



Output 4 | Actividad 4.2

# Proyecciones de cambio del oleaje, la marea meteorológica y el nivel medio del mar en la costa Atlántica de la provincia de Buenos Aires

Español

INFORME 4.2 – 31 Ene 2020 - UNIDO/CTCN Rfx 7000002437

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina) | Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República (IMFIA-UdelaR, Uruguay)

Technologies for the design of a regional strategic plan for the coastal management and adaptation to Climate Change in the Province of Buenos Aires

*Proyecto INA 376  
Informe LHA 07-376-20  
Ezeiza, enero de 2020*

## **Equipo de trabajo**

*Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina)*

Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Pablo E. García | Lucas Bindelli | Ing. Martín Sabarots Gerbec | Msc. Ing. Nicolás J. Tomazin | Lic. Carlos Haspert | Arq. Leonardo S. Peralta | Lic. Federico Haspert

*Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de*

Dr. Ing. Mónica Fossati | Dr. Ing. Sebastián Solari | Dr. Ing. Pablo Santoro | Msc. Ing. Rodrigo Alonso | Ing. Michelle Jackson

## **Informe realizado por:**

Sebastián Solari, Michelle Jackson y Mónica Fossati

## Resumen

En este trabajo se presenta el estudio de las proyecciones de aumento de nivel medio del mar y cambio de las variables que determinan la dinámica marítima costera (oleaje y marea meteorológica) a lo largo de la costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires, para un horizonte temporal de fin de siglo XXI. Este estudio se realizó a partir de la información generada y distribuida en el marco de *Couple Model Intercomparison Project 5* (CMIP5), aplicando técnicas de reducción de escala de tipo estadísticas (*downscaling* estadístico) para las proyecciones de oleaje y marea meteorológica.

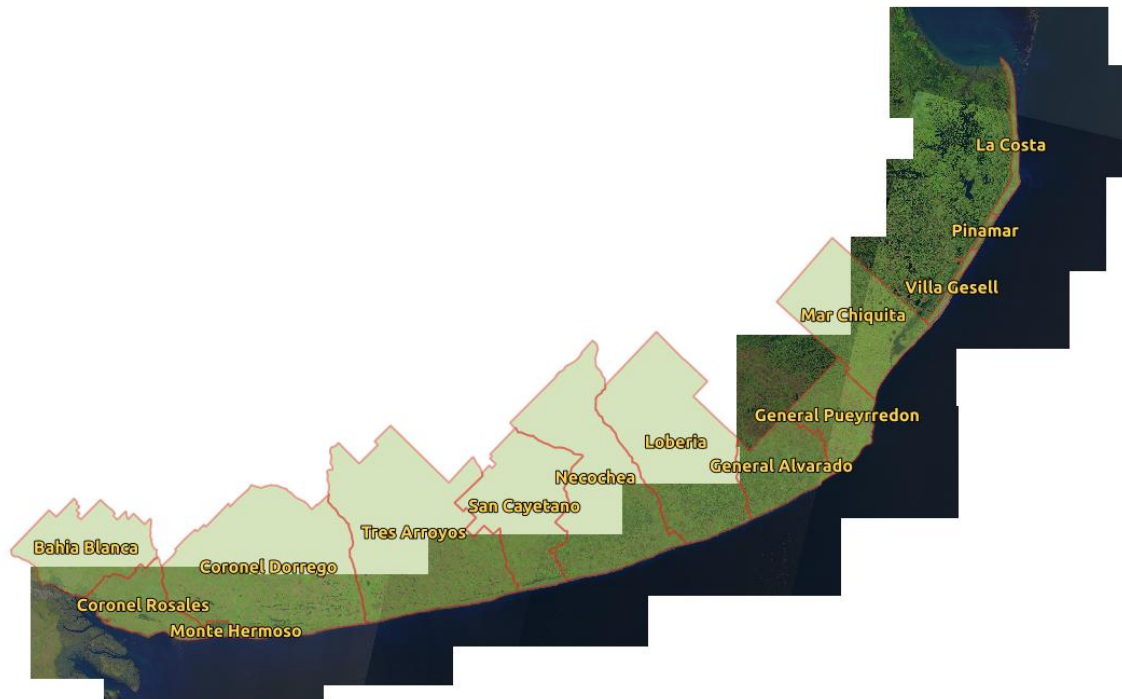
## Índice

1	Introducción .....	5
1.1	Problema .....	5
1.2	Asistencia técnica .....	6
1.3	Actividad 4.2.....	6
2	Metodología .....	8
2.1	Descripción general.....	8
2.2	Particularidades de la aplicación al caso de estudio.....	12
3	Oleaje y marea meteorológica .....	15
3.1	Calibración y validación.....	15
3.2	Patrones de circulación y estadísticos asociados para Necochea.....	18
3.3	Proyecciones .....	20
4	Aumento del nivel medio del mar.....	24
4.1	Marco de referencia.....	24
4.2	Proyecciones .....	26
5	Discusión y conclusiones.....	32
	Referencias.....	34

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Problema

La costa oceánica de la Provincia de Buenos Aires presenta gran diversidad de playas a lo largo de sus 400 km, con diferentes regímenes de oleaje, mareas, y con composiciones granulométricas y morfológicas variables. Entre San Clemente, al NE, y Pehuén-Co, al SO, se concentran más de 30 localidades balnearias que pertenecen a 12 partidos de la provincia (Figura 1.1). Los municipios presentan importantes diferencias en cuanto a cantidad de población y actividades económicas. Principalmente se destacan actividades asociadas al turismo y actividades comerciales vinculadas al movimiento de los puertos.



**Figura 1.1.** Partidos del litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires.

Esta región litoral se ve afectada por numerosos problemas ambientales y climáticos, principalmente debidos a la erosión costera. Las actividades antrópicas como la construcción de defensas costeras, el crecimiento urbano sobre estructuras medanosas, la extracción de arena y la explotación de acuíferos sin un apropiado manejo han agravado los procesos erosivos y acrecentado la vulnerabilidad frente al Cambio Climático.

La constante acción del oleaje y el impacto de los eventos de tormenta severos (Sudestadas) son los responsables primarios de la dinámica erosiva de la costa bonaerense. Estudios referidos a obras puntuales como la instalación de rompeolas para prevenir erosión en la zona de

acantilados en Mar del Plata, la ejecución de defensas costeras para protección de rutas o los planes de modificación de una de las escolleras del Puerto de Mar del Plata refuerzan la necesidad de contar con un manejo costero integral y planificado. Resulta en este contexto que se plantea la preocupación de la provincia de Buenos Aires respecto de la vulnerabilidad de la costa ante las distintas amenazas que afectarían su dinámica en el marco del Cambio Climático.

## **1.2 Asistencia técnica**

El análisis de los procesos costeros naturales (meteorología, climatología, hidrodinámica y morfología) en relación a los cambios en las actividades humanas y del uso/cobertura del suelo, resulta un insumo necesario para el estudio del riesgo a la erosión costera de manera integral y la generación de información necesaria para la concreción de un plan integral de manejo costero bonaerense.

En este marco, el Departamento de Costa Marítima de la Provincia de Buenos Aires solicitó la Asistencia Técnica a CTCN (Climate Technology Center & Network) que plantea dos objetivos generales: i) diagnosticar el estado actual de la dinámica en la costa oceánica de la provincia, e ii) implementar un mapa de riesgo frente al Cambio Climático y delinear recomendaciones de manejo costero, para utilizar como insumo en la ejecución de un Plan de Manejo Integral Estratégico de la costa bonaerense a desarrollarse a futuro.

Entre los objetivos específicos a alcanzar por esta Asistencia Técnica se destacan: i) determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera durante las últimas décadas (nivel del mar, oleaje, viento, cambios morfológicos), ii) estimar a partir de proyecciones de Cambio Climático los posibles escenarios costeros futuros, y iii) desarrollar labores de transferencia tecnológica, capacitación y formación asociadas al proyecto. Entre los principales productos de esta asistencia se destacan la puesta en valor de las herramientas de modelación numérica del solicitante, la capacitación y entrenamiento en el manejo de las mismas y la elaboración de un manual de recomendaciones de manejo costero para la costa oceánica de Buenos Aires.

Esta Asistencia Técnica se lleva a cabo con los equipos profesionales del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina y el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) de Uruguay.

