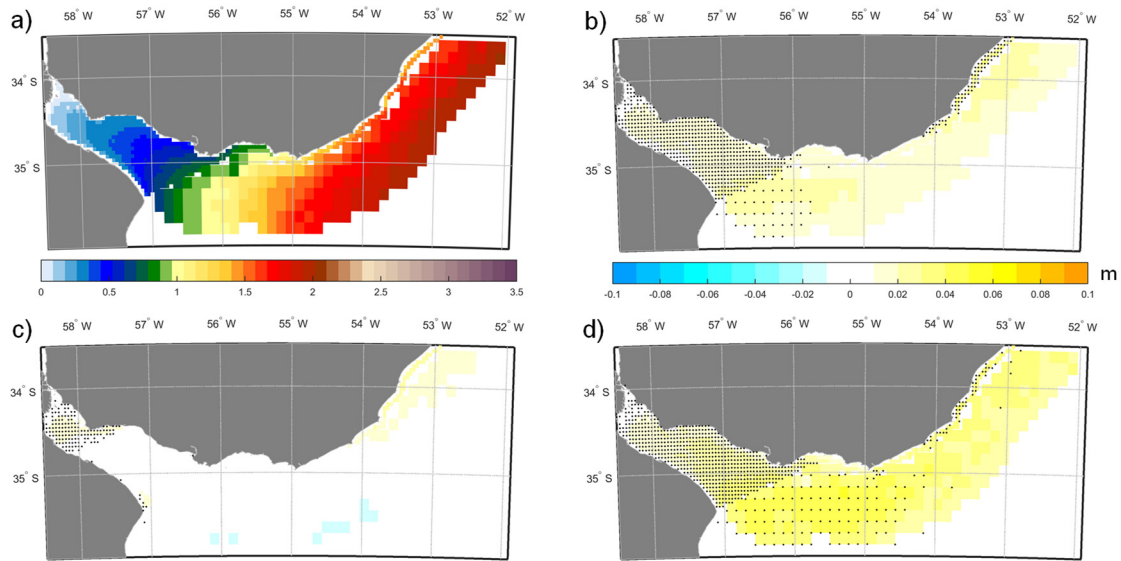


Figura 5. Proyecciones multi-modelo locales de la altura de ola significativa en el Río de la Plata: a) Valor medio de la altura de ola significativa en el periodo histórico 1979-2005. b, c, d) Cambios en la media anual, del verano (EFM) y del invierno (JAS) en el periodo futuro 2070-2099 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5.

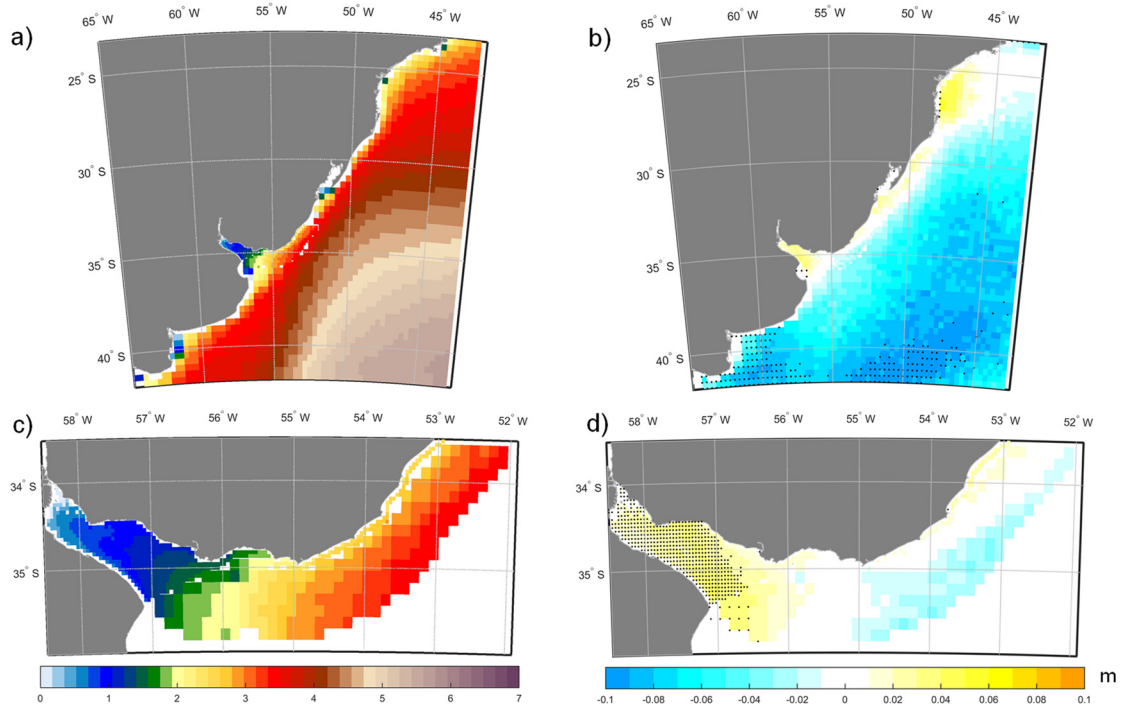


Figura 6. Proyecciones multi-modelo regionales y locales en el Río de la Plata del percentil 95% de la altura de ola significativa: a y c) Percentil 95% en el periodo histórico 1979-2005 en el área regional y local, respectivamente; b y d) Cambios en el periodo futuro 2070-2099 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5. Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

En la Figura 7 se muestra la media histórica (1979-2005) del periodo de pico obtenido a partir de los 30 GCMs en la zona regional de estudio, junto con los cambios proyectados en la media anual y la media de invierno y verano para el periodo 2070-2099, relativo al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5. En el caso de este parámetro, se observa un gradiente de cambios que varía desde valores positivos en el sur (del orden de 0.05 s) a cambios negativos (hasta descenso del 0.1 s) en el norte de la zona de estudio. Los patrones estacionales son similares con una intensificación de la magnitud de los cambios en el verano austral (incrementos del orden de 0.06-0.07 y disminuciones de 0.1 s), y una reducción de los cambios y mayor área con cambios negativos (del orden de 0.04 s). En la Figura 8 se muestran los resultados con mayor detalle en el Río de la Plata, pudiéndose observar un aumento del periodo de pico del orden de 0.08 s a la entrada de la desembocadura y una disminución del periodo del orden de 0.09-0.1 s a lo largo de toda la costa de Uruguay.

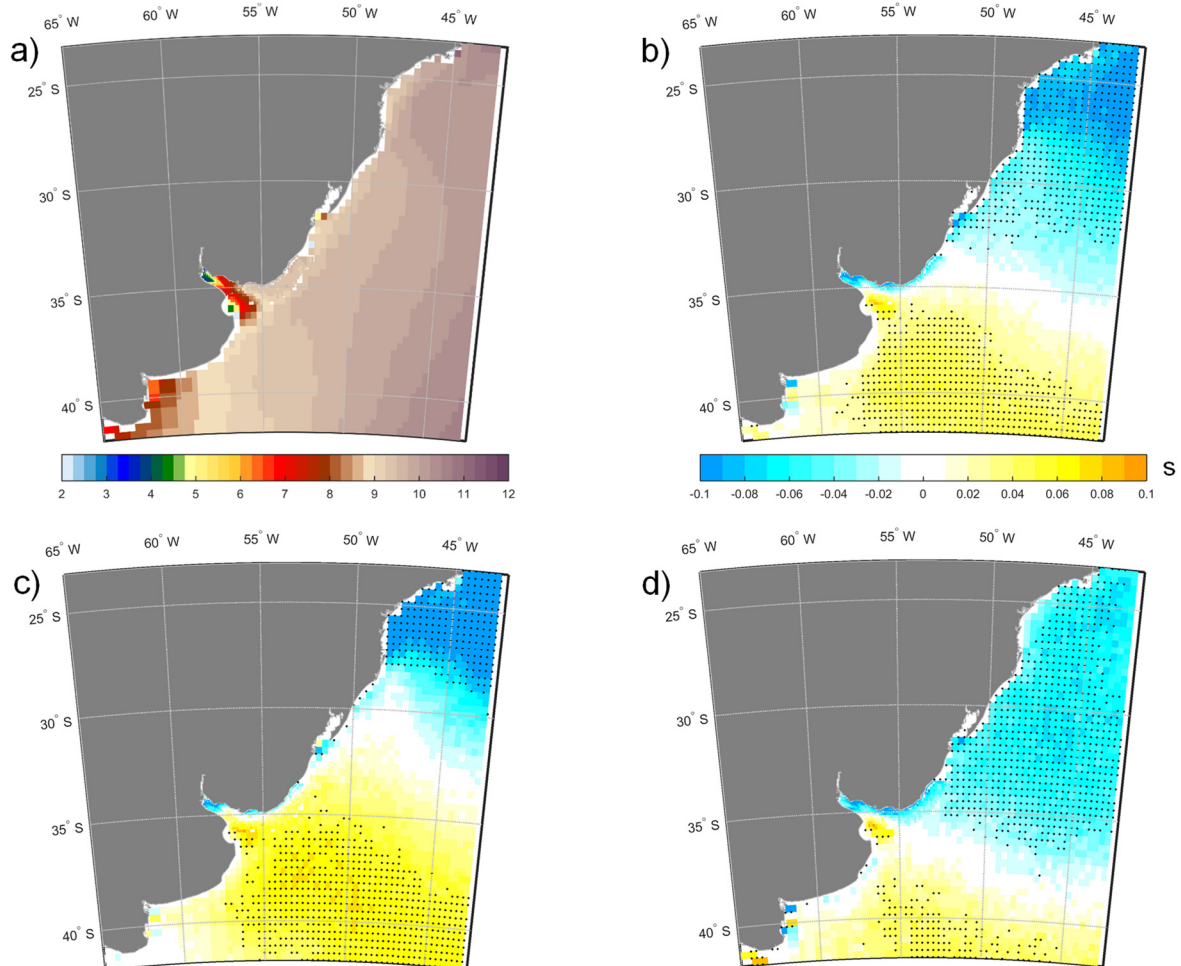


Figura 7. Proyecciones multi-modelo regionales del periodo de pico: a) Valor medio del periodo de pico (en segundos) en el periodo histórico 1979-2005. b, c, d) Cambios en la media anual, del verano (EFM) y del invierno (JAS) en el periodo futuro 2070-2099 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5. Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

