

# NAP Costas

Variabilidad y cambios  
esperables bajo  
distintos escenarios de  
cambio climático de  
nivel de mar y oleaje  
en la costa uruguaya



Ministerio  
de Ambiente



Con el apoyo de:



Universidad de la República -Facultad de Ingeniería – IMFIA  
Grupo de Estudios Fluviales y Marítimos

**Informe de actividades en el marco del proyecto:  
URU/18/002 Integración del enfoque de adaptación en  
ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay**

## **Entregable E.2.1**

<u>Documento:</u>	IMFIA_CCURU1_E.2.1	
<u>Versión</u>	1.0	
<u>Fecha:</u>	04/04/2019	
<u>Autores:</u>	Rodrigo Alonso Mónica Fossati Pablo Santoro Sebastián Solari	IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR
<u>Contraparte:</u>	Mónica Gómez Iñigo Losada Melisa Menéndez Juan Ortiz Magdalena Preve Myrna Campoleoni	Cambio Climático MVOTMA IH Cantabria IH Cantabria IH Cantabria PNUD PNUD

---

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción .....	2
2	Objetivo.....	2
3	Metodología .....	3
3.1	Generación y propagación de ondas de marea .....	3
3.2	Generación y propagación del oleaje.....	4
4	Resultados.....	5
4.1	Nivel de mar total.....	5
4.2	Marea astronómica y residuo meteorológico.....	8
4.3	Oleaje .....	13
5	Discusión y Conclusiones.....	17
6	Referencias.....	18

---

## **1 INTRODUCCIÓN**

El presente documento constituye el Entregable E.2.1 del convenio firmado entre la Universidad de la República (Facultad de Ingeniería; UdelaR-FING) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) URU/18/002 “Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay”.

Dicho proyecto se propone fortalecer las capacidades de las instituciones de Uruguay (academia e instituciones de Gobierno a nivel nacional y departamental) para la identificación de los impactos y las vulnerabilidades originadas por la variabilidad y el cambio climático en centros urbanos e infraestructuras costeras y zonas adyacentes. A su vez, se busca fortalecer las capacidades tanto de las instituciones de Gobierno como del resto de los actores involucrados en la definición de estrategias y acciones que posibiliten el incremento de la resiliencia ante los impactos generados por la variabilidad y el cambio climático en la zona costera.

En el primer entregable se incluyó el trabajo realizado en la Actividad 1, cuyo objetivo era la generación de bases de datos históricas de dinámica atmosférica, marítima y fluvial. Esta información fue transferida a diversas instituciones uruguayas, las cuales serán capacitadas para su uso en el marco de la actividad 5, así como al IH-Cantabria, que la está utilizando para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en la costa.

El objetivo de la Actividad 2 del proyecto es caracterizar para las variables marinas la variabilidad y los cambios esperables bajo distintos escenarios de cambio climático. En el marco de esta Actividad se definió en conjunto con IH-Cantabria el estudio que se presenta en este documento.

El documento IH-Cantabria (2019) presenta las proyecciones de cambio de la dinámica marina (oleaje, marea meteorológica y nivel medio del mar) en la costa uruguaya para distintos escenarios de cambio climático y distintos horizontes. Para el oleaje y la marea meteorológica (o residuo meteorológico) dichas proyecciones se obtuvieron mediante técnicas de downscaling estadístico, las cuales por su naturaleza se enfocan únicamente en cuantificar los cambios de la dinámica marina producidos por cambios en la frecuencia de ocurrencia de los patrones de circulación atmosférica característicos de la región. De esta forma, las proyecciones incluidas en IH-Cantabria (2019) no contemplan potenciales cambios en el oleaje y las mareas producto del aumento del nivel medio del mar (NMM), el cual podría ser relevante en la plataforma continental y en particular en las zonas de menor profundidad de la costa uruguaya.

El trabajo que se presenta en este documento analiza esta interacción entre el aumento del NMM y la generación y propagación del oleaje y las ondas de marea, resultando así complementario al estudio presentado en IH-Cantabria (2019).

## **2 OBJETIVO**

Estimar y analizar el potencial efecto del aumento del NMM debido al cambio climático, sobre la generación y propagación de las ondas de marea (astronómica y meteorológica) y el oleaje en la costa de Uruguay.

---

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Generación y propagación de ondas de marea

La metodología seguida se basa en actualizar las condiciones iniciales y de borde (incorporando el efecto del aumento del NMM) de la implementación del modelo TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007) realizada en etapas previas del proyecto. El objetivo de dicha implementación fue realizar simulaciones retrospectivas (hindcast) cubriendo el período 1985 – 2016 (IMFIA, 2018). Se cuenta con el modelo hidrodinámico TELEMAC2D implementado para el Río de la Plata, calibrado y validado en base a información de niveles medidos en diversas estaciones de la costa Uruguaya. La implementación del modelo considera los principales forzantes del sistema incluyendo las mareas provenientes del Océano Atlántico, los caudales fluviales (Paraná y Uruguay) y el viento en superficie, siendo capaz de reproducir satisfactoriamente las principales características de la dinámica del Río de la Plata. Los detalles acerca de dicha implementación se encuentran en IMFIA (2018).

Los escenarios considerados se obtienen de IH-Cantabria (2019) y surgen de las 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). A partir de los resultados obtenidos mediante las simulaciones climáticas globales recogidas por el CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), con una resolución espacial de 0.5° en longitud y 1° en latitud, la Tabla 1 muestra las estimaciones medias y niveles asociados a la banda de confianza inferior y superior del 90% para la zona de aguas abiertas de Uruguay (ubicación de referencia 55.5°O y 35.5°S).

**Tabla 1: 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. Extraído de Cantabria (2019)**

RCP4.5		RCP8.5	
Media	[Percentiles 5% - 95%]	Media	[Percentiles 5% - 95%]
41.8	[25.6 – 60.3]	57.9	[35.2 – 85.4]

A partir de dichas proyecciones se simulan dos escenarios, correspondientes al valor medio y percentil superior del RCP8.5 (57.9cm y 85.4cm respectivamente). La metodología seguida consiste en modificar las condiciones de borde de nivel en la frontera oceánica del dominio del modelo numérico, así como la condición inicial de la simulación, según se especifica a continuación.