## **1.3 Actividad 4.2**

La Actividad 4.2 de esta Asistencia Técnica se enmarca dentro del Entregable 4, y está asociada a la evaluación de proyecciones de Cambio Climático para la costa marítima de la provincia de Buenos Aires. En este trabajo se presenta el estudio de las proyecciones de aumento de nivel medio del mar y cambio de las variables que determinan la dinámica marítima costera (oleaje y marea meteorológica) a lo largo de la costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires, para un horizonte temporal de fin de siglo XXI.

Este estudio se realizó a partir de la información generada y distribuida en el marco de *Couple Model Intercomparison Project 5* (CMIP5<sup>1</sup>), aplicando técnicas de reducción de escala de tipo estadísticas (*downscaling* estadístico) para las proyecciones de oleaje y marea meteorológica.

El documento se estructura de la siguiente forma. El capítulo 2 presenta la metodología del estudio. Las proyecciones de oleaje y marea meteorológica se presentan en el capítulo 3, mientras que las de aumento del nivel medio del mar se presentan en el capítulo 4. Por último, en el capítulo 5 se discuten algunos de los resultados obtenidos y se resumen las principales conclusiones que se desprenden del estudio.

---

<sup>1</sup> <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>

## 2 METODOLOGÍA

Se distingue entre la variación a largo plazo del nivel medio del mar y de las variables que caracterizan la dinámica marítima en la costa, a saber: oleaje y marea meteorológica<sup>2</sup>.

La estimación de las tendencias regionales de cambio en el nivel medio de mar a lo largo del siglo XXI se obtiene directamente de los datos utilizados para la elaboración del capítulo 13 del informe IPCC AR5 y su material complementario (IPCC, 2013). Estos datos son de acceso público y su utilización para analizar el nivel medio del mar en la costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires se describe posteriormente.

En este capítulo se describe la metodología utilizada para obtener las proyecciones de oleaje y marea meteorológica.

### 2.1 Descripción general

Para la obtención de proyecciones de las dinámicas marítimas (oleaje y marea meteorológica) se utilizará la metodología estadística de reducción de escala propuesta por Camus et al. (2014, 2016, 2017). Esta metodología consta de 5 pasos (Figura 2.1), los cuales se resumen a continuación:

#### Paso 1:

Se deben definir (y en su caso pre-procesar) las variables para las que se desea predecir su posible cambio a lo largo del siglo XXI por efecto del cambio climático, denominadas *predictando*, y las variables que se utilizarán para predecir dicho cambio, denominadas *predictor*.

En este caso el *predictando* son las variables que caracterizan el estado de mar, tanto desde el punto de vista del oleaje (altura de ola significativa  $H_s$ , dirección media espectral del oleaje  $D_m$  y período medio espectral del oleaje  $T_m$ ) como desde las variaciones de nivel de mar por acción de la atmósfera (marea meteorológica o *storm surge*  $SS$ ). Las series de datos a utilizar son las obtenidas a partir del *hindcast* de oleaje y nivel generado en el marco de este proyecto (ver Informe 4.1 de esta Asistencia Técnica).

---

<sup>2</sup> Se denomina marea meteorológica (o *storm surge*) a las variaciones del nivel de mar producto de los campos de viento y las diferencias de presiones. En el marco de este trabajo la marea meteorológica se calculó aplicando una media móvil de 24 horas a la serie de niveles de mar, lo que filtra las principales componentes astronómicas (no-meteorológicas) en la señal de niveles.

El *predictor* por otro lado debe ser una variable con capacidad de explicar el comportamiento del *predictando* y para el que se disponga de información de proyecciones de cambio climático. Siguiendo a Camus et al. (2014, 2016, 2017), se opta por utilizar el gradiente del campo de presiones en superficie (MSLP) en un dominio que abarca el Atlántico Sur.

#### Paso 2:

El objetivo de este paso es identificar condiciones atmosféricas similares (valores similares del predictor) que dan lugar a valores similares de las variables que caracterizan la dinámica marítima costera (valores similares del *predictando*). Para ello se utiliza la técnica de agrupamiento guiado mediante regresión (*regression guided clustering*) propuesto por Cannon (2012). Esta técnica primero calibra una regresión lineal entre el predictor (X) y el *predictando* (Y) de la forma  $Y=f(X)+\varepsilon$ , luego utiliza técnicas de agrupamiento (*clustering*) para generar grupos utilizando X y f(X), ponderados mediante la variable  $\alpha$ , es decir que se agrupa la matriz de datos  $[\alpha X (1-\alpha)f(X)]$ .

Siguiendo a Camus et al. (2014, 2016, 2017), en este trabajo se utiliza *k-means* para agrupar los datos. Dado que en algunos casos resulta conveniente presentar los resultados del agrupamiento en un espacio bidimensional, se explora también el uso *Self Organizing Maps* (SOM; Kohonen 2001) para obtener una clasificación inicial a partir de la cual inicializar la clasificación mediante *k-means* (en adelante a este método de clasificación se lo denomina *SOM+k-means*).

#### Paso 3:

Cada uno de los grupos definidos en el paso anterior corresponde a un patrón de circulación (*weather pattern*; WP), el cual se visualiza en este caso mediante el promedio de los campos de presión en superficie de los instantes correspondientes al grupo. Cada WP tiene asociada a su vez una frecuencia de ocurrencia, dada por el número de datos en el grupo, y la distribución de probabilidad empírica de las variables que se quiere predecir (Hs, Dm, Tm, SS), obtenida también a partir de los datos correspondientes al grupo.

#### Paso 4:

Una vez definidos los WP, se toman los valores del predictor (gradiente de MSLP) de los resultados de los modelos de circulación globales (GCM) corridos en el marco del CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), para uno o más escenarios de cambio climático y para el período actual y distintos horizontes temporales, y se proyectan sobre los grupos (WP) definidos previamente. De esta forma se obtiene, para cada modelo, escenario y horizonte temporal, la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los WP y, dado que cada WP tiene asociada una distribución empírica del *predictando*, se obtienen también estimaciones del valor esperado del *predictando*.

En este trabajo se utilizan los resultados de 30 GCM (Tabla 2.1), evaluándose para cada uno de ellos el período actual y el período 2080-2100 en el escenario RCP8.5<sup>3</sup>.

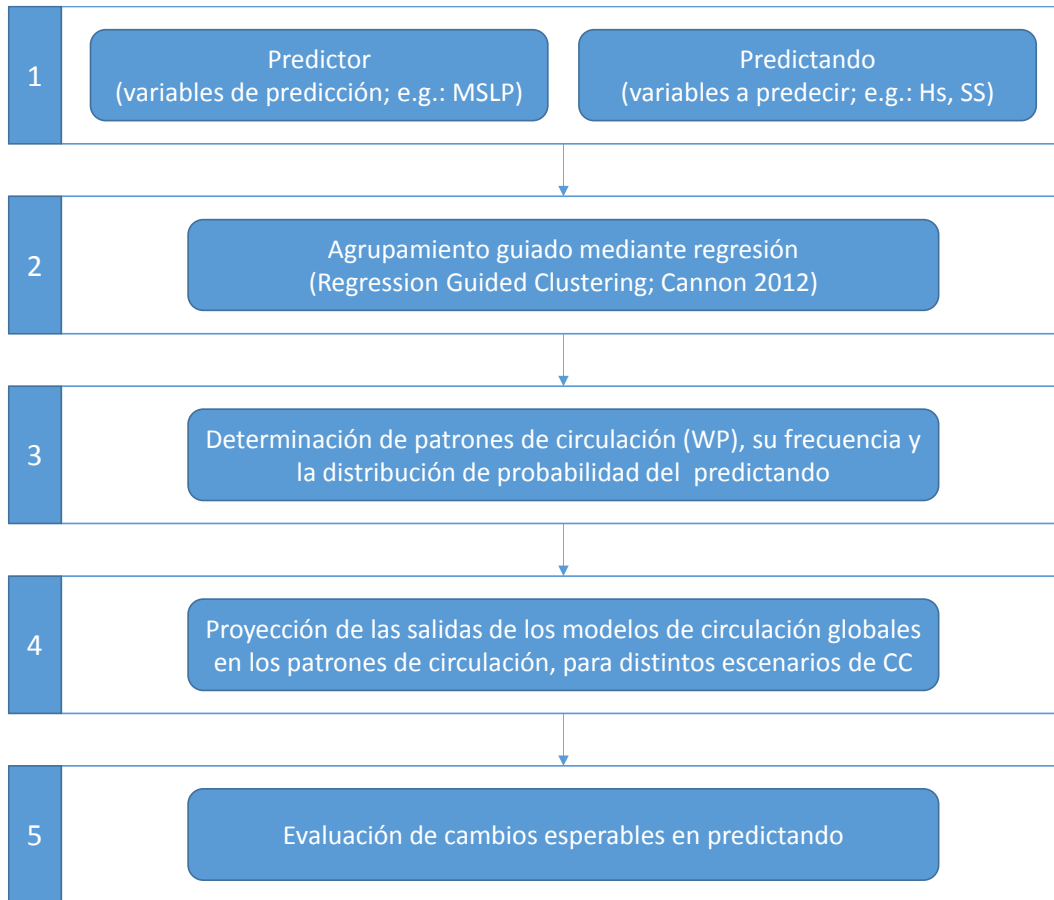
Si bien inicialmente se evaluó la posibilidad de incluir otros horizontes y escenarios, la baja magnitud de los cambios obtenidos para estas condiciones (ver sección de resultados) no justifica la inclusión de otros escenarios y horizontes que, a priori, resultan menos severos.