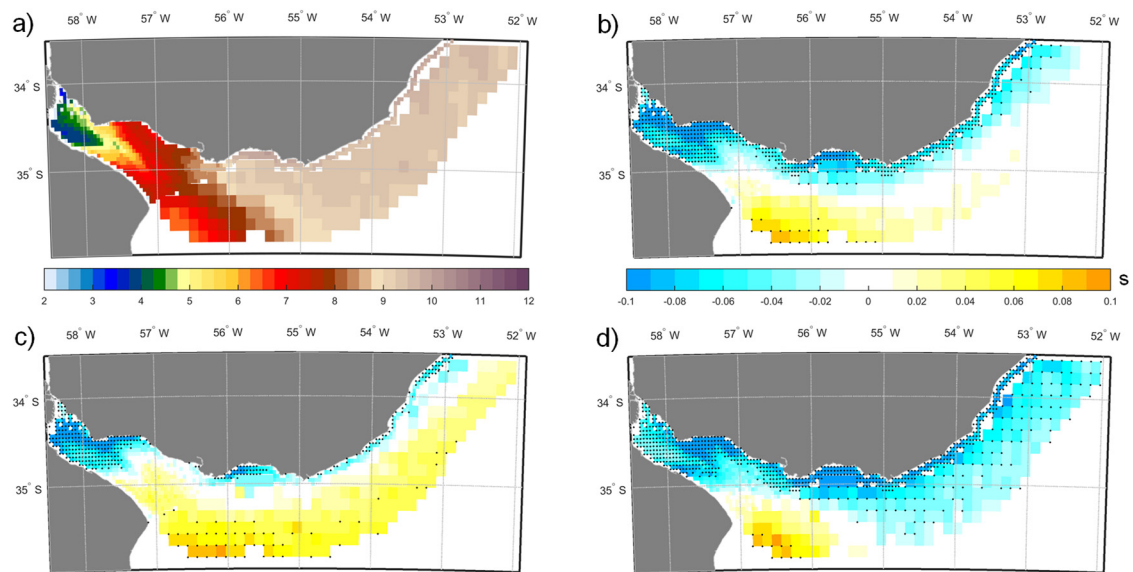


Figura 8. Proyecciones multi-modelo locales del periodo de pico en el Río de la Plata: a) Valor medio del periodo de pico medio en el periodo histórico 1979-2005. b, c, d) Cambios en la media anual, del verano (EFM) y del invierno (JAS) en el periodo futuro 2070-2099 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5. Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

El valor medio histórico (1979-2005) y los cambios futuros (2070-2099) de la dirección media del oleaje obtenida a partir de los 30 GCMs para el escenario RCP8.5 se muestran en la Figura 9. Se espera un giro antihorario (cambios negativos expresados en sentido horario) del oleaje del orden de 4°-6° en la zona más somera alcanzándose giros hasta de 9-10 grados al sur de la zona de estudio.

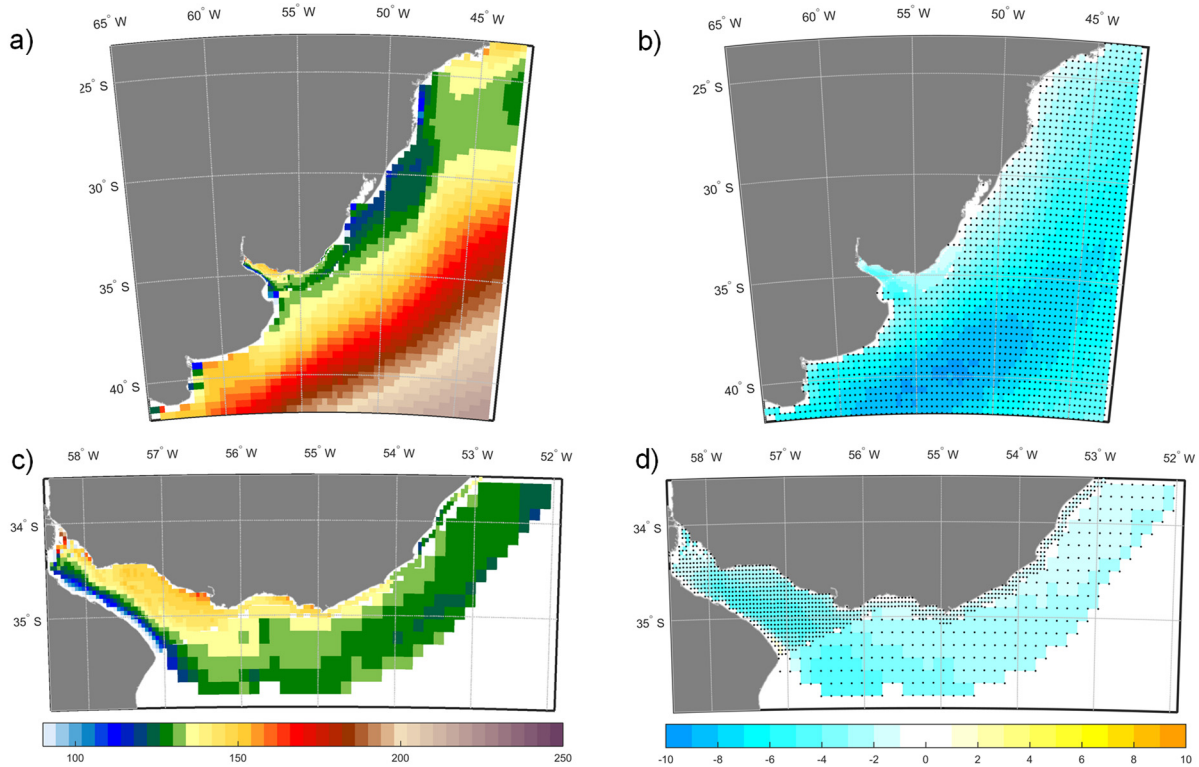


Figura 9. Proyecciones multi-modelo regionales y locales en el Río de la Plata de la dirección media del oleaje: a y c) Dirección media (en grados) en el periodo histórico 1979-2005 en el área regional y local, respectivamente; b y d) Cambios de la dirección media (en grados en sentido horario) en el periodo futuro 2070-2099 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5. Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

Para comprender los patrones espaciales de las proyecciones del oleaje en la zona de estudio se van a analizar los cambios en las condiciones atmosféricas mediante los cambios en las probabilidades de ocurrencia de los WTs. La relación establecida entre cada WT con el oleaje permite analizar qué tipos de oleaje se ven afectados por el cambio en los patrones atmosféricos y cómo estas modificaciones se ven reflejados en el valor medio de los distintos parámetros del oleaje.

Para ello se han seleccionado 3 nodos localizados a lo largo de la zona de estudio (ver Figura 10). En cada uno de estos nodos se analizan los WTs y el tipo de oleaje asociado a cada patrón (caracterizado mediante el valor medio de la altura de ola significativa, el periodo de pico y la dirección media del oleaje de todos los estados de mar asociados a ese WT). También se analizan los cambios proyectados de la frecuencia de presentación de los WTs correspondientes a cada nodo en el periodo 2070-2099 respecto al periodo histórico de referencia 1979-2005 para el escenario RCP8.5. Estos cambios en las frecuencias de presentación de los WTs se traducen en cambios en la ocurrencia de determinados tipos de oleaje y permiten entender el aumento o disminución de la altura de ola, el periodo de pico o la dirección del oleaje.

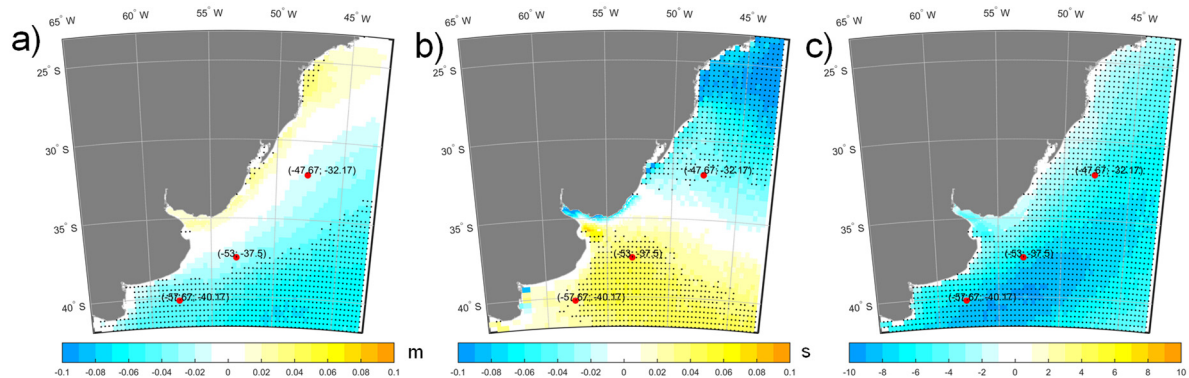


Figura 10. Localización de los 3 nodos seleccionados para el análisis de las proyecciones multi-modelo regionales: a) la altura de ola significativa, b) periodo de pico; c) dirección media del oleaje.