Las ondas de marea relevantes para la hidrodinámica en todo el Río de la Plata son impuestas en los nodos correspondientes a la frontera oceánica del modelo y los valores impuestos provienen del modelo ASTide presentado en IMFIA (2018). La condición de borde impuesta en cada nodo de la frontera oceánica es de tipo Dirichlet, esto es, se impone el valor de la variable en cuestión. Se procedió entonces a incrementar el valor medio de las series de niveles

---

generadas por el modelo ASTide en la frontera oceánica acorde a los incrementos de NMM de los escenarios que se simulan.

A su vez, el modelo requiere la especificación de una condición inicial para las variables del sistema, es decir, para la elevación de la superficie libre y la velocidad en cada nodo del dominio. La condición inicial para la elevación de la superficie es un valor uniforme en todo el dominio de cálculo, igual a +1,489m y +1,764m respecto al cero Wharton en los escenarios de incremento de NMM RCP8.5 Central y RCP8.5 Extremo (95%), respectivamente. Dichos valores surgen de sumar los incrementos proyectados del NMM al valor del NMM utilizado en IMFIA (2018) para las simulaciones correspondientes al clima actual (+0,91 m respecto al Wharton).

Bajo estas configuraciones se simuló el período 1985 – 2016 para ambos escenarios. Cabe destacar que las simulaciones realizadas consideran únicamente el efecto del incremento en el NMM, no se realizaron modificaciones en los caudales afluentes, forzantes meteorológicos, ni mareas en la frontera oceánica.

### ***3.2 Generación y propagación del oleaje***

Visto el elevado costo computacional de modelar el oleaje en el período 1985-2016 para los dos escenarios considerados anteriormente, se optó por modelar únicamente aquellos años en que los resultados del hindcast presentaban los mayores valores de nivel de mar y oleaje. Los dos años elegidos fueron 1989 y 2016, siendo estos años en que ocurrieron eventos particularmente severos de nivel de mar y oleaje en el Río de la Plata (1989) y en la costa Atlántica (2016). Para cada uno de estos años se corrió el modelo WWIII utilizando la misma implementación descrita en IMFIA (2018) pero sustituyendo los campos de nivel y corriente por los obtenidos a partir de las nuevas simulaciones de la onda de marea descritas en la sección previa.

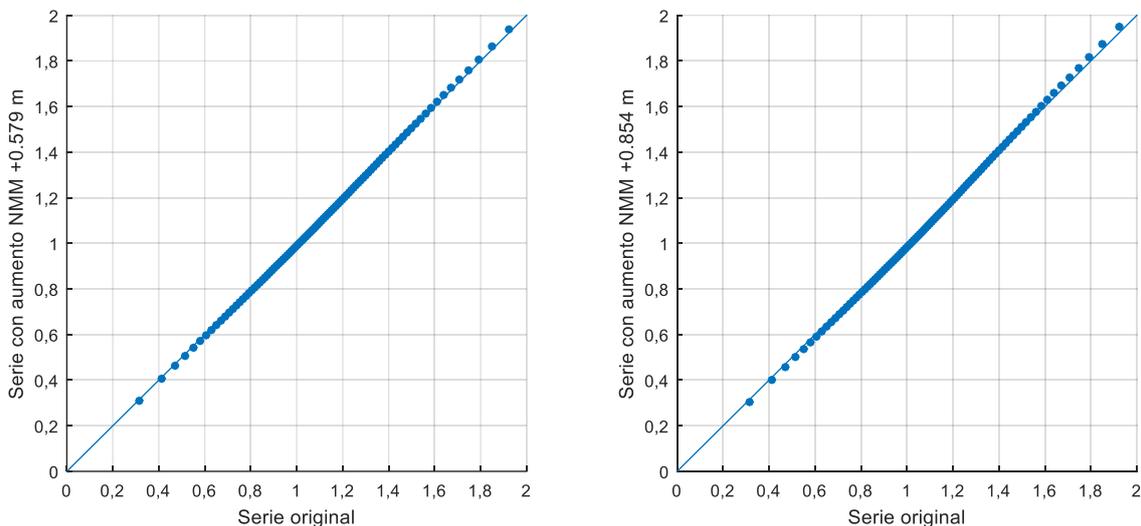
---

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Nivel de mar total

Se comparan las series obtenidas en las nuevas simulaciones con las obtenidas en el hindcast correspondiente al clima actual. Todas las comparaciones se realizan restando a las nuevas simulaciones el correspondiente aumento del NMM, a fin de centrar la atención únicamente en las modificaciones en la dinámica de las ondas de marea (astronómica y meteorológica) inducidas por dicho aumento. La comparación se realiza en la serie de nodos costeros introducidos en IMFIA (2018), los cuales se incluyen en el panel inferior de la Figura 2 y posteriores del presente documento.

En primera instancia se utilizó el test de hipótesis de Kolmogorov-Smirnov de dos series para comparar la serie original (condiciones actuales) con cada una de las nuevas series (condiciones con aumento del NMM), en cada uno de los nodos analizados. El resultado del test, utilizando un nivel de confianza de 5%, es que en todos los puntos hay evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula, según la cual la serie original y las series obtenidas con aumento del NMM provienen de la misma distribución de probabilidad. Sin embargo, aunque los cambios en la serie de nivel de mar total producido por efecto del aumento del NMM sean estadísticamente significativos, la magnitud de los mismos es relativamente pequeña en términos prácticos; a modo de ejemplo la Figura 1 presenta los gráficos de cuantiles (qq-plots) correspondientes al nodo 37, ubicado próximo a Montevideo (uno de los nodos para los cuales se obtuvo la mayor discrepancia en términos del p-valor del test de hipótesis), en donde se observa que la diferencia entre las distribuciones es relativamente pequeña, con desviaciones de la diagonal de algún centímetro para los cuantiles más extremos, tanto altos como bajos.