Paso 5:

El cambio para cada escenario y horizonte temporal se evalúa, para cada modelo, como la resta del valor esperado obtenido con el predictor en el período actual y el obtenido con el predictor en condiciones futuras. El cambio en el predicando se considera significativo únicamente si al menos el 80% de los modelos muestran el mismo sentido de cambio y si la media de todos los cambios es mayor a su desviación estándar.

---

<sup>3</sup> Para la elaboración del 5to informe (AR5) del IPCC se establecieron cuatro escenarios de emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero y otros forzantes climáticos. Estos escenarios se denominan *Representative Concentration Pathways* (RCP) y se identifican como RCP2.6 Escenario de mitigación de emisiones y forzantes), RCP4.5 y RCP6.0 (escenarios de estabilización de emisiones y forzantes), y RCP8.5 (escenario altas emisiones y forzantes). En términos de aumento de la temperatura media de la superficie de la tierra a 2081-2100, estos escenarios corresponden a los siguientes rangos: 0.3°C-1.7°C (RCP2.6), .1°C-2.6°C (RCP4.5), 1.4°C-3.1°C (RCP6.0) y 2.6°C-4.8°C (RCP8.5).



**Figura 2.1.** Esquema de la metodología seguida para determinar las proyecciones de las variables de oleaje y marea meteorológica en distintos escenarios de cambio climático.

**Tabla 2.1.** Modelos globales utilizados para la proyección de las variables de la dinámica marítima.

<i>Modelo</i>	<i>Resolución [°]</i>	<i>Modelo</i>	<i>Resolución [°]</i>
ACCESS1.0	1.25 x 1.875	GFDL-ESM2G	2 x 2.5
ACCESS1.3	1.25 x 1.875	GFDL-ESM2M	2 x 2.5
BCC-CSM1.1	2.79 x 2.8125	HadGEM2-CC	1.25 x 1.875
BCC-CSM1.1m	1.1215 x 1.125	HadGEM2-ES	1.25 x 1.875
BNU-ESM	2.7906 x 2.8125	INM-CM4	1.5 x 2
CanESM2	2.7906 x 2.8125	IPSL-CM5A-LR	1.8947 x 3.75
CCSM4	0.9424 x 1.25	IPSL-CM5A-MR	1.2676 x 2.5
CESM1(BGC)	0.9424 x 1.25	IPSL-CM5B-LR	1.8947 x 3.75
CESM1(CAM5)	0.9424 x 1.25	MIROC-ESM	2.7906 x 2.8125
CMCC-CM	0.7484 x 0.75	MIROC-ESM-CHEM	2.7906 x 2.8125
CMCC-CMS	1.8653 x 1.875	MIROC5	1.4 x 1.4
CNRM-CM5	1.4008 x 1.4063	MPI-ESM-LR	1.8653 x 1.875
CSIRO-Mk3.6.0	1.8653 x 1.875	MPI-ESM-MR	1.8653 x 1.875
FGOALS-g2	2.7906 x 2.8125	MRI-CGCM3	1.1215 x 1.125
GFDL-CM3	2 x 2.5	NorESM1-M	1.8947 x 2.5

## 2.2 Particularidades de la aplicación al caso de estudio

Para la aplicación de la metodología descrita a la costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires es necesario definir algunas variables, a saber: el valor de  $\alpha$  a utilizar en el agrupamiento guiado mediante regresión, el número de grupos (Nclus) y el método de agrupamiento (k-means o SOM en combinación con k-means).

A fin de identificar la combinación de estas variables que resulte más adecuada para el caso de estudio se evalúan distintas combinaciones posibles trabajando con los datos de un único nodo, ubicado frente a Necochea (nodo 25 en Figura 2.2). Los datos de este nodo se dividen en un período de calibración (1980-2006) y uno de validación (2006-2016); el período de calibración se utiliza para identificar los grupos (WP), su frecuencia de ocurrencia y la distribución de probabilidad del *predictando* asociado a cada grupo (pasos 1 a 3 de la metodología), en particular se calcula el valor esperado de cada *predictando* dentro de cada grupo o WP ( $\bar{Z}_j = E\{Z|Z \in j\}$ ; en donde Z es el *predictando* y el valor esperado se calcula como la media de los Z incluidos en el grupo j); el período de validación se utiliza para evaluar qué porcentaje de la varianza de los distintos *predictandos* se logra explicar con la agrupación obtenida. En particular,

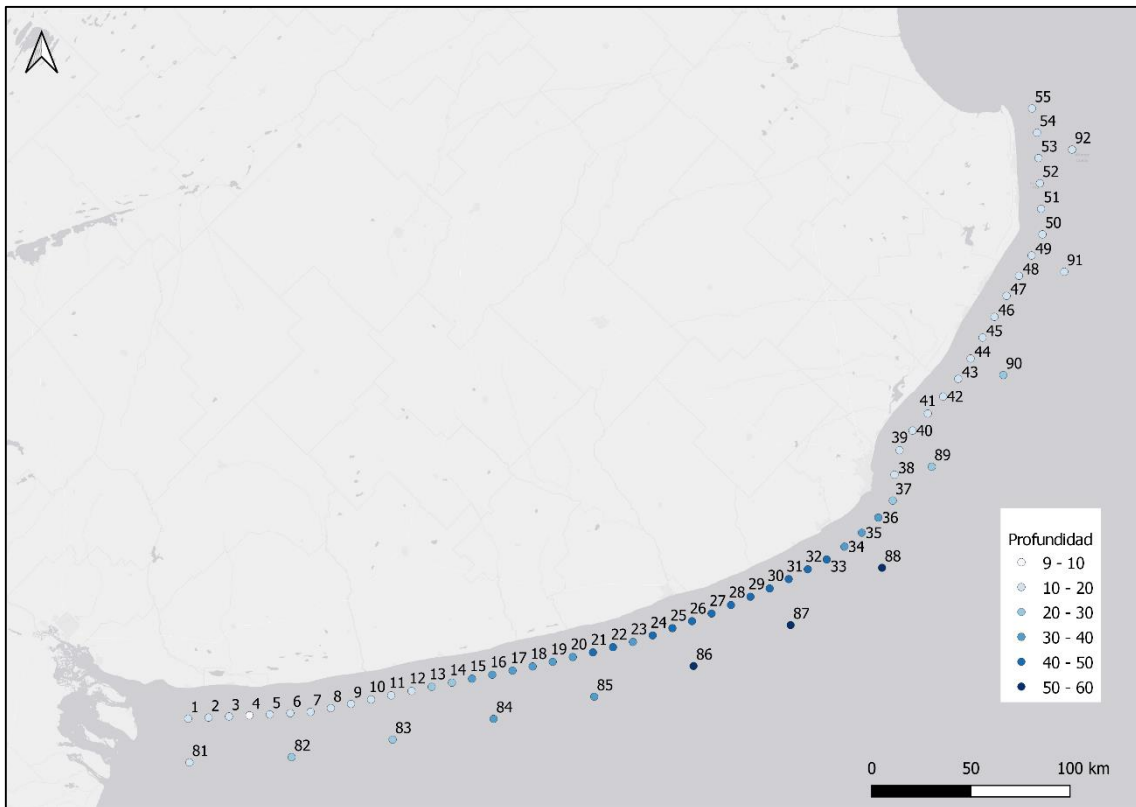
la varianza explicada (EV) para un *predictando* dado se estima a partir de los datos de validación como:

$$EV = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{Nclus} \sum_{i=1}^{N_j} (Z_i - \bar{Z}_j)^2}{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}$$

en donde  $N_{clus}$  es el número de grupos,  $N_j$  es el número de datos de validación que resultan asociados al grupo  $j$ ,  $\bar{Z}_j$  es el valor esperado del *predictando* para el grupo  $j$ ,  $N$  es el número total de datos usados para la validación ( $N = \sum_{j=1}^{Nclus} N_j$ ) y  $\bar{Z}$  es la media del *predictando* calculada a partir de los datos de validación.