En la Figura 11 se muestran los 100 WT's correspondientes al nodo localizado en [Longitud = -57.67° ; Latitud = -40.17°] obtenidos de la clasificación de las presiones medias 2-diaras en el dominio del predictor. Se puede observar como estos patrones representan a: 1) Sistemas anticiclónicos: sistemas de altas presiones que abarcan la práctica totalidad del dominio del predictor, anticiclón del Atlántico Sur (WT's marcados en rojo); 2) Borrascas extratropicales: sistemas de bajas presiones centrados en el borde sur del predictor, característicos de tormentas extratropicales en el Hemisferio Sur (WT's marcados en verde) y, 3) Borrascas locales: sistemas de bajas presiones más locales cuyos centros se localizan próximos a la entrada del Río de la Plata (borde superior derecho de la rejilla). En los paneles c, d y e de la Figura 11 se representa el valor medio de H_s , T_p y dirección media del flujo de energía (Θ_{FE}), respectivamente, obtenidos a partir de los estados de mar horarios correspondientes a cada WT. Se puede observar como los centros de bajas presiones locales producen los oleajes más energéticos en esta localización (mayores H_s y T_p) con direcciones del S. Las situaciones anticiclónicas tienen asociadas oleajes poco energéticos (H_s en torno a 1.0-2.0 m, y T_p del orden de 8.0-9.0 s) procedentes del sector N-E, dependiendo de la localización del centro de altas presiones. Los oleajes asociados a patrones característicos de tormentas extratropicales lejanas son oleajes poco energéticos (H_s del orden de 1.0-2.0 m y T_p de 7.0-9.0 s) con direcciones del SSW al NNW. En este tipo de oleajes puede ser difícil detectar la componente swell del oleaje generada por las tormentas extratropicales de una generación más local del oleaje producida por la intensificación del sistema de altas presiones que suele dominar el oleaje al oeste del Atlántico Sur.

En la Figura 12 y Figura 13 se muestran los WT's y los tipos de oleajes correspondientes a cada patrón en las posiciones [Longitud = -53.0° ; Latitud = -37.5°] y [Longitud = -47.66° ; Latitud = -32.17°], respectivamente. Debido a la aplicación de una clasificación semiguada, los WT's obtenidos en estos dos nodos no son iguales que en el primer nodo analizado, pero sí muy similares. En líneas generales, se pueden observar los tres tipos de patrones sinópticos identificados en la Figura 11: 1) situaciones anticiclónicas; 2) tormentas extratropicales; 3) sistemas locales de bajas presiones.

En el panel b de estas tres figuras se muestra los cambios de las probabilidades de presentación de los WTs durante el periodo 2070-2099 respecto al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5. Se espera un aumento de los WTs correspondientes a situaciones anticiclónicas y una disminución de los WTs característicos de las tormentas extratropicales. Los sistemas frontales de bajas presiones que generan los oleajes más energéticos no se espera que cambien su frecuencia de presentación. En todos los paneles de cada una de las localizaciones se han marcado en rojo varios WTs correspondientes a los sistemas anticiclónicos y en verde los correspondientes a tormentas extratropicales.

El gradiente positivo/negativo del cambio de Hs de Norte a Sur se debe al aumento de la frecuencia de los oleajes asociados a las situaciones anticiclónicas, con un ligero incremento de Hs en el Norte (donde dominan los oleajes de E-NE del anticiclón del Atlántico Sur) que en el Sur (donde domina el oleaje tipo swell generado por las borrascas extratropicales que tienden a desplazarse hacia el polo) El gradiente de cambio de Tp de negativo a positivo de Norte a Sur se debe a que los oleajes asociados a los WTs característicos de tormentas extratropicales aumentan su frecuencia presentando un mayor Tp en el Sur que en el Norte, y a su vez, mayor/menor Tp con respecto a los oleajes asociados a los sistemas anticiclónicos en el Sur/Norte. Por lo tanto, el balance final implica un aumento del Tp en el Sur y una disminución en el Norte. Respecto al giro antihorario de la dirección del oleaje, el aumento de la frecuencia de los sistemas anticiclónicos supone un aumento de la probabilidad de energía del oleaje del NE-E y una disminución de la energía del oleaje procedente del sector S-SE- como consecuencia de la disminución de los oleajes asociados a las tormentas extratropicales.

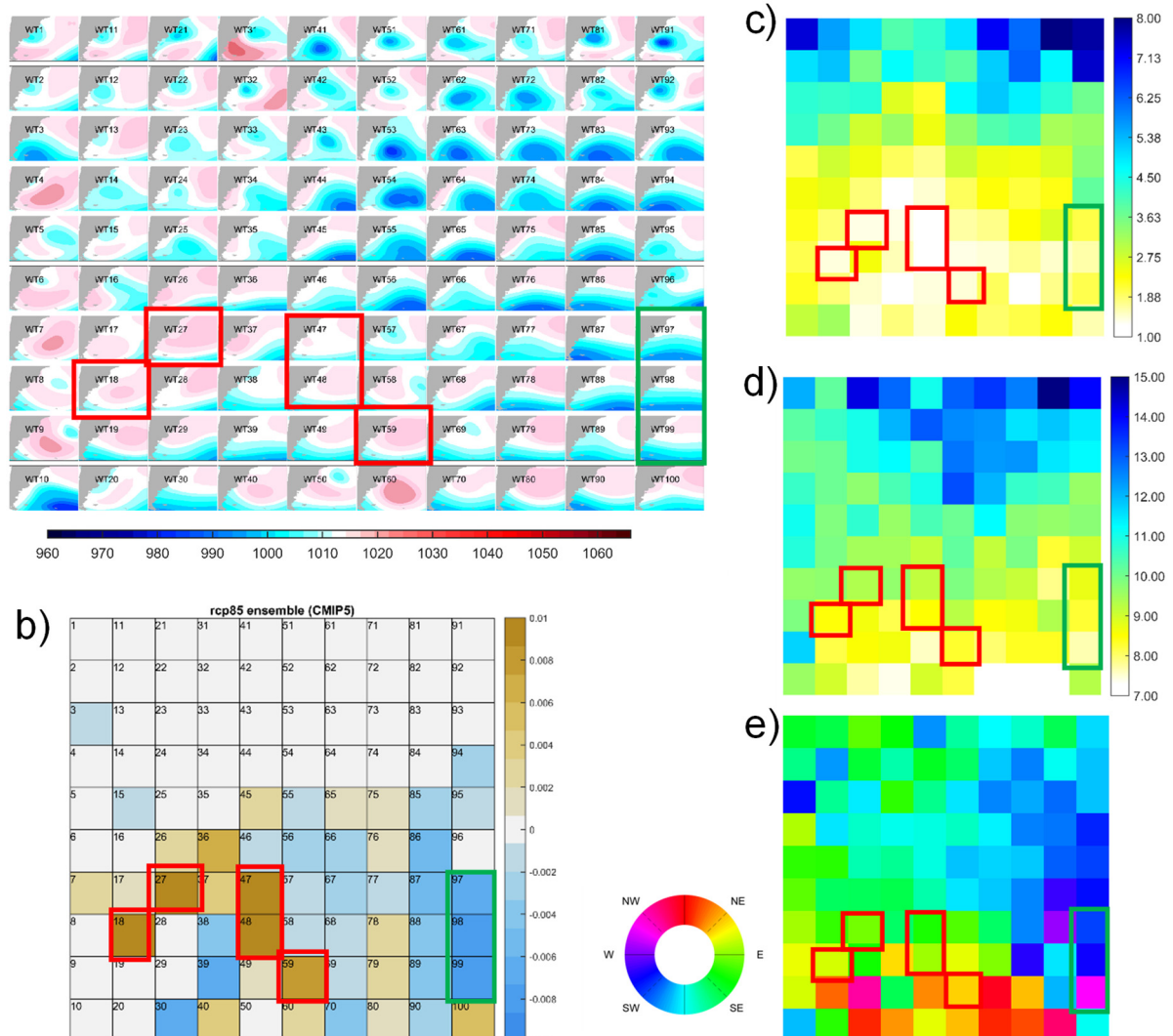


Figura 11. Localización: [Longitud = -57.67°; Latitud = -40.17°]. a) WTs correspondientes a esa localización; b) Cambios en la probabilidad de presentación de los WTs en el periodo futuro 2070-2099 respecto al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5; c) Valor medio de H_s correspondiente a cada WT; d) Valor medio de T_p correspondiente a cada WT; e) Valor medio de Θ_{FE} correspondiente a cada WT.