**Figura 1 – QQ-Plot del nivel de mar total en el nodo 37 (frente a Montevideo). Se grafican los cuantiles entre 0.1% y 99.9%.**

En segunda instancia se evaluó de forma sistemática, para todos los nodos, los cambios obtenidos en términos de: (a) valor medio de la serie, (b) cuantil 95% (q95) de la serie y (c) valor

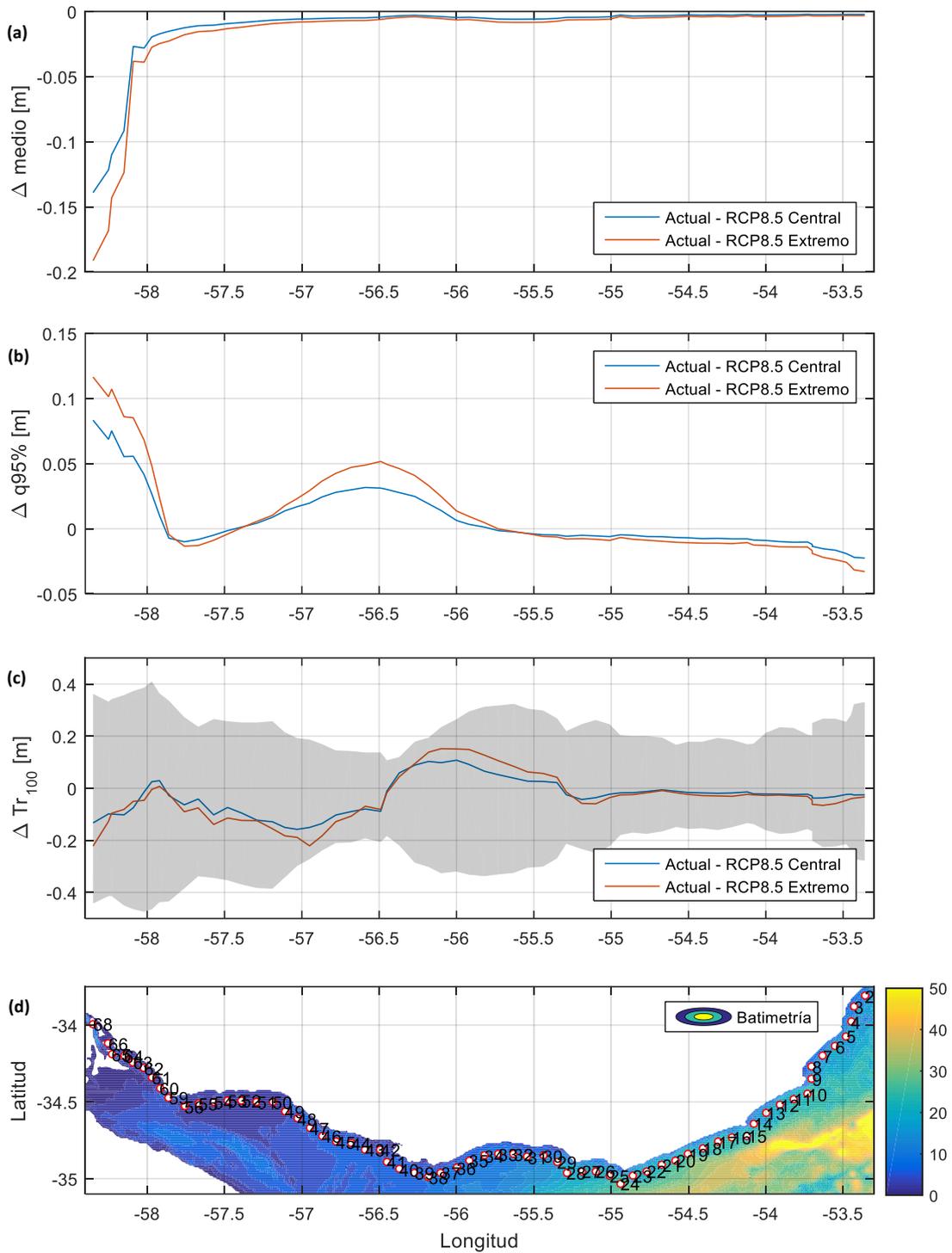
---

de 100 años de período de retorno obtenido de justar una distribución de extremos GEV a la serie de máximos anuales. Los resultados de esta comparación se presentan en la Figura 2.

En los paneles (a) y (b) de la Figura 2 se observa que las mayores diferencias en cuanto a nivel medio y nivel q95 se dan al oeste de los  $-58^{\circ}$ , en el tramo más interior del Río de la Plata. En el resto de la costa la diferencia de niveles medios es prácticamente despreciable y sólo se observa un aumento de q95 en la costa de Montevideo y San José, con un máximo relativo en torno a la desembocadura del río Santa Lucía. En el panel (c) de la Figura 2 se observa que el nivel de 100 años de período de retorno presenta una tendencia a disminuir<sup>1</sup> en la costa de San José y una tendencia a aumentar en la costa de Montevideo y Maldonado; a su vez, la variación en este estadístico se acerca a los límites del intervalo de confianza de 90% del valor actual únicamente en la costa de San José y el Oeste de Montevideo (entre  $-56^{\circ}$ W y  $-57^{\circ}$ W). Cabe señalar que no hay coherencia entre las tendencias observadas en q95 y las observadas en el valor de 100 años de período de retorno (i.e. una tendencia al aumento de uno no implica necesariamente la misma tendencia en el otro).

---

<sup>1</sup> Debe tenerse en cuenta que, como fue descrito en el texto, el análisis se realiza luego de haber restado el aumento del NMM; por lo tanto esta disminución es relativa y debe restarse a la producida por el aumento del NMM.



**Figura 2 – Comparación de la serie de nivel de mar total correspondiente a las condiciones actuales (Actual) con las obtenidas con aumento del NMM de +0.579 m (RCP8.5 Central) y +0.854 m (RCP8.5 Extremo): (a) diferencia entre valores medios actuales y los obtenidos con aumento del NMM; (b) diferencia entre cuantiles de 95%; (c) diferencia de valor de 100 años de período de retorno; en gris se indica la amplitud del intervalo de confianza de 90% calculado para condiciones actuales. En (d) se incluye la ubicación de los nodos analizados.**