A su vez, trabajar inicialmente con un único nodo permite presentar con mayor detalle la aplicación de la metodología, previo a su aplicación sistemática a lo largo de toda la costa.

Una vez seleccionados los valores de  $\alpha$  y  $N_{clus}$ , así como el método de agrupamiento a utilizar, a partir del análisis detallado de los datos del nodo de Necochea, se procede a aplicar la metodología descrita en el apartado anterior a todos los nodos de oleaje estudiados en el proyecto (Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Localización y numeración de los nodos analizados en este trabajo.

### 3 OLEAJE Y MAREA METEOROLÓGICA

#### 3.1 Calibración y validación

La Figura 3.1 presenta varianza explicada (coeficiente EV) para el período de validación (2006-2016) para distintas combinaciones de número de WP (Nclus) y valor de  $\alpha$ , siempre utilizando la técnica de agrupamiento *SOM+K-means* para la identificación de los WP. Se presentan los resultados obtenidos con tres predictores diferentes obtenidos a partir del campo de presiones en superficie: (i) campo de gradiente de presiones instantáneo, (ii) campo de gradiente de presiones promedio en 24 horas (1 día) y (iii) campo de gradiente de presiones promedio en 72 horas (3 días). Se observa que en general se logra explicar mayor varianza de las variables Hs y SS que de Dm y Tm, siendo ésta última la de peor comportamiento en todos los casos. La varianza explicada con campos instantáneos y promediados en 24 horas es similar, siendo un poco mayor en este último caso; en comparación, la varianza explicada al usar campos promediados en 72 horas se reduce de forma significativa. En lo que respecta al número de WP y  $\alpha$ , se observa que es mayor la sensibilidad a  $\alpha$ , siendo el resultado poco sensible al número de WP para valores superiores a 25. La sensibilidad a  $\alpha$  es bastante notoria, en particular para valores de  $\alpha$  mayores a 0.3, para los que se observa un acentuado descenso de EV.

La Figura 3.2 presenta los resultados obtenidos, en términos de varianza explicada (coeficiente EV), con los dos métodos de identificación de WP analizados: *SOM+K-means* y *K-means*. En ambos casos la clasificación se realiza a partir del gradiente de presiones promediado en 24 horas. Se observa que, a efectos prácticos, los resultados obtenidos con ambos métodos son iguales.

En función de los resultados presentados se decide utilizar, para las proyecciones en todos los nodos a analizar, el gradiente del campo de presiones promedio en 24 horas como predictor, la combinación *SOM+K-means* como método de agrupamiento automático para identificar 100 patrones de circulación (WP) por boya y  $\alpha$  igual a 0.2.

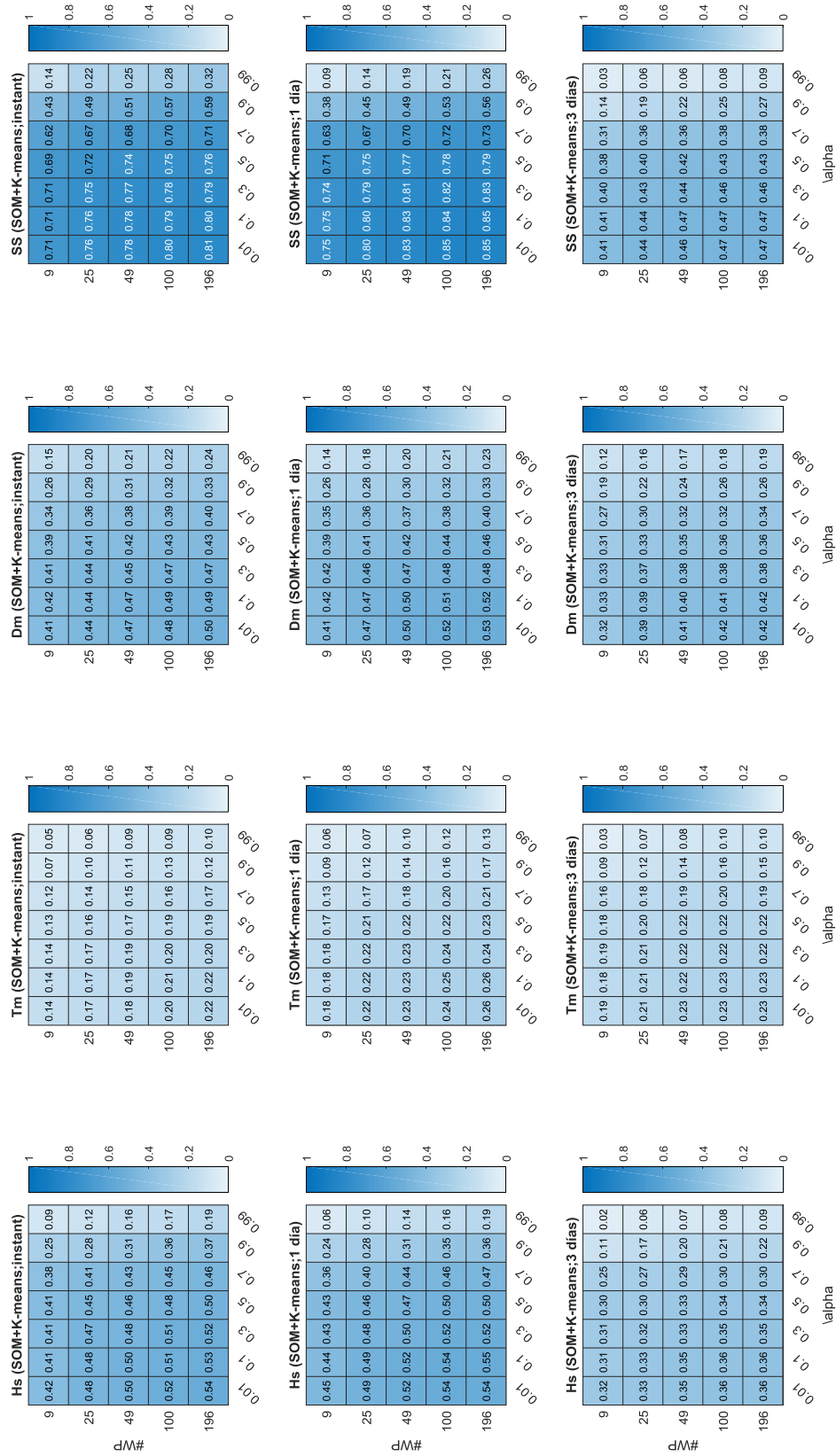


Figura 3.1. Varianza explicada para cada combinación de número de WP (Nclus) y valor de  $\alpha$ , para distintos predictores (ver texto), utilizando SOM+k-means.