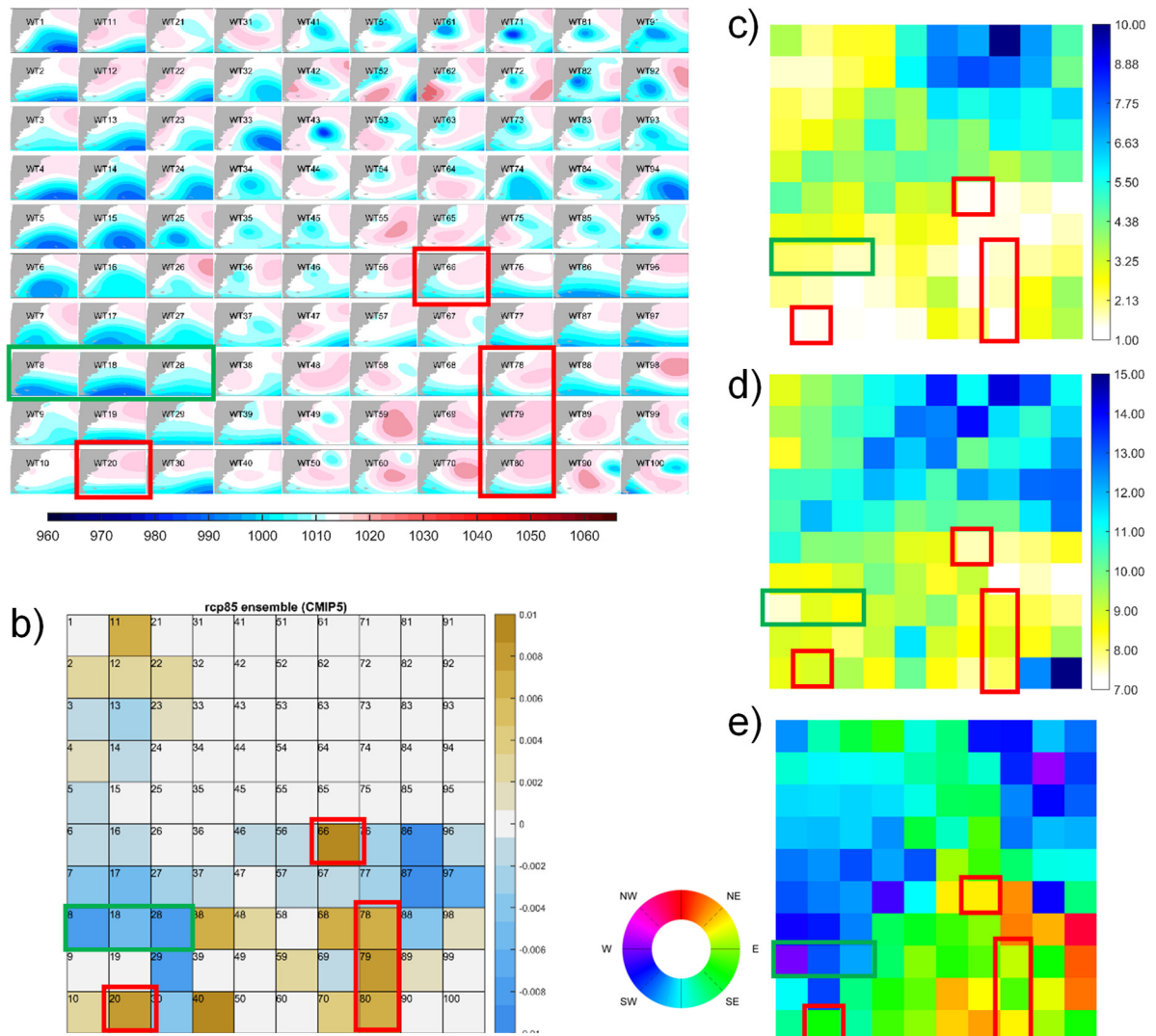


Figura 12. Localización: [Longitud = -53.0°; Latitud = -37.5°]. a) WTs correspondientes a esa localización; b) Cambios en la probabilidad de presentación de los WTs en el periodo futuro 2070-2099 respecto al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5; c) Valor medio de Hs correspondiente a cada WT; d) Valor medio de Tp correspondiente a cada WT; e) Valor medio de Θ_{FE} correspondiente a cada WT.

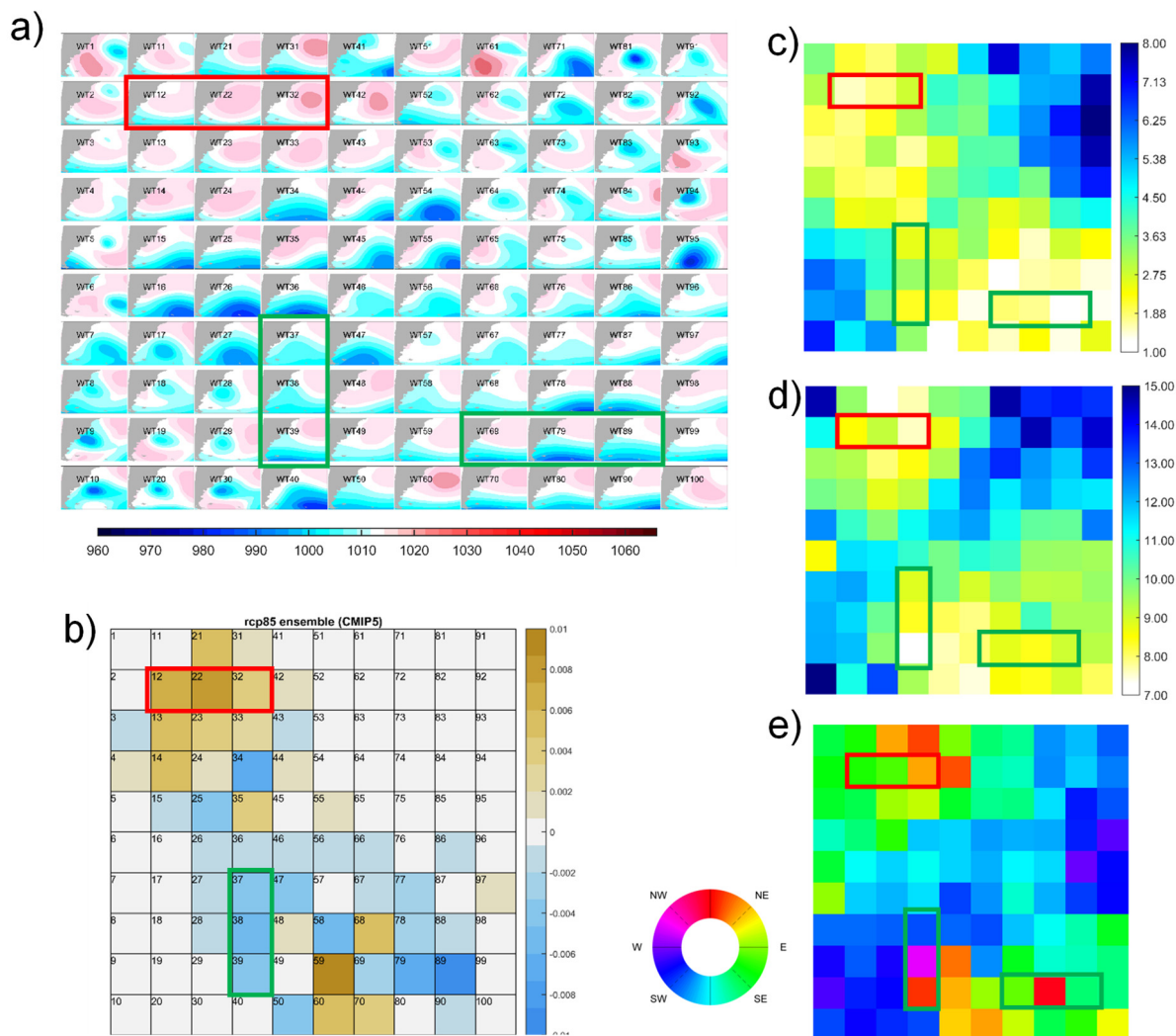


Figura 13. Localización: [Longitud = -47.66°; Latitud = -32.17°]. a) WTs correspondientes a esa localización; b) Cambios en la probabilidad de presentación de los WTs en el periodo futuro 2070-2099 respecto al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5; c) Valor medio de Hs correspondiente a cada WT; d) Valor medio de Tp correspondiente a cada WT; e) Valor medio de θ_{FE} correspondiente a cada WT.

En la Figura 14 se muestran los WTs correspondientes al nodo [Longitud = -53.0927°; Latitud = -33.596°] localizado próximo a la costa en la entrada de la desembocadura del Río de la Plata. La variedad de patrones es muy similar a los nodos analizados previamente. En el panel b se muestran los espectros medios correspondientes a cada WT, pudiéndose observar la diversa composición energética del oleaje. Los patrones correspondientes a las situaciones anticiclónicas tienen asociados oleajes cuyas componentes espectrales más energéticas se concentran en las direcciones entorno al E y periodos pequeños (p.j., WTs marcados en rojo). Los WTs representativos de las tormentas extratropicales están asociados a oleajes cuya energía se concentra en direcciones del SE y periodos altos. Es importante señalar que el oleaje en esta localización ha sufrido una importante refracción por lo que la dirección media de la energía del oleaje se concentra en el sector SE. Los espectros más energéticos, localizados en la esquina inferior derecha e izquierda, están asociados a sistemas locales

de baja presión. El aumento de los WTs característicos de los anticiclones produce un incremento de la energía del oleaje generada localmente del sector NE-SE (marcados en rojo en la Figura 14) mientras que la disminución de los WTs característicos de tormentas extratropicales se refleja en una disminución de la energía con mayor periodo del sector SSW-SE (marcados en verde en la Figura 14). La combinación del aumento y disminución de estos tipos de WTs y los patrones espectrales asociados se refleja en los cambios del espectro total (panel e de la Figura 14). El análisis de los cambios en el espectro permite verificar los cambios que se esperan en el interior del Río de la Plata: un aumento de la altura de ola y una disminución del periodo de pico debido al aumento de la energía de las componentes espectrales del sector NE-SE de periodo pequeño y la disminución de la energía de las componentes espectrales del sector SE-SSW de mayor periodo pero menos energéticas que las anteriores.