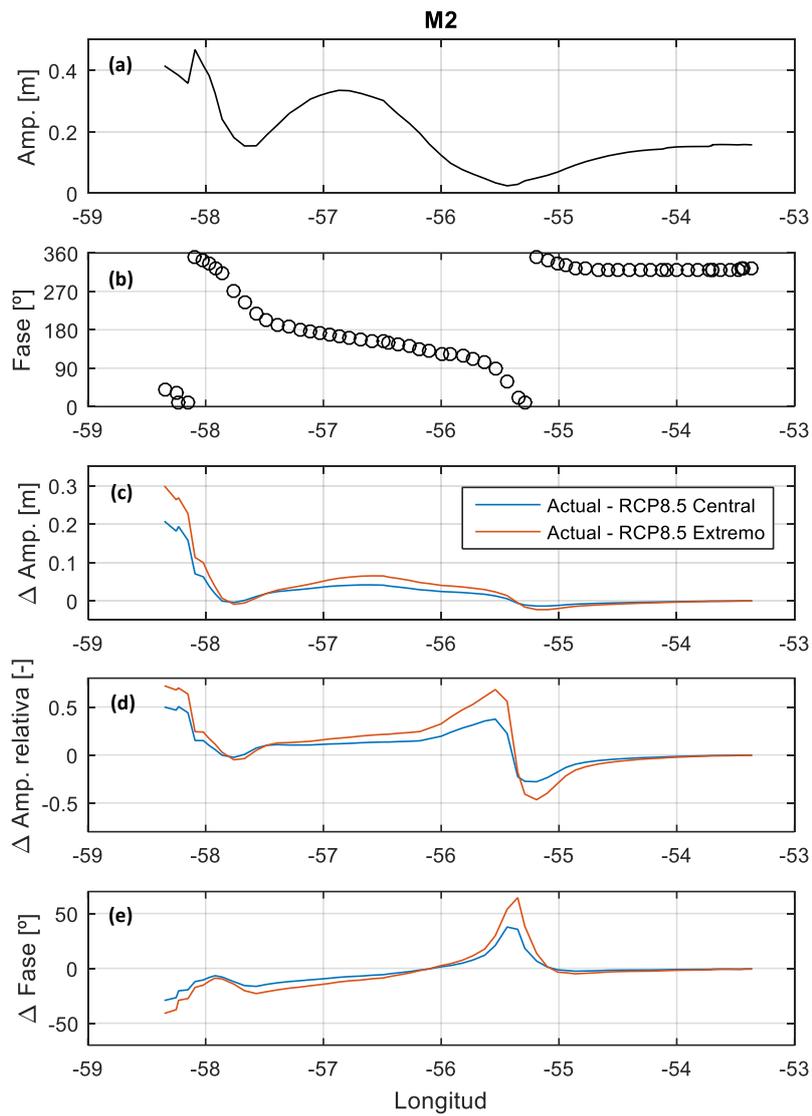
---

## **4.2 Marea astronómica y residuo meteorológico**

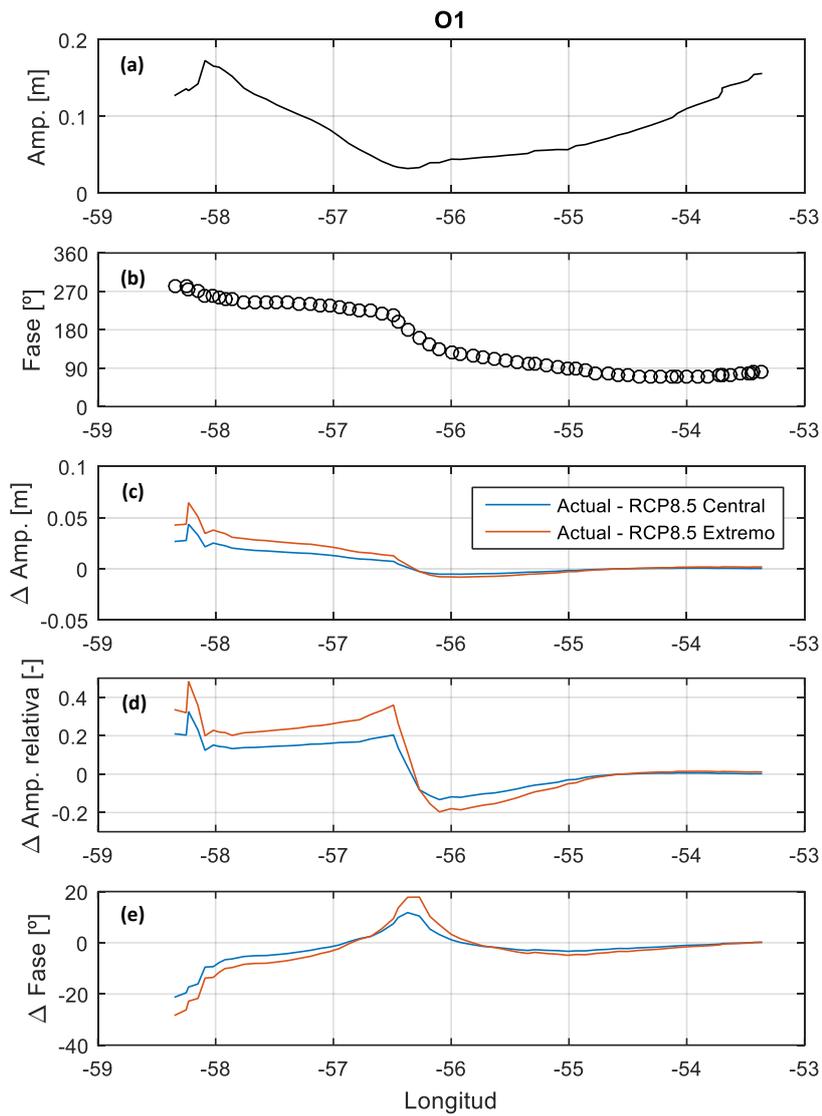
Se analiza el impacto del aumento del NMM sobre tres componentes armónicos de la marea astronómica (M2, O1 y M4) y sobre el residuo meteorológico. La amplitud y fase de los armónicos se calcula para cada nodo mediante análisis de armónicos (U-Tide; ); la serie de residuos meteorológicos se calcula mediante media móvil de 24 hrs aplicada a la serie de nivel de mar total. Al igual que en el apartado anterior, todas las comparaciones se realizan restando a las nuevas simulaciones el correspondiente aumento del NMM.