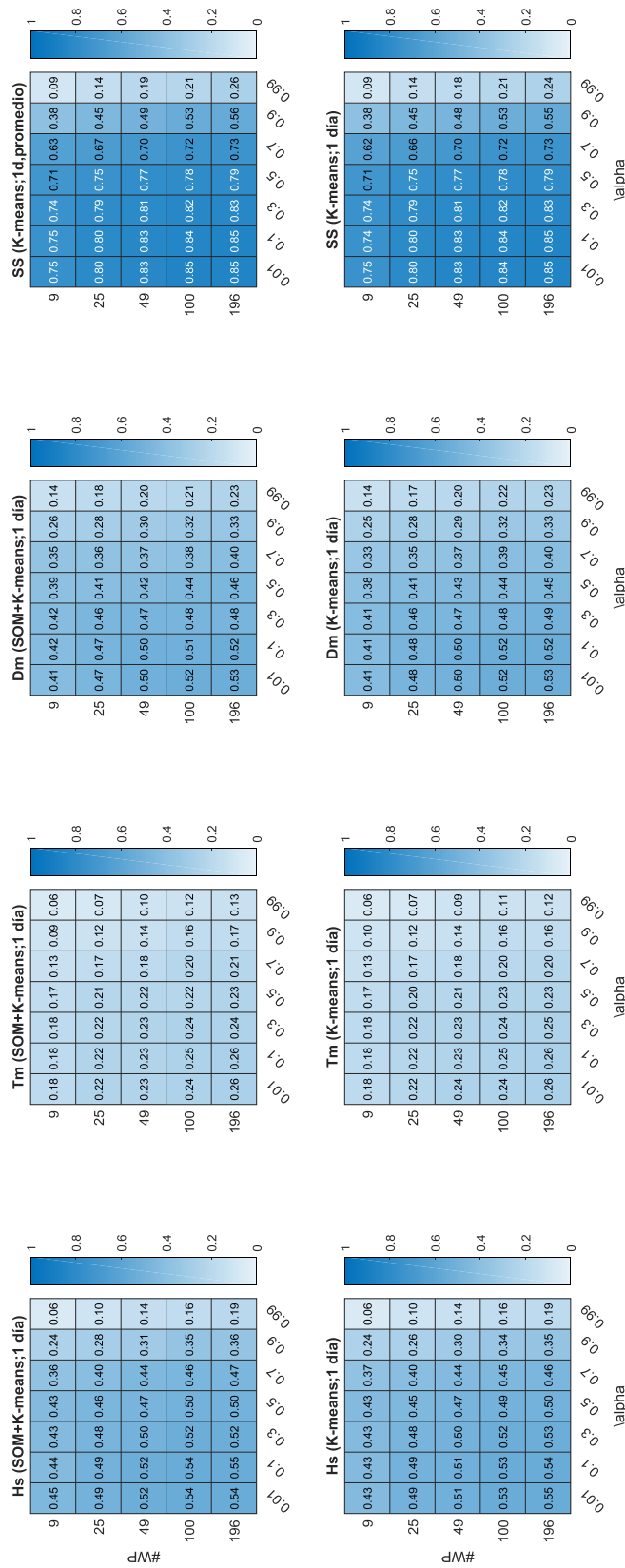


Figura 3.2. Comparación de varianza explicada mediante SOM+K-means y K-means, para distintos valores de número de WP (Nclus) y  $\alpha$ .

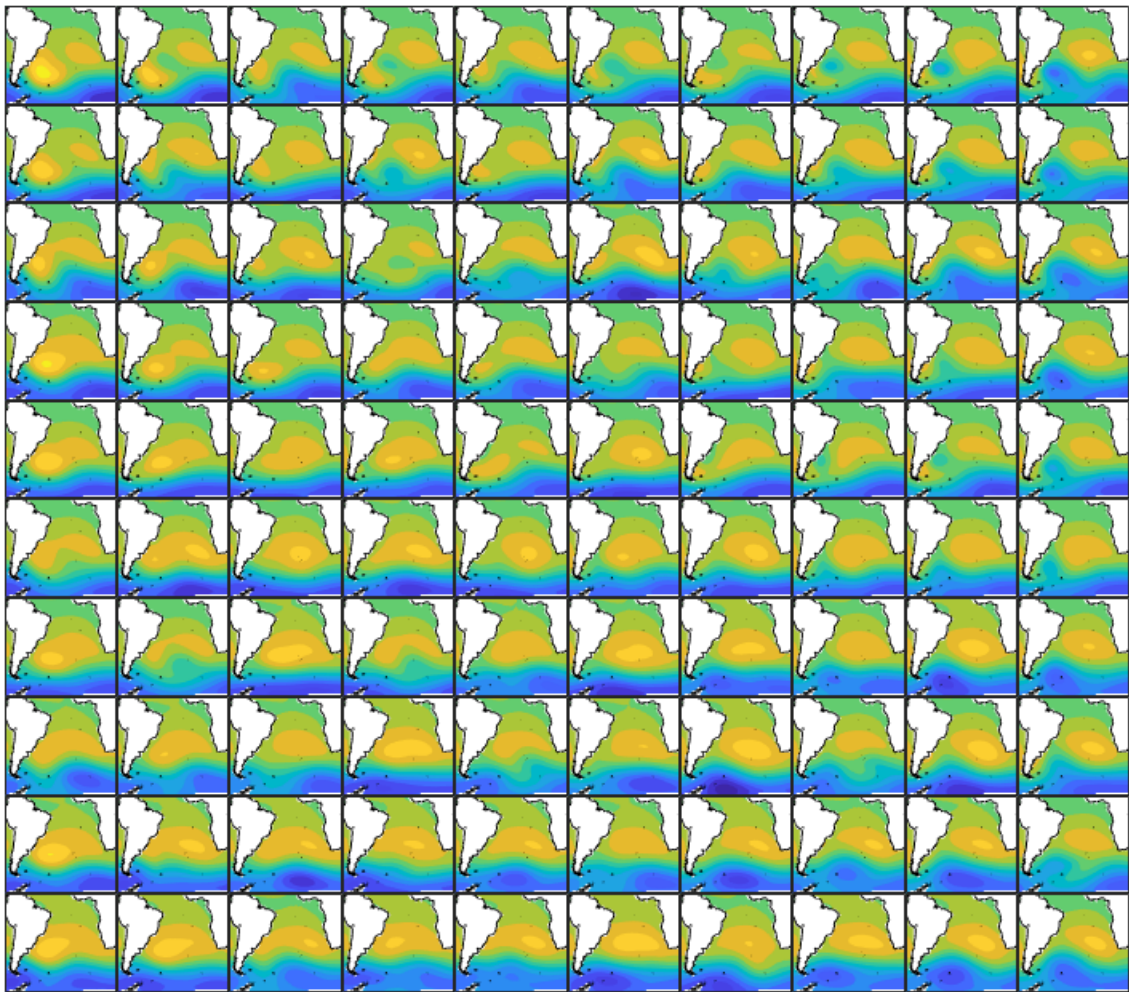
### 3.2 Patrones de circulación y estadísticos asociados para Necochea

En esta sección se presentan los resultados de la clasificación obtenidos para el nodo 25, ubicado frente a Necochea, utilizando los parámetros determinados en la sección anterior.

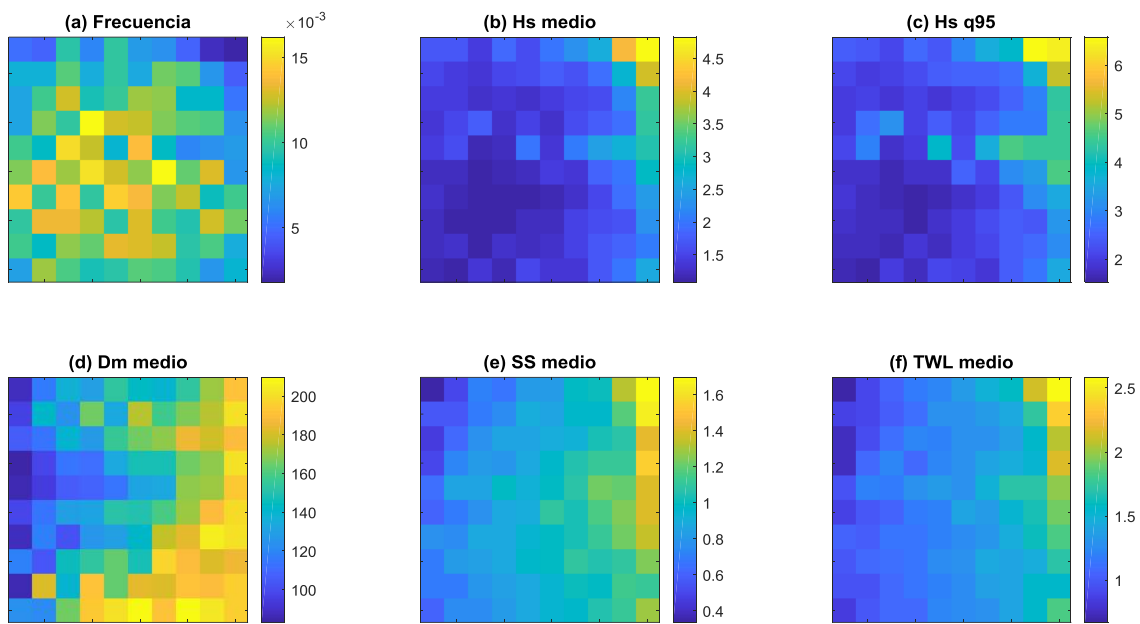
La Figura 3.3 presenta los 100 campos de presión medios, correspondientes a cada uno de los grupos (WP) identificados. La Figura 3.4 presenta la frecuencia de ocurrencia de cada WP, el valor medio de la altura de ola significativa ( $H_s$ ), la dirección media ( $D_m$ ), la marea meteorológica ( $SS$ ) y el nivel de mar total en playa ( $TWL$ ; ver ecuación [1]), así como el cuantil de 95% de  $H_s$ , para cada grupo. El nivel de mar total en playa se calcula, para cada estado de mar, como la suma de la marea meteorológica y el set-up, según la siguiente ecuación simplificada (Camus et al., 2016):