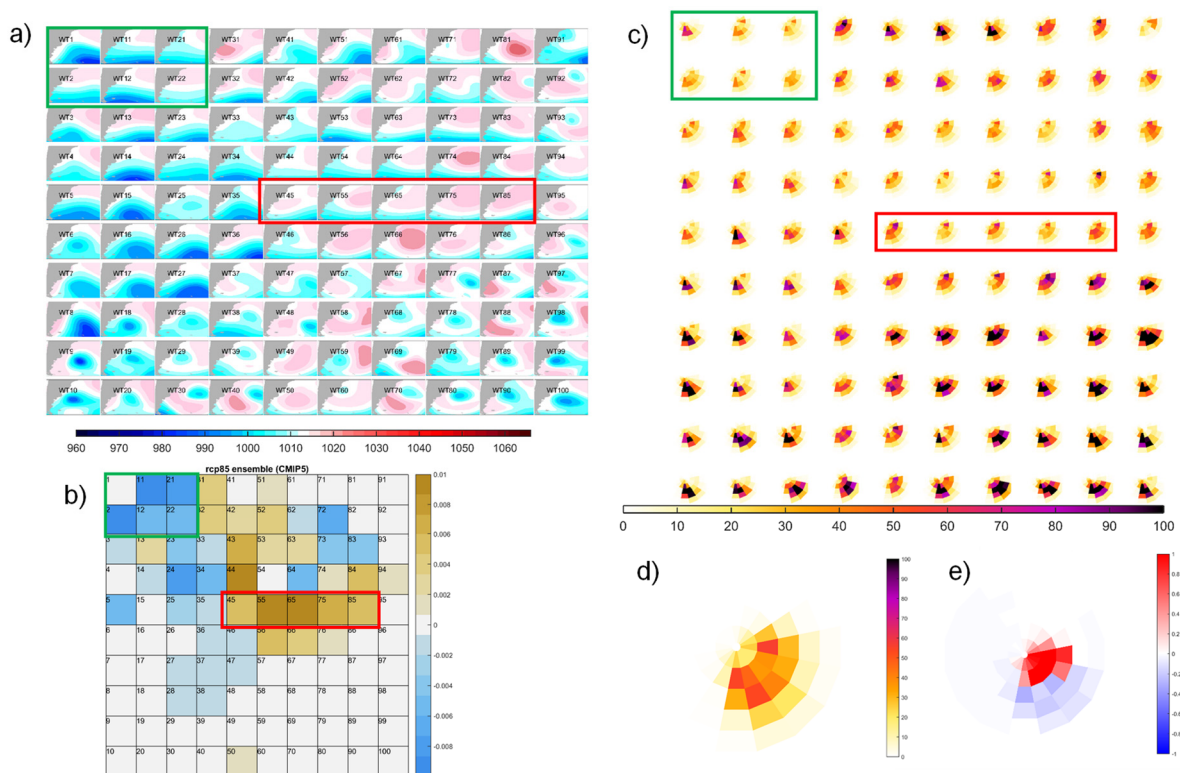


Figura 14. Localización: [Longitud = -53.0927°; Latitud = -33.596°]. a) WTs correspondientes a esa localización; b) Cambios en la probabilidad de presentación de los WTs en el periodo futuro 2070-2099 respecto al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5; c) Espectro medio correspondiente a cada WT; d) Espectro medio total; e) Cambios en el espectro medio en el periodo futuro 2070-2099 respecto al periodo histórico 1975-2005.

En la Figura 15. se muestran las proyecciones de la media y el percentil 95% de la altura de ola significativa, el periodo de pico y la dirección media del oleaje a lo largo de la costa de Uruguay. Se ha representado la incertidumbre de los cambios mediante el rango de la variabilidad intermodelo (distribución de los cambios obtenidos a partir del conjunto de los 30 GCMs). El rango intercuartílico de los cambios de la media y el percentil 95% de la altura de ola significativa es similar a la magnitud de los cambios. En el caso del periodo de pico y la dirección media del oleaje, se han detectado uno o dos valores atípicos, correspondientes a las proyecciones de uno o dos GCMs, alcanzándose valores máximos de cambio del orden del doble de la magnitud que la mediana.

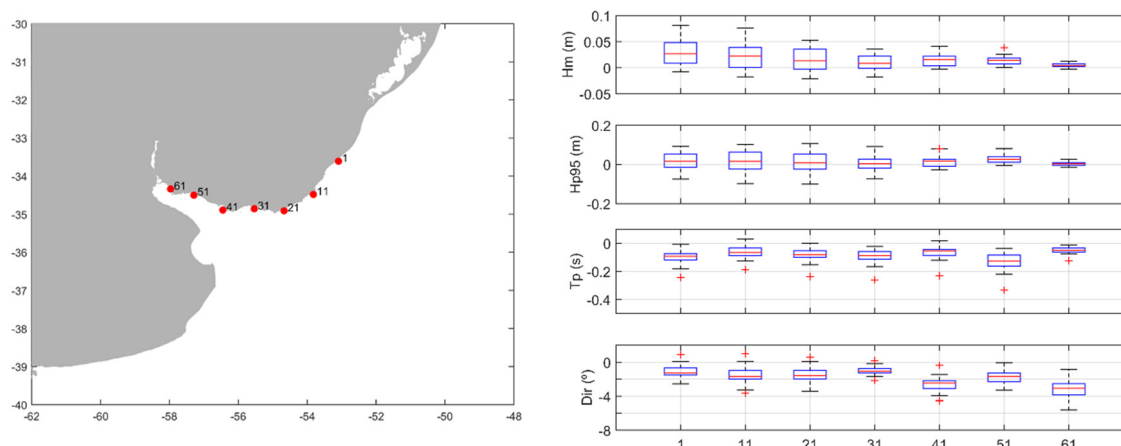


Figura 15. Proyecciones multi-modelo a lo largo de la costa del Río de la Plata de la media y el percentil 95% de la altura de ola significativa, el periodo de pico y la dirección media del oleaje en el periodo futuro 2070-2099 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5.

En la Figura 16 se muestra la media y el percentil 95% del residuo del nivel del mar obtenido a partir de los 30 GCMs en la zona costera e interior del Río de la Plata, junto con los cambios proyectados para el periodo 2070-2100, relativo al periodo histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5. Estos resultados indican un descenso del valor medio del residuo del nivel del mar del orden de 0.010 m en la costa exterior del Río de la Plata y del orden de los 0.015 m en el percentil 95% en prácticamente todo el dominio.

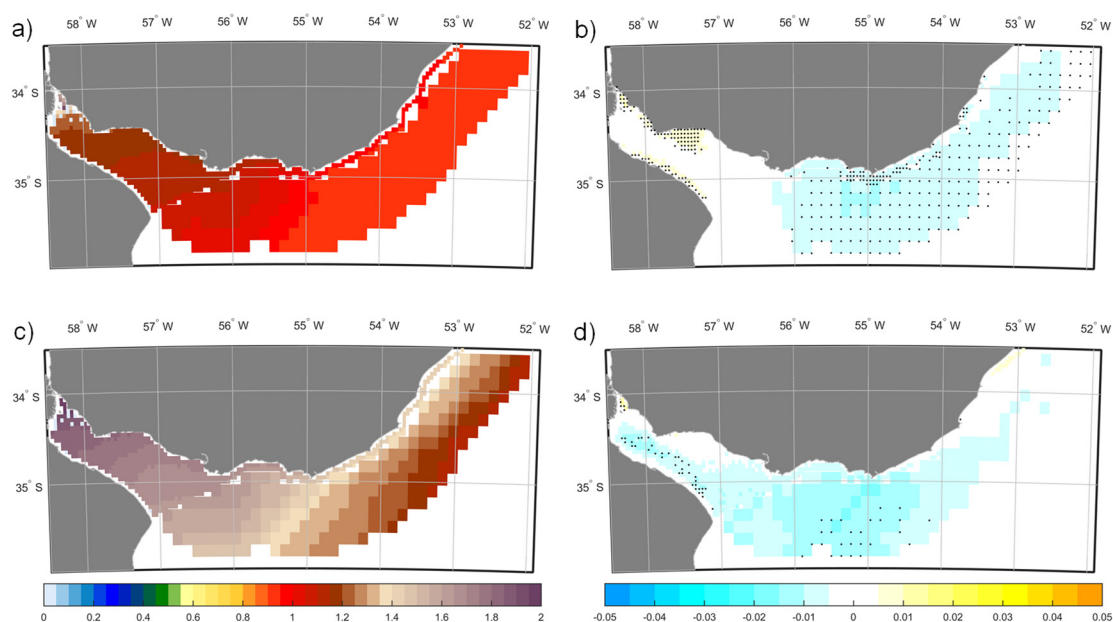


Figura 16. Proyecciones multi-modelo en el Río de la Plata del residuo del nivel del mar: a y c) Valor medio y percentil 95% (en metros) en el periodo histórico 1979-2005, respectivamente; b y d) cambios en el valor medio y percentil 95% del residuo del nivel del mar (en metros) en el periodo futuro 2070-2100 relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP8.5. Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

2.4. RESUMEN

El objetivo principal de esta tarea es obtener unas proyecciones robustas del clima marítimo (oleaje y residuo del nivel del mar). El coste computacional y la estimación de los cambios futuros de las dinámicas marinas para un elevado número de GCMs han condicionado la aproximación aplicada para la generación de las proyecciones de cambio climático. Por estos motivos:

- Se ha utilizado un modelo de downscaling estadístico basado en WTs para la proyección del clima marítimo (oleaje y residuo del nivel del mar). Los WTs se han definido a partir de las presiones al nivel del mar medias 2-diarias sobre un área espacial que abarca la zona occidental del Atlántico Sur. Se ha aplicado una clasificación semiguada con información sobre el predictando multivariado (H_s , T_p , Θ) para obtener unos patrones con una mayor representatividad del clima marítimo en cada nodo. Esto implica una clasificación particular para cada nodo. Para las proyecciones a futuro del residuo del nivel del mar ha sido empleada la clasificación guiada obtenida para el caso del oleaje.
- Las proyecciones han sido realizadas para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para los periodos de tiempo futuros 2201-2039, 2040-2069, 2070-2099. Para ello se han empleado 30 GCMs lo que permite la determinación de la robustez de las proyecciones (más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio y la variación media de la media multi-modelo supera la

desviación estándar intermodelo) y la cuantificación de la incertidumbre (distribución de los cambios del conjunto de los 30 GCMs).