La Figura 3, la Figura 4 y la Figura 5 presentan para los tres armónicos de marea analizados la amplitud y fase actual (paneles a y b) y los cambios obtenidos en la amplitud (paneles c y d) y en la fase (panel e) con los dos aumentos del NMM analizados (RCP8.5 central y extremo). Se observa que los mayores cambios se dan en el tramo interior del Río de la Plata, con tendencia al aumento de la amplitud y reducción de la fase en todos los componentes. Por otro lado, en el resto del dominio se observa que las zonas de mayores cambios de amplitud relativa y de fase coinciden con los tramos de costa en que la amplitud del armónico es mínima.

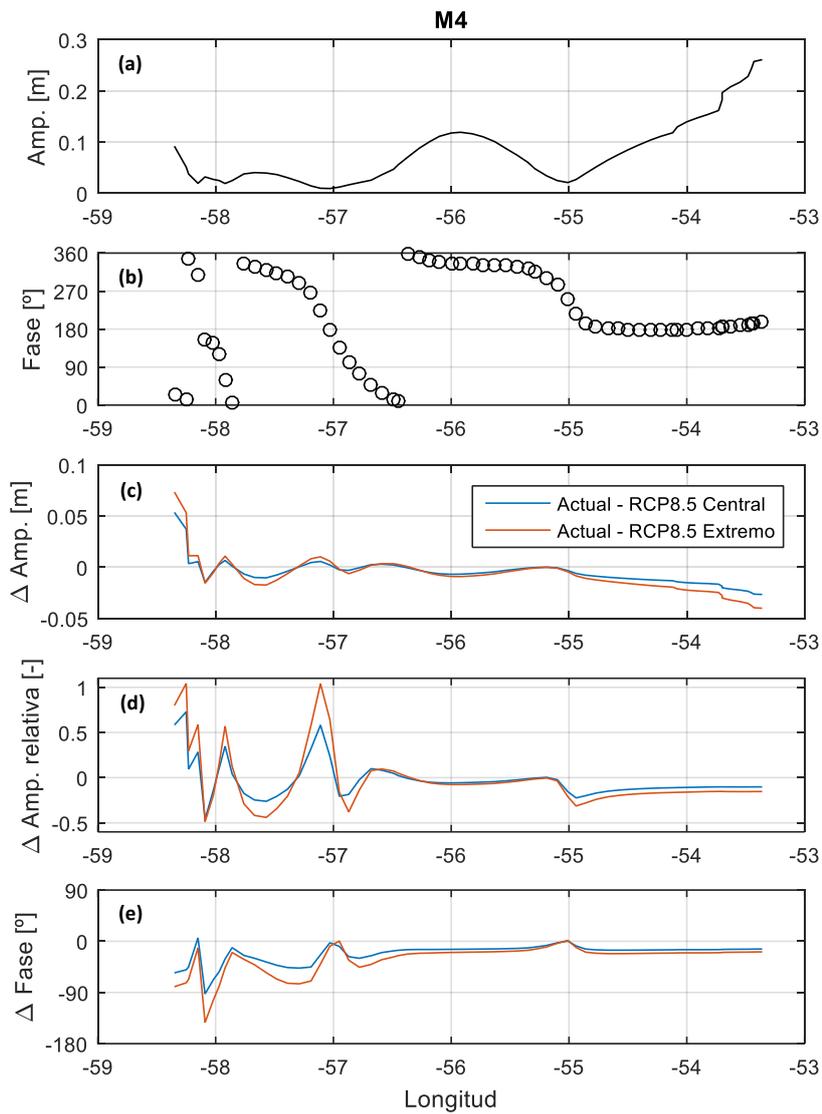
La Figura 6 presenta los cambios obtenidos en el residuo meteorológico en términos de: (a) valor medio de la serie, (b) cuantil 95% (q95) de la serie y (c) valor de 100 años de período de retorno obtenido de justar una GEV a la serie de máximos anuales. Se observa que para los tres estadísticos analizados los cambios son similares, siendo prácticamente despreciables en todo el dominio excepto en el tramo interior del Río de la Plata; el patrón de cambios es, a su vez, similar al presentado en el panel (a) de la Figura 1.



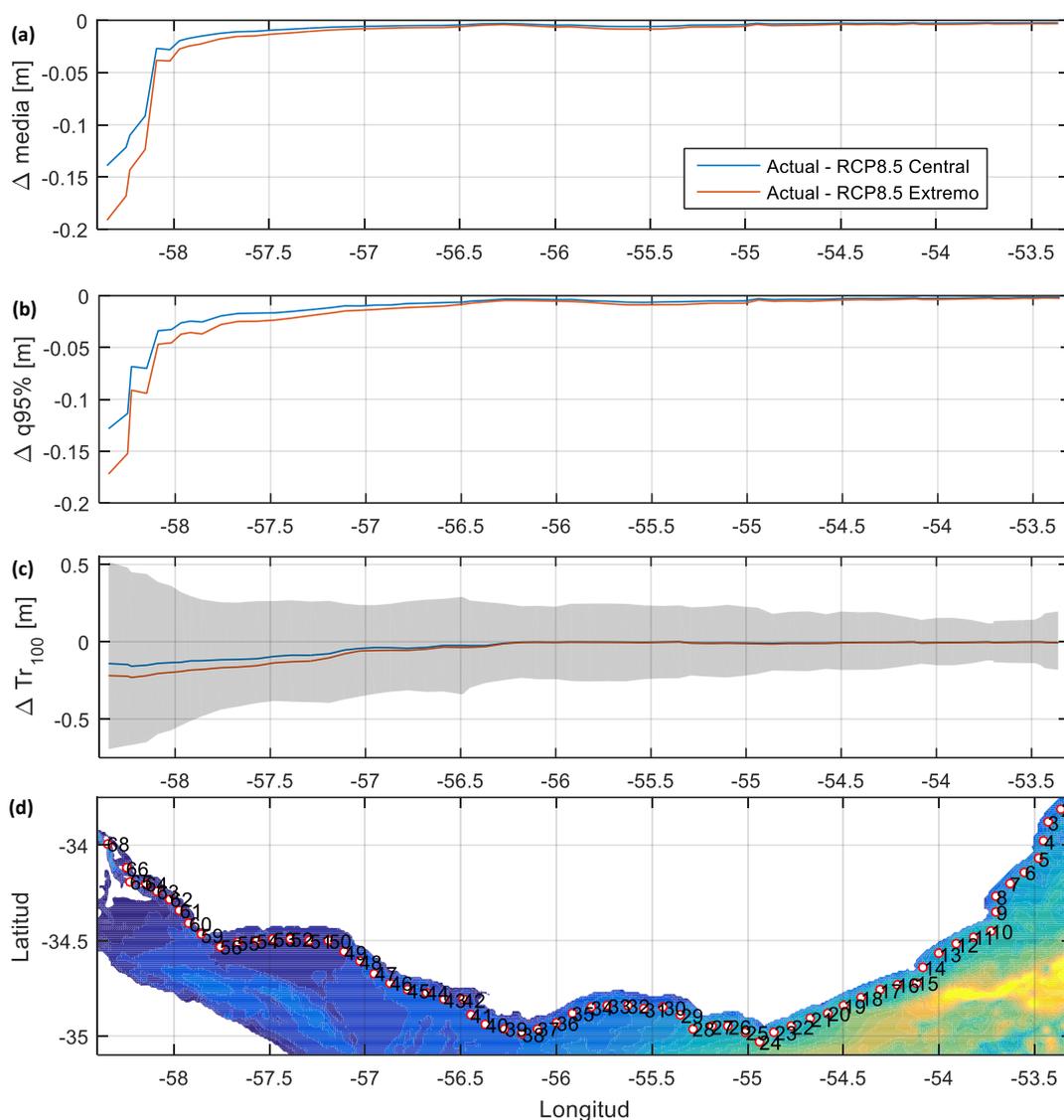
**Figura 3 – Componente M2: (a) amplitud actual; (b) fase actual; (c) cambio en la amplitud (absoluto); (d) cambio en la amplitud (relativo); (e) cambio en la fase (absoluto).**