$$TWL = SS + 0.043\sqrt{H_s L_0} \quad [1]$$

De las Figura 3.3 y Figura 3.4 se desprende que los WP más frecuentes son los ubicados en la zona central de la Figura 3.3, mientras que los menos frecuentes son los ubicados en el vértice superior derecho de la misma. Estos últimos corresponden a situaciones caracterizadas por una baja presión bien definida ubicada frente a la costa de América del Sur, y se asocian a los mayores valores de  $H_s$ , tanto media como cuantil 95%, así como a los mayores valores medios de marea meteorológica ( $SS$ ) y nivel de mar total en playa ( $TWL$ ). Por otro lado, se observa que los WP ubicados en la zona inferior derecha de la Figura 3.3 corresponden a oleajes provenientes del sur (en promedio) y los WP ubicados en la zona superior izquierda corresponden a oleajes provenientes del este (en promedio). A su vez, los WP ubicados en la última columna de la Figura 3.3, en los que se observa siempre en mayor o menor medida la presencia de la baja presión en la costa de América del Sur (a diferencia de los WP de la primera columna de la Figura 3.3, asociados en general a una alta presión en dicha zona), se caracterizan por mayores valores de  $H_s$ ,  $SS$  y  $TWL$  que el resto de los WP.



**Figura 3.3.** Campo de presión en superficie promedio (*composite*) asociado a cada uno de los grupos (WP) identificados para la boya virtual de Necochea (tonos de azul corresponden a baja presión; tonos de amarillo a alta presión).



**Figura 3.4.** Para cada uno de los WP anteriores se presenta: (a) frecuencia media anual de ocurrencia y valores de (b) Hs promedio, (c) Hs de probabilidad acumulada 95%, (d) Dm promedio, (e) SS promedio y (f) TWL promedio, en la boya virtual de Necochea.

### 3.3 Proyecciones

Una vez construidos y caracterizados los grupos (WP) para cada uno de los nodos analizados (i.e. una vez obtenidos para cada nodo los resultados presentados en las Figura 3.3Figura 3.4 para el nodo 25), se procede a aplicar los pasos 4 y 5 de la metodología (Figura 2.1). Para ello se procede de la siguiente forma:

- (1) Se proyectan los campos de presiones de superficie de los GCM del período 1985-2005 (con variaciones según el modelo) en los distintos grupos de cada nodo, obteniendo así una caracterización del valor esperado de cada una de las variables analizadas (Hs, Dm, SS, etc.) para cada GCM y para cada nodo en la actualidad.
- (2) Se proyectan los campos de presiones de superficie de los GCM del período 2081-2100, escenario RCP8.5, en los distintos grupos de cada nodo, obteniendo así una caracterización del valor esperado de cada una de las variables analizadas para cada GCM y para cada nodo en el horizonte temporal de fin de siglo.
- (3) Se restan las estimaciones obtenidas en (1) y (2), obteniendo el cambio proyectado para cada variable y cada nodo por cada uno de los GCM.
- (4) Se calcula el cambio proyectado promedio de cada variable y para cada nodo y se determina si el mismo es significativo o no. Se considera que el cambio es significativo si al menos el 80% de los modelos muestran el mismo sentido de cambio y si la media de todos los cambios es mayor a su desviación estándar.

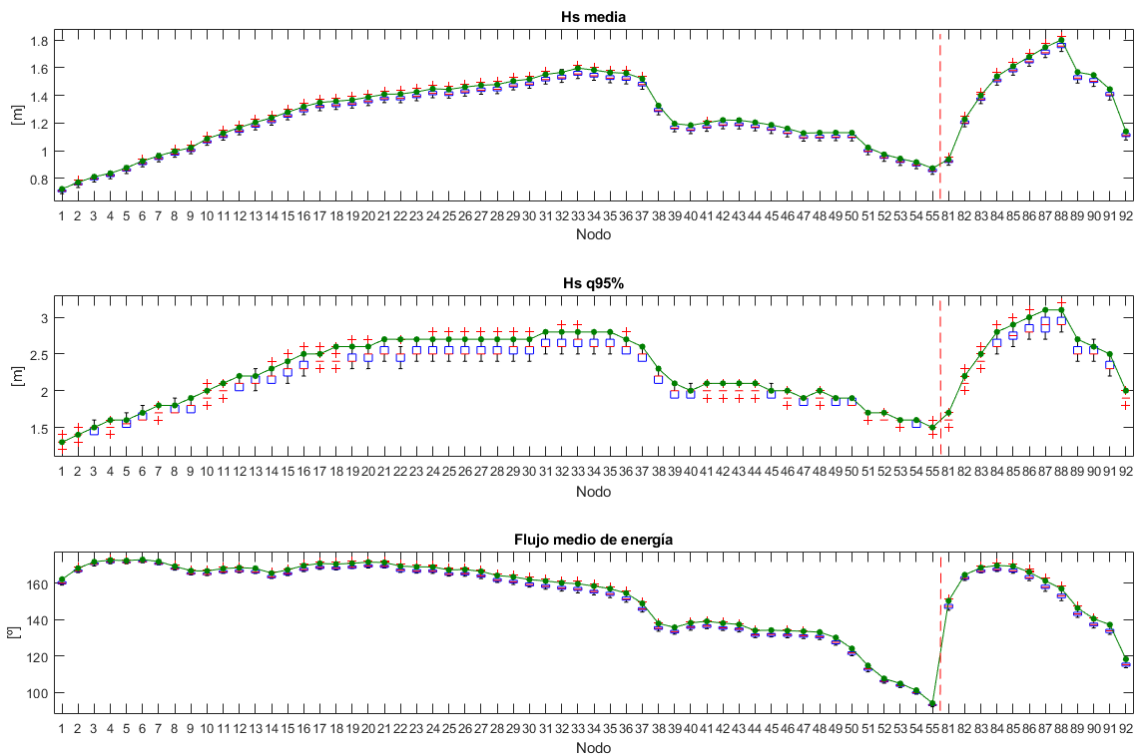
Siguiendo los pasos anteriores se analizó al cambio esperable en las siguientes variables:

- Altura de ola significativa media (Hs media)
- Altura de ola significativa de cuantil 95% (Hs 95%)
- Marea meteorológica de cuantil 95% (SS 95%)
- Nivel de mar total de cuantil 95% (TWL 95%)
- Dirección media del flujo de energía del oleaje