- En los 100 WTs obtenidos en cada nodo considerado de la base de datos del oleaje se identifican a grandes rasgos tres tipos de patrones sinópticos: 1) situaciones anticiclónicas; 2) borrascas extratropicales; 3) borrascas locales. En las proyecciones de cambio climático de las probabilidades de los WTs, se ha observado un incremento de las situaciones anticiclónicas y una disminución de las tormentas extratropicales. Esta tendencia puede verse en la Figura 17 para tres distintos periodos de tiempo y los dos escenarios considerados, con una intensificación de los cambios a lo largo del siglo XXI y sobre todo para el escenario RCP8.5.
- Los cambios de los patrones atmosféricos se reflejan en un aumento de los oleajes del Este (con alturas de ola del orden de 1.0-2.0 m y periodos den torno a 8.0-9.0 s) y una disminución de los oleajes del S (con periodos mayores). La distribución espacial de Hs y Tp correspondiente a los oleajes asociados a estos dos tipos de WTs (los oleajes correspondientes a anticiclones presentan un gradiente meridional de Hs que desciende de N a S, al contrario que los oleajes generados por los ciclones extratropicales dan lugar a un gradiente de cambios en Hs de positivo a negativo de N a S y un gradiente de cambios en Tp de negativo a positivo de N a S. Respecto a los cambios en la dirección media del oleaje, se espera un giro en sentido antihorario del oleaje en toda la zona de estudio debido al aumento de la energía del oleaje del E. La magnitud de los cambios de Hs es del orden de 0.03-0.04 m para los incrementos y 0.04-0.05 m para las disminuciones. Los cambios positivos de Tp son del orden de 0.05 s y los negativos del orden de 0.1 s. El giro antihorario del oleaje se espera entre 3-6°. Los cambios en el residuo del nivel del mar son del orden de 0.01-0.015. Estos valores son para el escenario RCP8.5 a final de siglo (2070-2099).
- A modo de resumen se muestran los cambios relativos (expresados en %) en el Río de la Plata en el percentil 95% de la altura de ola significativa (Figura 18), el periodo de pico medio (Figura 19), la dirección media del oleaje (Figura 20) y el residuo medio del nivel del mar (Figura 21) para los tres periodos de tiempo (2010-2039, 2040-2069, 2070-2099) y dos escenarios (RCP4.5, RCP8.5). En todos los parámetros del oleaje y del residuo del nivel del mar analizados, se observa una intensificación de la magnitud de los cambios (positiva o negativa) a lo largo del siglo XXI, siendo más notable estos cambios para el escenario RCP8.5. Se espera aumentos de Hs del 4% para fin de siglo en el escenario RCP8.5; una disminución máxima de Tp del orden de 3% en el interior del Río de la Plata; giro hacia el E del oleaje del orden de los 3-4° en el interior del Río de la Plata, y aumentos del residuo del nivel del mar menores al 1%.

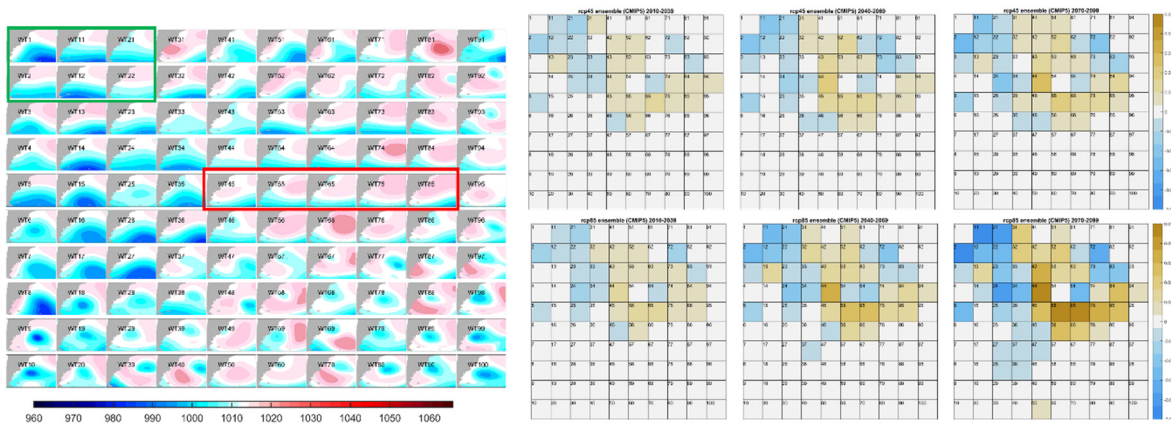


Figura 17. WTs correspondientes al nodo [longitud = -53.0927°; Latitud = -33.596°]. Cambios en la probabilidad de presentación de los WTs, obtenidos a partir del conjunto de los 30 GCMs, para los periodos futuros 2010-2039 (columna izquierda), 2040-2069 (columna central), 2070-2099 (columna derecha) relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP4.5 (fila superior) y RCP8.5 (fila inferior).

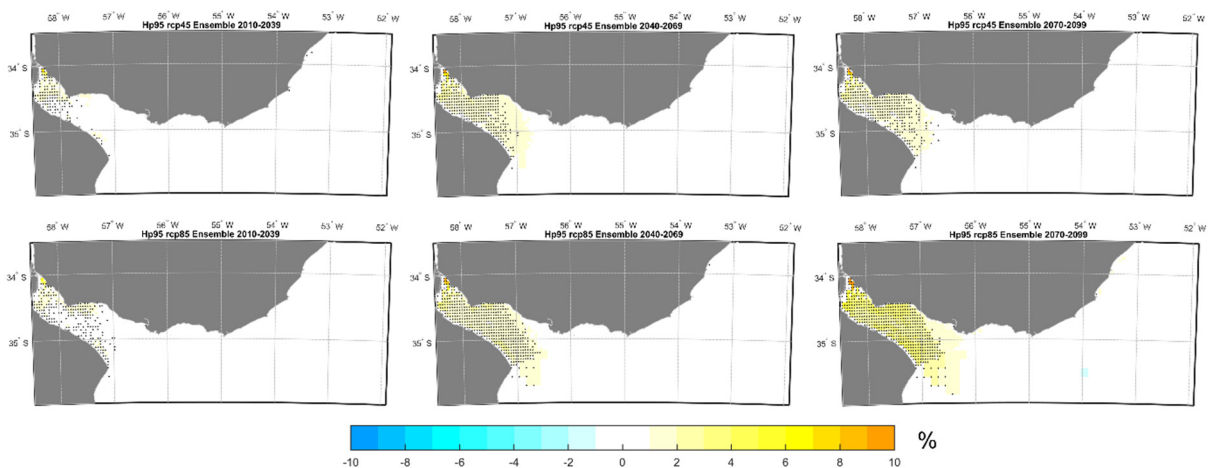


Figura 18. Proyecciones multi-modelo en el Río de la Plata del percentil 95% de la altura de ola significativa (expresados en %) a partir del conjunto de los 30 GCMs para los periodos futuros 2010-2039 (columna izquierda), 2040-2069 (columna central), 2070-2099 (columna derecha) relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP4.5 (fila superior) y RCP8.5 (fila inferior). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

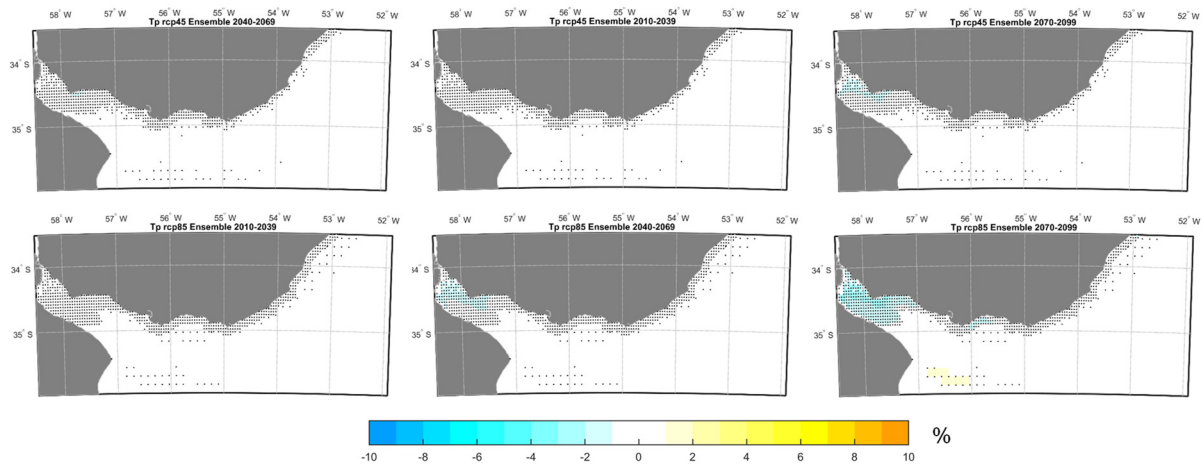


Figura 19. Proyecciones multi-modelo en el Río de la Plata del periodo de pico medio (expresados en %) a partir del conjunto de los 30 GCMs para los periodos futuros 2010-2039 (columna izquierda), 2040-2069 (columna central), 2070-2099 (columna derecha) relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP4.5 (fila superior) y RCP8.5 (fila inferior). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