**Figura 4 – Componente O1: (a) amplitud actual; (b) fase actual; (c) cambio en la amplitud (absoluto); (d) cambio en la amplitud (relativo); (e) cambio en la fase (absoluto).**



**Figura 5 – Componente M4: (a) amplitud actual; (b) fase actual; (c) cambio en la amplitud (absoluto); (d) cambio en la amplitud (relativo); (e) cambio en la fase (absoluto).**



**Figura 6 – Comparación del residuo meteorológico correspondiente a las condiciones actuales (Actual) con las obtenidas con aumento del NMM de +0.579 m (RCP8.5 Central) y +0.854 m (RCP8.5 Extremo): (a) diferencia entre valores medios actuales y los obtenidos con aumento del NMM; (b) diferencia entre cuantiles de 95%; (c) diferencia de valor de 100 años de período de retorno; en gris se indica la amplitud del intervalo de confianza de 90% calculado para condiciones actuales. En (d) se incluye la ubicación de los nodos analizados.**

---

### 4.3 Oleaje

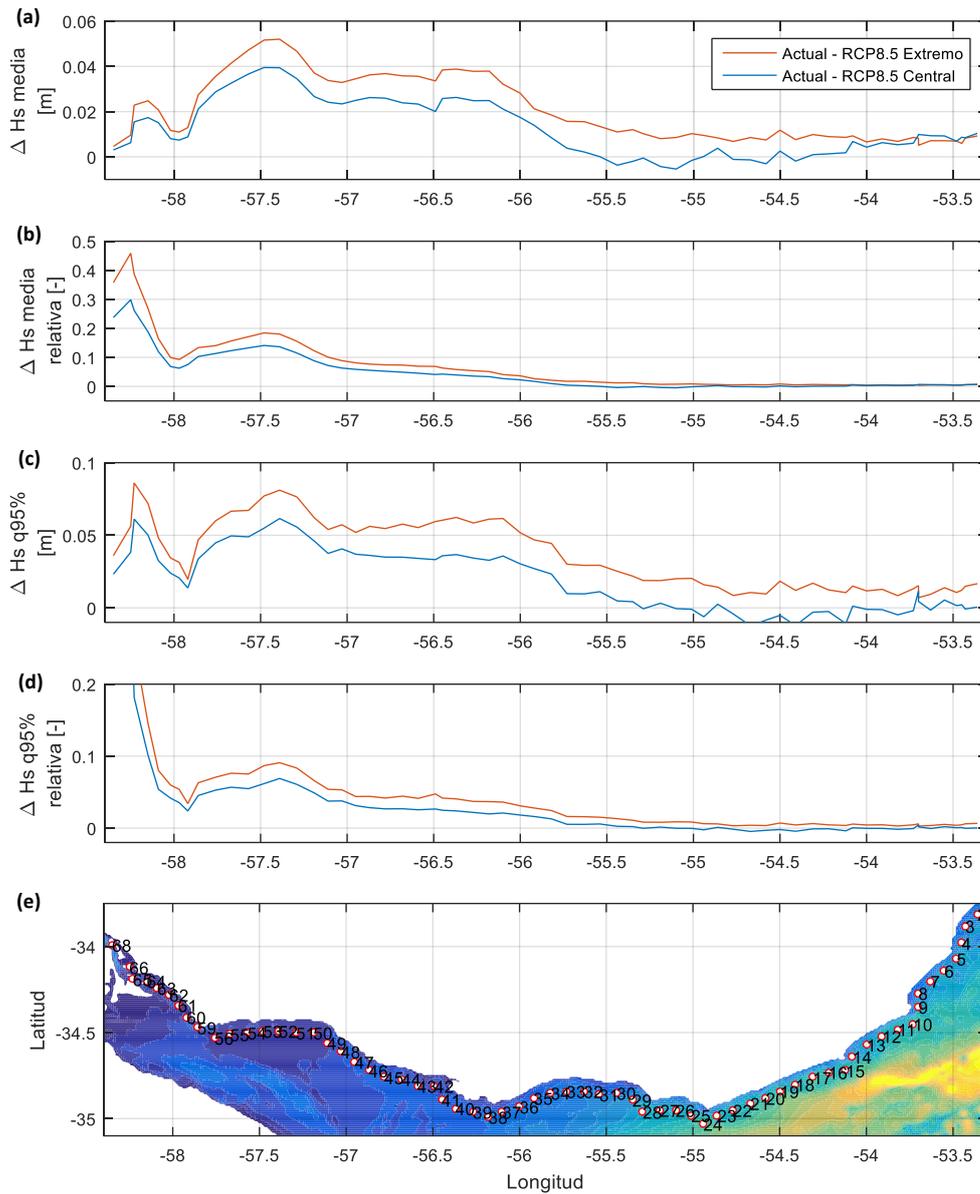
A partir de las series temporales de los dos años simulados (1989 y 2016), se compara la variación de los siguientes estadísticos en cada uno de los nodos analizados:

- Valor medio y cuantil 95% (q95) de la altura de ola significativa espectral (Hs) (Figura 7).
- Media del período medio (Tm) y la dirección media (Dm) calculadas a partir de: (i) todos los datos y (ii) usando únicamente datos con Hs mayor al correspondiente valor de q95 (Figura 8).
- Intensidad y dirección de la potencia media del oleaje (Figura 9).