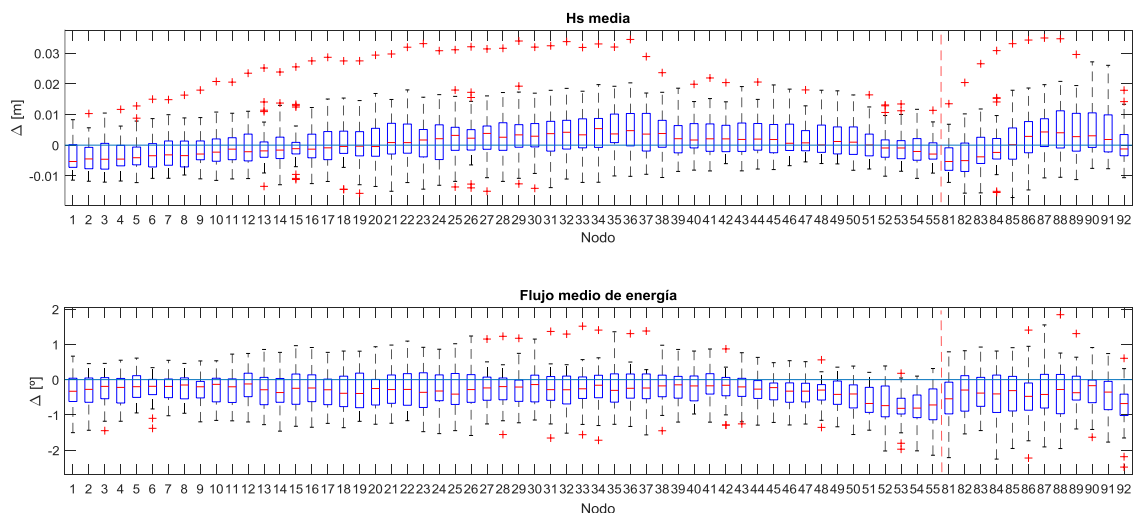
En general se observa que mediante el uso de la metodología propuesta se logra reproducir razonablemente bien el clima actual de estas variables a partir de los campos de presión en superficie de los GCM. Por ejemplo, la Figura 3.5 presenta los resultados obtenidos para la altura de ola significativa media y de cuantil 95% y para la dirección del flujo medio de energía. Se observa que, si bien los valores obtenidos a partir de los GCM son levemente menores a los obtenidos a partir del hindcast de oleaje, en general resultan satisfactorios y, en particular, reproducen con gran precisión la distribución espacial de los mismos.

Por otro lado, en lo que refiere a los cambios proyectados para el horizonte 2080-2100, se observa que para todas las variables los cambios son sumamente pequeños y no significativos, con la excepción de la dirección del flujo medio de energía, para la cual sí se proyecta un cambio significativo en un tramo de la costa. A modo de ejemplo la Figura 3.6 presenta los gráficos de cajas de las proyecciones de cambio para la altura de ola significativa media y la dirección del flujo medio de energía. En ambos casos se observa que los cambios son pequeños (de orden 1 cm para la altura de ola significativa y  $1^\circ$  para la dirección del flujo de energía), que en todos los nodos hay modelos que predicen incremento de la variable mientras que otros predicen decrecimiento, y que en general el valor cero (i.e. cambio nulo) queda incluido en el intervalo 25%-75% (límites inferior y superior de las cajas utilizados en los gráficos de cajas).

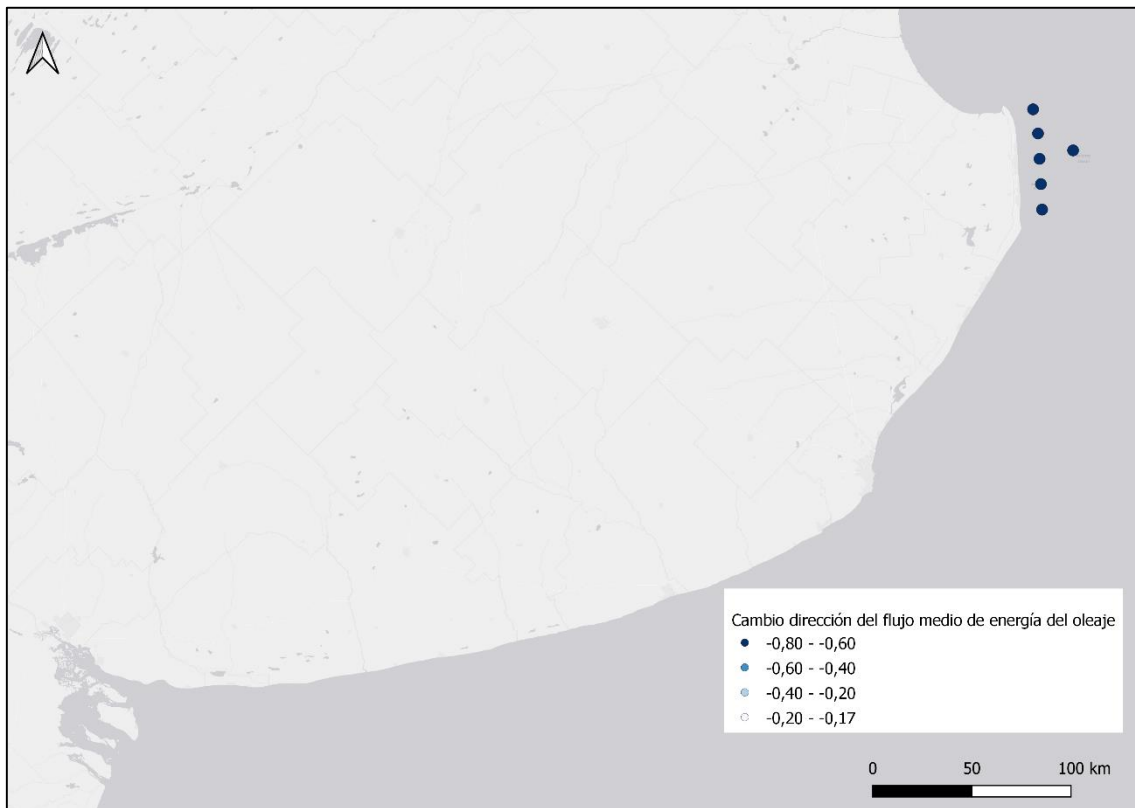
De las variables analizadas, solo se encontraron cambios significativos en el horizonte temporal 2080-2100, escenario RCP8.5, para la dirección media del flujo de energía del oleaje. La Figura 3.7 presenta la localización de los nodos para los que se obtiene proyección de cambio significativa y su magnitud; se observa únicamente se tendría cambio significativo al norte de Punta Médanos, en donde habría una rotación antihoraria de menos de  $1^\circ$  en la dirección media del flujo de energía.



**Figura 3.5.** Gráfico de cajas del valor esperado actual obtenido con los distintos GCM para Hs media, Hs95% y Dirección del flujo medio de energía, superpuesto a los valores obtenidos del hindcast de oleaje (curva verde).



**Figura 3.6.** Gráfico de cajas de los valores de cambio proyectados por cada GCM para cada uno de los nodos para las variables altura de ola significativa media (Hs media) y dirección media del flujo de energía del oleaje.



**Figura 3.7.** Nodos para los que se obtiene proyección de cambio significativo en la dirección media del flujo de energía, para el horizonte 2080-2100 con escenario RCP8.5. El color del nodo indica el valor medio de los cambios proyectados.

## 4 AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

En esta sección se muestran las proyecciones de nivel medio del mar regional para los escenarios climáticos RCP4.5 (escenario de estabilización de emisiones y otros forzantes a 2100) y RCP8.5 (escenario de altas emisiones y otros forzantes, sin estabilización a 2100) obtenidos a partir de los datos utilizados para realizar los análisis de cambio en el nivel de mar regional del IPCC AR5. Estos datos se encuentran disponibles en la página web de la Universidad de Hamburgo<sup>4</sup>. El dominio de los datos disponibles es global con resolución de 1°x1°.

### 4.1 Marco de referencia

Los cambios regionales en el nivel medio del mar pueden diferir de la media global de dicho cambio. Esto se debe entre otras cosas a procesos dinámicos del océano, cambios en la batimetría y cambios gravitatorios debido a la redistribución de las masas de agua en el sistema climático. Los procesos que afectan al nivel de mar incluyen tanto al océano, la atmósfera, los hielos terrestres y el ciclo hidrológico.

Desde el punto de vista del océano, los cambios en las corrientes, la densidad del agua y el nivel de mar están estrechamente relacionados, de forma que cambios en un punto del océano pueden impactar en localidades alejadas. Los cambios en temperatura y salinidad también producen cambios en el nivel de mar, produciendo cambios en el volumen global de agua en los océanos a partir del proceso de expansión térmica, al igual que la variabilidad espacial en la presión atmosférica.