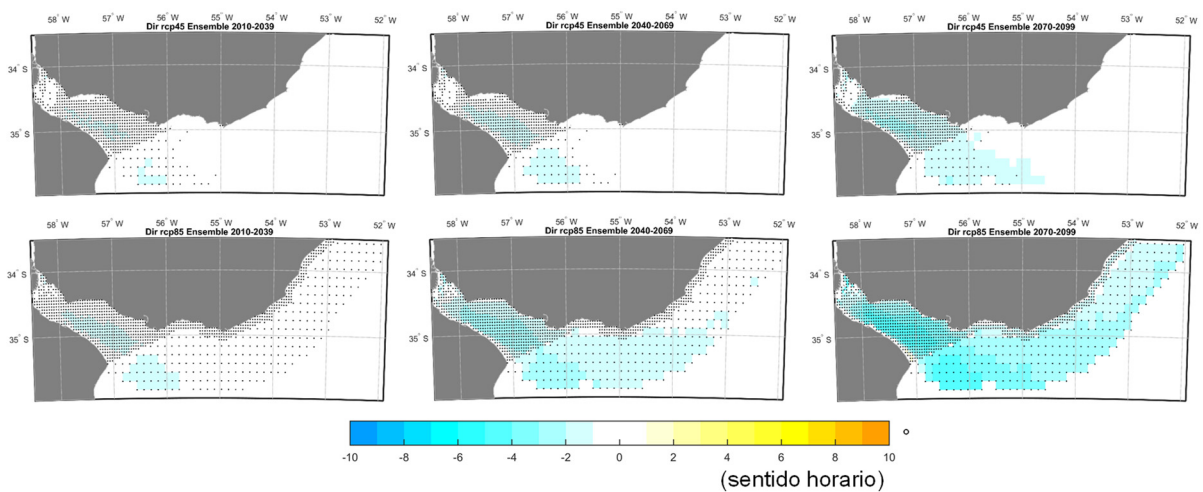


Figura 20. Proyecciones multi-modelo en el Río de la Plata de la dirección media del oleaje (expresados en %) a partir del conjunto de los 30 GCMs para los periodos futuros 2010-2039 (columna izquierda), 2040-2069 (columna central), 2070-2099 (columna derecha) relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP4.5 (fila superior) y RCP8.5 (fila inferior). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

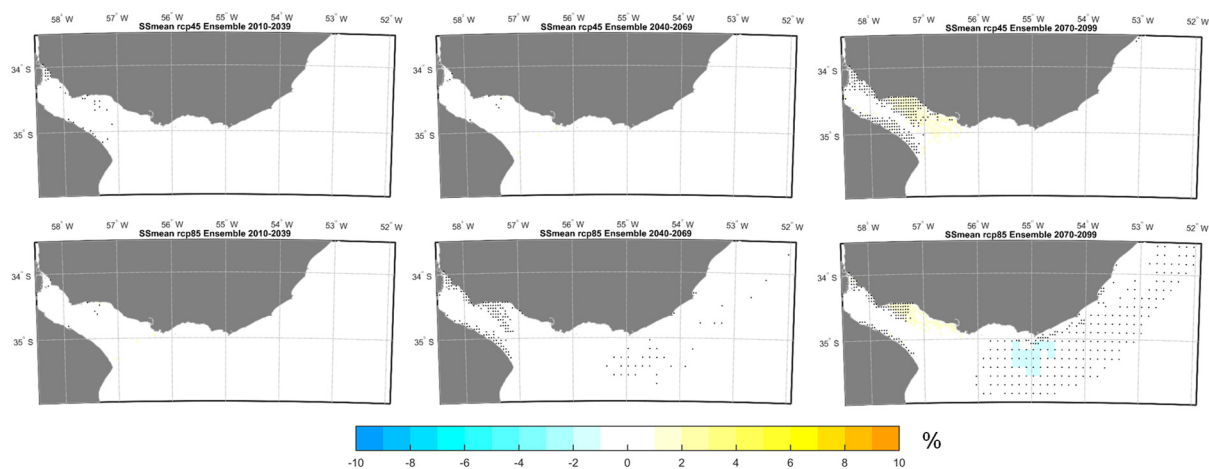


Figura 21. Proyecciones multi-modelo en el Río de la Plata del residuo medio del nivel medio (expresados en %) a partir del conjunto de los 30 GCMs para los periodos futuros 2010-2039 (columna izquierda), 2040-2069 (columna central), 2070-2099 (columna derecha) relativo al clima presente (1979-2005) para el escenario RCP4.5 (fila superior) y RCP8.5 (fila inferior). Los nodos marcados con un punto informan que los cambios son robustos (la variación media de la media multi-modelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCMs coinciden en el signo del cambio).

3. PROYECCIONES REGIONALES DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN URUGUAY.

Las proyecciones de Nivel Medio del Mar (NMM) proporcionan las variaciones (incrementos) estimados 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 utilizados 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 afectar a cambios en zonas remotas a dónde ocurre este proceso (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.

Las proyecciones del NMM ante escenarios climáticos que se proporciona en esta sección se han recopilado a partir de los resultados obtenidos mediante las simulaciones climáticas globales recogidas por el CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project). En particular, a partir de los resultados de 21 modelos AOGCM (modelos de circulación acoplada atmósfera-océano), asociados con modelos sobre las capas de hielo terrestre. Los 21 modelos a partir del cual se ha estimado el 'ensemble' son: ACCESS1-0, ACCESS1-3, CCSM4, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ES-M2G, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M, NorESM1-ME, e INMCM4. 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.

Es importante mencionar que los cambios regionales pueden diferir substancialmente 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. A modo de ejemplo, se muestran los resultados de los valores medios estimados para el ensemble de 21 modelos para una ubicación representativa de la costa de Uruguay en aguas abiertas (situado a 55.5°O y 35.5°S). En la Figura 22 se observa como la contribución asociada al calentamiento del Atlántico Sur, aporte de glaciares y masas polares contribuyen notablemente a la subida del NMM proyectada.

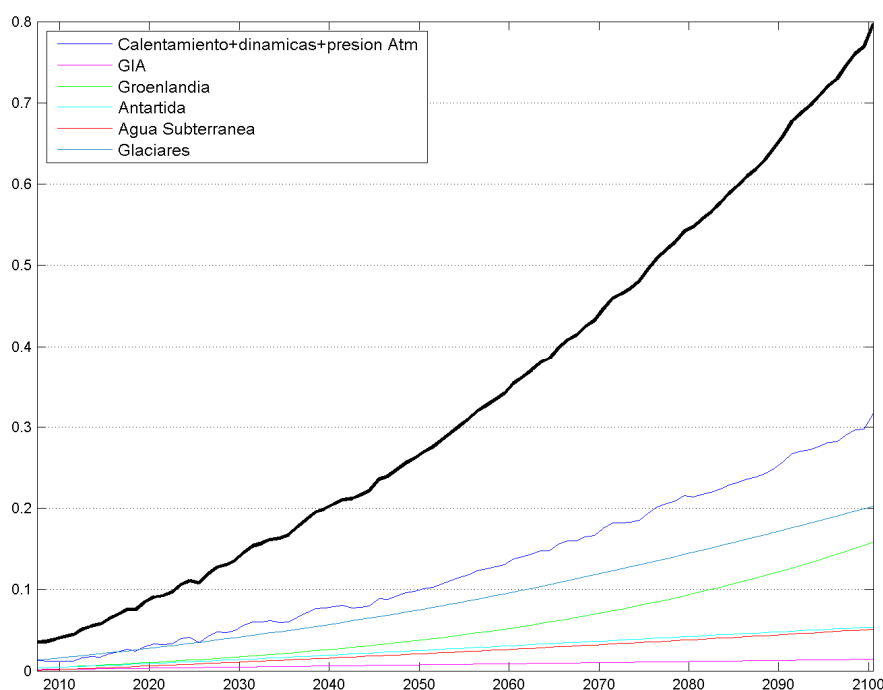


Figura 22. Serie temporal anual, total (línea negra) y para diferentes procesos físicos, de los incrementos en el NMM (en metros) medios del ensemble para el escenario RCP8.5.

A partir de la base de datos descrita (resolución de 0.5° en longitud y 1° en latitud), se muestran los resultados estimados de cambio a fin del siglo XXI para los escenarios RCP4.5 y 8.5 (Figura 23, Figura 24, respectivamente), así como las bandas de confianza al 90% a modo de indicador de la incertidumbre de estas estimaciones. Las estimaciones a fin de siglo se han estimado comparando el periodo 2081-2100 con respecto al clima presente del periodo de referencia: 1986-2005. Para todas las estimaciones el incremento de NMM es mayor en la cuenca oceánica y disminuye a lo largo del litoral uruguayo. La estimación media de incremento para el escenario RCP4.5 próxima al Rio de la Plata se encuentra entre 40 y 45 cm, mientras que el incremento estimado ante el escenario RCP8.5 se encuentra entre 55-60 cm.

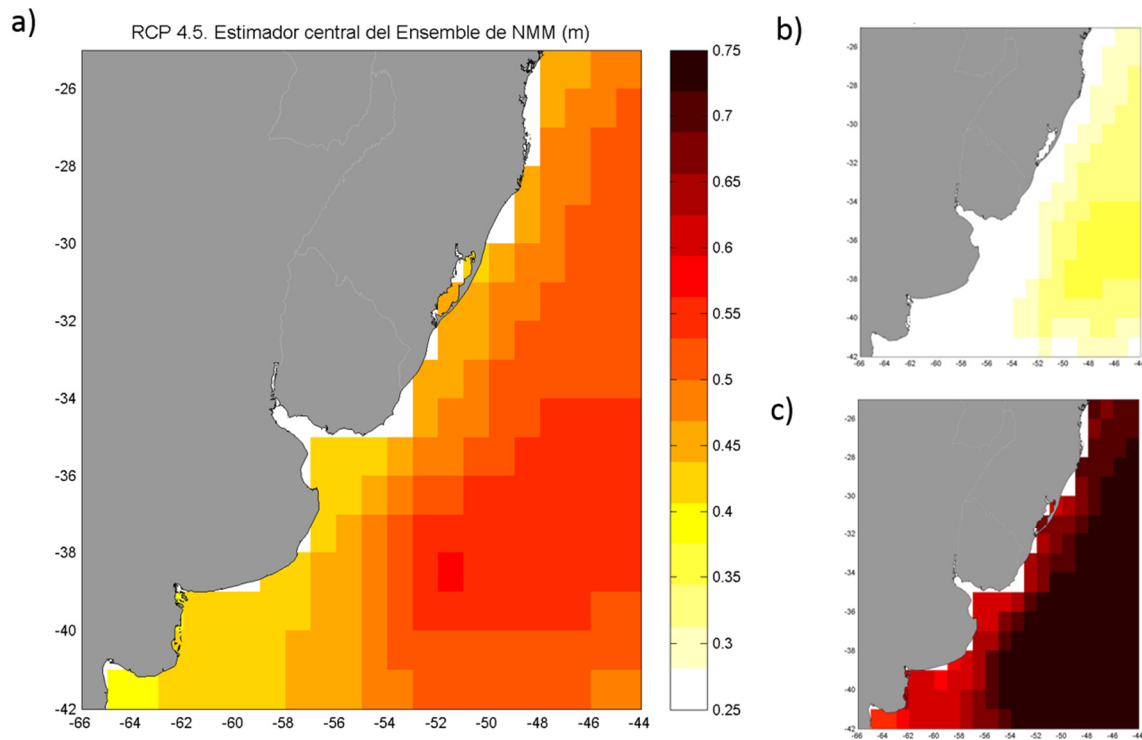


Figura 23. a) Incremento del NMM (metros) medio para el ensemble de 21 modelos. El incremento representa la diferencia media estimada para periodo 2081-2100 con respecto 1986-2005, ante el escenario RCP4.5. b) Incremento del NMM asociado al percentil del 5% de los miembros del ensemble. c) Incremento del NMM asociado al percentil del 95% de los miembros del ensemble.