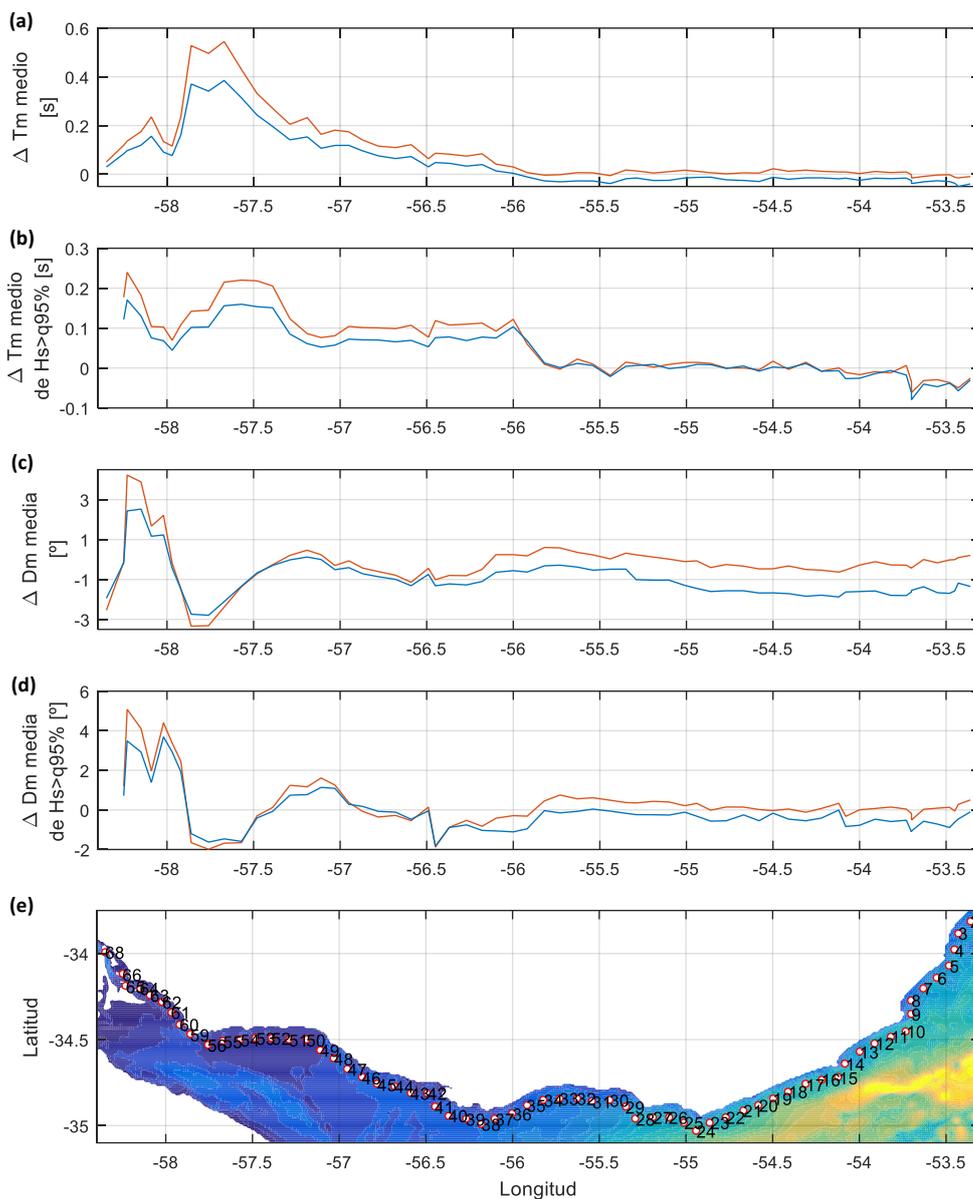
En la Figura 7 se observa que en general los cambios en Hs son pequeños en términos absolutos, tanto para el valor medio como para el q95, aunque los mismos pueden ser importantes en términos relativos en el departamento de Colonia.

En lo que respecta a Tm (Figura 8) se observa que únicamente hay cambios en el Río de la Plata, de Montevideo al oeste, con mayores cambios para la media de todos los datos que los correspondientes al oleaje con Hs mayor al q95. Para la Dm (Figura 8) en cambio sí se observan cambios en la costa Atlántica, con rotaciones en torno a  $-1^\circ$  (mayores para el escenario RCP8.5 central que para RCP8.5 extremo), aunque son mayores las rotaciones observadas en la zona interior del Río de la Plata (en torno a  $-2^\circ/+3^\circ$ ).