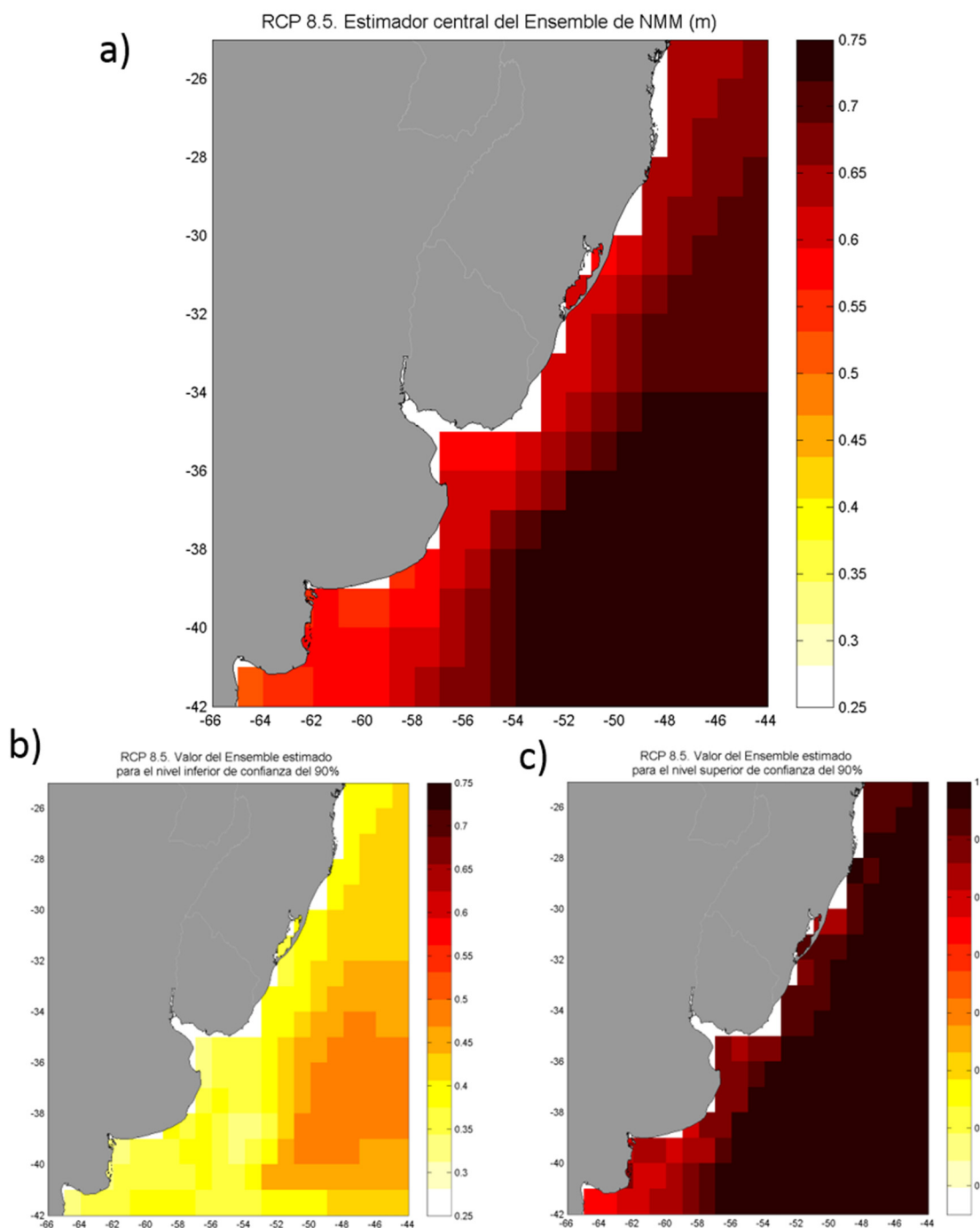


Figura 24. a) Incremento del NMM (metros) medio para el ensemble de 21 modelos. El incremento representa la diferencia media estimada para periodo 2081-2100 con respecto 1986-2005, ante el escenario RCP8.5. b) Incremento del NMM asociado al percentil del 5% de los miembros del ensemble. c) Incremento del NMM asociado al percentil del 95% de los miembros del ensemble.

Los resultados se muestran a escala regional. Es importante resaltar que no se dispone de modelos regionales climáticos (RCMs) que permitan un downscaling en el Río de la Plata, teniendo en cuenta factores locales como la batimetría, aporte detallado de agua dulce a partir de los ríos, y sistemas de circulación marinos del estuario. No obstante, a modo de indicador, se proporcionan las estimaciones medias y niveles asociados a la banda de confianza inferior y superior del 90% para la ubicación de Uruguay en aguas abiertas descrita anteriormente.

RCP4.5		RCP8.5	
Media	[Percentiles 5-95%]	Media	[Percentiles 5-95%]
41,8	[25,6-60,3]	57,9	[35,2-85,4]

Tabla 2. Valores medios y rango, a partir de las bandas de confianza del 90%, de incremento del NMM (en cm) estimado a fin de siglo XXI a partir del ensemble de 21 modelos del CMIP5 para dos escenarios climáticos. Los incrementos se han estimado mediante comparativa del periodo 2081-2100 con respecto a 1986-2005.

4. REFERENCIAS

- Alves, J. H. G. M. and Melo, E. (2001). Measurement and modeling of wind waves at the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *Rev. Bras. Oceanogr*, vol.49, n.1-2, pp.13-28.
- Camus, P., Losada, I.J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., Pérez, J. (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. *Earth's Future*, 5 (9), pp. 918-933.
- Camus, P., A. Rueda, F. J. Méndez, and I. J. Losada (2016). An atmospheric-to-marine synoptic classification for statistical downscaling marine climate, *Ocean Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s10236-016-1004-5>.
- Camus, P., Menéndez, M., Méndez, F.J., Izaguirre, C., Espejo, A., Cánovas, V., Pérez, J., Rueda, A., Losada, I.J., Medina, R. (2014). A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate. *Journal of Geophysical Research*, DOI: 10.1002/2014JC010141.
- Cannon, A. J. (2012), Regression-guided clustering: A semi-supervised method for circulation-to-environment synoptic classification, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 51, 185–190.
- Dragani, W.C., Cerne, B.S., Campetella, C.M., Possia, N.E., Campos, M.I. (2013). Synoptic patterns associated with the highest wind-waves at the mouth of the Río de la Plata estuary, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Volumes 61-62, 1-13,
- Erikson, L. H., C. A. Hegermiller, P. L. Barnard, P. Ruggiero, and M. vanOrmond (2015), Projected wave conditions in the Eastern North Pacific under the influence of two CMIP5 climate scenarios, *Ocean Model.*, 96, 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.07.004>.
- Escobar, G., Vargas, W., Bischoff, S. (2004). Wind tides in the Rio de la Plata estuary: meteorological conditions. *International Journal of Climatology*, 24: 1159–1169.
- Gutiérrez, J. M., D. San-Martín, S. Brands, R. Manzanas, and S. Herrera (2013). Reassessing Statistical Downscaling Techniques for Their Robust Application under Climate Change Conditions. *Journal of Climate* 26 (1): 171–188. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00687.1>.
- Hemer, M. A., and C. E. Trenham (2016). Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble, *Ocean Model.*, 103, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.10.009>.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463 (7282), 747–756. doi: 10.1038/nature08823 .
- Mori, N., T. Yasuda, H. Mase, T. Tom, and Y. Oku (2010), Projection of extreme wave climate change under global warming, *Hydrol. Res. Lett.*, 4, 15–19. <https://doi.org/10.3178/hrl.4.15>.
- Perez, J., Menendez, M., Camus, P., Mendez, F.J., Losada, I.J. (2015). Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe. *Ocean Modelling*, 96, 161-170.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M.H.,

Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 91 (8), 1015–1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1 .

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Yu.-T., Chuang, H.-ya, Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M.P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *J. Clim.* 27 (6), 2185–2208. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1 .

Semedo, A., R. Weisse, A. Behrens, A. Sterl, L. Bengtsson, and H. Günther (2013), Projection of global wave climate change toward the end of the twenty-first century, *J. Clim.*, 26(21), 8269–8288. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00658.1>.

Wang, X.L., Swail, V.R., Cox, A. (2010). Dynamical versus statistical downscaling methods for ocean wave heights. *Int. J. Climatol.* 30, 317–332. doi: 10.1002/joc.1899.