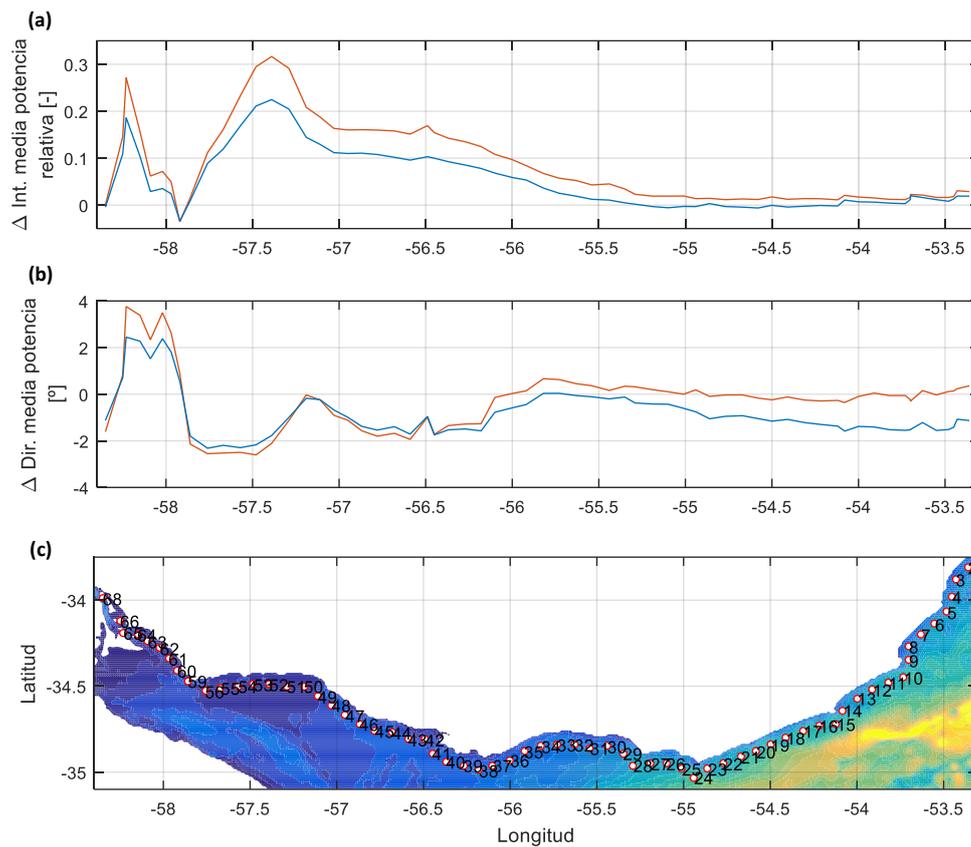
Por último, en la Figura 9 se observa que en el Río de la Plata interior hay tendencia al incremento de la potencia media del oleaje y a la rotación horaria de su dirección (aprox.  $2^\circ$ ), que en la costa del departamento de Colonia, de Colonia del Sacramento al Este, hay tendencia al aumento de la intensidad media de la potencia y que en toda la costa (al Este de Colonia del Sacramento) hay tendencia a la rotación anti-horaria de la dirección media de la potencia del oleaje, con mayores rotaciones en el escenario RCP8.5 Central que en el escenario RCP8.5 Extremo.



**Figura 7 – Comparación de la altura de ola significativa espectral ( $H_s$ ) correspondiente a las condiciones actuales (Actual) con las obtenidas con aumento del NMM de +0.579 m (RCP8.5 Central) y +0.854 m (RCP8.5 Extremo): (a) diferencia absoluta entre valores medios actuales y los obtenidos con aumento del NMM; (b) diferencia relativa; (c) diferencia absoluta entre cuantiles de 95%; (d) diferencia relativa. En (e) se incluye la ubicación de los nodos analizados.**



**Figura 8 – Comparación del período medio (Tm) y dirección media (Dm) correspondiente a las condiciones actuales (Actual) con las obtenidas con aumento del NMM de +0.579 m (RCP8.5 Central) y +0.854 m (RCP8.5 Extremo): (a) diferencia absoluta entre valores medios de Tm (todos los datos); (b) diferencia absoluta entre valores medios de Tm (solo datos con Hs > q95); (c) diferencia absoluta entre valores medios de Dm (todos los datos); (d) diferencia absoluta entre valores medios de Dm (solo datos con Hs > q95). En (e) se incluye la ubicación de los nodos analizados.**



**Figura 9 – Cambio relativo en la intensidad media de la potencia del oleaje (a). Cambio en la dirección media de la potencia del oleaje (b). En (c) se incluye la ubicación de los nodos analizados.**

---

## 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En general se observa que los cambios en el nivel de mar total (nivel medio y q95) son pequeños en términos absolutos, excepto en la zona interior del Río de la Plata, al noroeste de Conchillas. Sin embargo, los resultados obtenidos en dicha zona deben tratarse con particular cautela dada la proximidad de la misma al contorno del modelo (ubicado en Punta Gorda en la descarga de los ríos Uruguay y el delta del Paraná Guazú). En lo que respecta al valor estimado de 100 años de período de retorno, si bien se observan algunas tendencias de aumento y descenso en algunas zonas, en ningún caso los cambios alcanzan para salir del intervalo de confianza de 90% del valor de 100 años estimado a partir de los datos actuales. En términos relativos, comparado con los aumentos del NMM considerados en las respectivas simulaciones, los cambios en el régimen de nivel de mar total no parecen significativos a efectos prácticos.

Al analizar por separado los componentes astronómico y meteorológico del nivel de mar total se observa que son más importantes los cambios de la componente astronómica que los de la meteorológica. En particular resultan insignificantes los cambios en el valor de 100 años de período de retorno de la componente meteorológica. Visto esto, los cambios observados en el nivel de mar total podrían deberse únicamente a los cambios en amplitud y fase de las componentes astronómicas debido al incremento del NMM.

En lo que respecta al oleaje, los mayores cambios se dan en el Río de la Plata medio e interior. Si bien los cambios en la altura, período y dirección del oleaje no son particularmente grandes, si resultan destacables los cambios en la intensidad y dirección de la potencia del oleaje, con cambios relativos de la intensidad de hasta 20%-30% y cambios en la dirección de orden 2°. En particular la rotación de la dirección media de la potencia se observa prácticamente en toda la costa y en la costa Atlántica es mayor en el escenario de aumento del NMM RCP8.5 centrado que en el escenario RCP8.5 extremo.

**Comentario.** Lo anterior surge del análisis presentado en el documento y por lo tanto todos los cambios discutidos refieren a los escenarios considerados en las simulaciones, i.e:

**1) se consideran únicamente aumentos del NMM, sin considerar cambios en las condiciones atmosféricas (vientos y presiones) e hidrológicas (caudales de los ríos Uruguay y Paraná)**

**2) los aumentos del NMM considerados corresponden a valor central y extremo superior de intervalo de 90% en el escenario RCP8.5, horizonte temporal 2100.**

---

## 6 REFERENCIAS

Hervouet, J.M. (2007). Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

IH-Cantabria (2019). 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.**

IMFIA (2018). Informe de actividades en el marco del proyecto: URU/18/002 Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. **Entregable E.1.1.**