Por otra parte, el intercambio de agua y hielo entre la tierra y el océano impacta al cambio en el nivel de mar de distintas formas. Mientras que una señal generada por masas de agua que se agrega al océano se propaga rápidamente, haciendo que el nivel de mar cambie en todo el globo, el aporte del agua subterránea proveniente de la tierra puede generar cambios en los niveles de mar locales, generando señales que pueden demorar años en propagarse por todo el océano. El intercambio de agua entre la tierra y el océano también resulta en patrones de cambio de nivel de mar denominados “huellas de nivel de mar” (*sea level fingerprints*), debidos a cambios en el campo gravitatorio y el movimiento vertical del fondo del océano asociado a efectos visco elásticos de la deformación de la tierra. Estos cambios en la distribución de masas también afectan el tensor de inercia del planeta tierra, afectando de esta forma la rotación de la tierra y así generando una respuesta adicional a las anteriores en el nivel de mar.

---

<sup>4</sup> <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5-slr.html>

Existen otros procesos que afectan al nivel de mar y no están asociados al cambio climático contemporáneo. En particular, la transferencia de masa desde el hielo terrestre al océano durante la última desglaciación contribuye significativamente al cambio de nivel de mar actual debido a la continua deformación visco elástica de la tierra y los correspondientes cambios en el fondo oceánico y la gravedad. A dichos cambios se les denomina ajuste isostático glacial (GIA). Por último, procesos antropogénicos que influyen en el volumen de agua almacenada en la tierra, tanto subterránea como superficial, o que afectan las características de la superficie terrestre que modifican el escurrimiento o evapotranspiración, modifican el ciclo hidrológico causando también su efecto en el nivel de mar. Existen otros procesos que pueden afectar al cambio, pero que escapan del análisis del IPCC AR5, como son por ejemplo efectos debido a movimiento tectónico, transporte de sedimento a los océanos, entre otros.

Los procesos descritos anteriormente contribuyen de diferentes maneras y con distintos grados de relevancia y su influencia se determina mediante diferentes metodologías. En particular las contribuciones se pueden separar en 4 subgrupos: componentes relacionadas al océano, componentes relacionados a los hielos, componente relacionado al aporte de aguas terrestres (reservorios, ríos, etc.) y el componente relacionado al ajuste isostático glacial (de aquí en más GIA). A continuación, se describe brevemente cómo se componen cada uno de estos grupos y se indica cómo se determinan las series temporales de la contribución de cada uno de ellos al cambio regional de nivel de mar.

Las componentes relacionadas al océano se dividen en tres: anomalía de nivel de mar dinámica, anomalía global asociada a la expansión térmica y anomalía debido a la presión atmosférica sobre el mar a través del efecto barométrico inverso. Estas componentes se calculan a partir de variables obtenidas de 21 modelos atmosféricos globales (GCM): ACCESS1-0, ACCESS1-3, CCSM4, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2, GFDL-CM3, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M, NorESM1-ME.

Las componentes relacionadas a los hielos se dividen en cinco: el balance de masa superficial (SMB, dada por acumulación y ablación de hielos) y las contribuciones dinámicas (dada por cambios en los flujos de los hielos y reacciones a los cambios topográficos) de Groenlandia y la Antártida, y la contribución de los glaciares (el resto de los hielos terrestres sin incluir Groenlandia y la Antártida). Para determinar el balance de masa superficial se utilizan diferentes aproximaciones según sea para Groenlandia o la Antártida. En el caso de Groenlandia, se calcula a partir de la temperatura superficial del aire utilizando una fórmula cubica polinómica de Fettweis (Fettweis et al., 2013), y ajustando los resultados utilizando variables de salida de varios modelos del CMIP5. Para el caso de la Antártida se utilizan resultados de Gregory and Huybrechts (Gregory et al., 2006) a partir de modelos del CMIP3. Por otra parte, la contribución dinámica se determina escalando la tasa media de pérdida de masa de hielo (en unidades de mm/año, determinada para el periodo de años 2005-2010 descripta en capítulos anteriores del IPCC) desde 2007 hasta el 2100. Luego para la contribución de los glaciares se utiliza una función parametrizada ajustada a diferentes modelos globales de glaciares ya existentes, que determina

el cambio en el nivel de mar a partir de la temperatura del aire en superficie, obtenido también a partir de modelos del CMIP3 y CMIP5.

La contribución relacionada a las aguas terrestres se calcula de forma similar a la utilizada en el caso del aporte dinámico de los grandes hielos terrestres, escalando la tasa de aporte al cambio de nivel de mar global conocido. Para determinar la tasa de aporte al cambio de nivel de mar global se utilizan observaciones satelitales y modelos hidrológicos globales. Es importante aclarar que esta última contribución, al igual que las contribuciones dinámicas de Groenlandia y la Antártida, no dependen del escenario proyectado, debido a que no se han encontrado correlaciones importantes entre los escenarios modelados y los resultados de la contribución.

Por último, la contribución de GIA está asociada a la transferencia de masas de hielo al océano durante la última desglaciación y no está asociado al cambio climático contemporáneo. Existen modelos que analizan su contribución y para este caso se calcula a partir del modelo ICE-5G (Peltier et al., 2004) y el modelo de capa de hielo de ANU (Lambeck et al., 1998) utilizando el código SELEN para la ecuación de nivel de mar (Farrell y Clark 1976; Spada y Stocchi 2006).

#### 4.2 Proyecciones

Se obtienen las series temporales de aumento del nivel medio del mar en nueve puntos a lo largo de la costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires (Figura 4.1; los nueve puntos corresponden a puntos de agua en la costa de Buenos Aires en la malla de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  en la que están definidos los datos; en particular los puntos 5 y 9 corresponden a nodos acuáticos en los modelos globales, a pesar de estar localizados en tierra en la realidad).

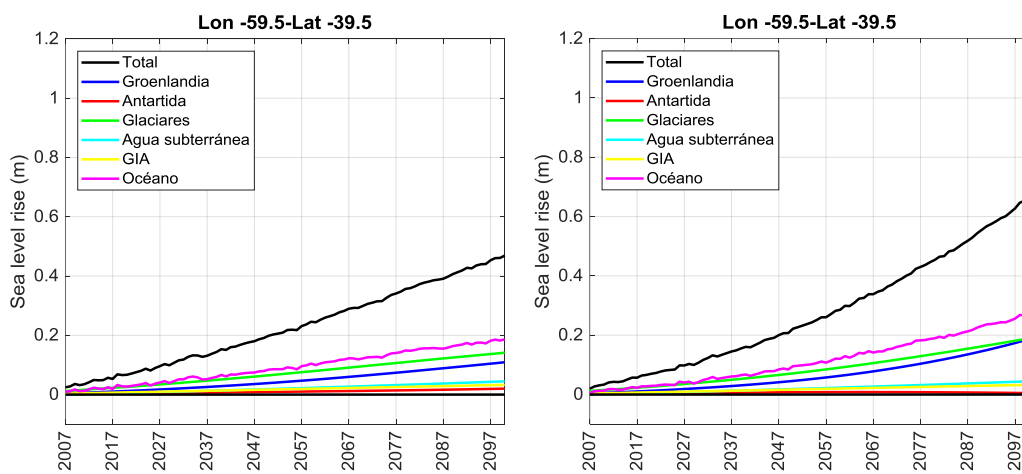
En la Figura 4.2 se muestra la serie temporal del aporte de cada contribución al aumento de nivel medio del mar, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, para el nodo 6. El orden de relevancia de cada componente es similar para todo el tramo de costa analizado, por lo que este nodo sirve de referencia general. Se observa que la contribución más importante viene dada por el componente asociado a los procesos oceánicos: la expansión térmica, procesos dinámicos y el efecto de la presión atmosférica sobre la superficie del mar. Le sigue el aporte de los glaciares y a continuación el aporte de Groenlandia, suma de SMB y el aporte dinámico. Mientras que el aumento de nivel medio total para la localidad en 2100, para RCP4.5, alcanza aproximadamente los 45 cm, el aporte de la componente oceánica se acerca a los 20 cm, lo cual representa cerca de la mitad del aumento total.

Las Figura 4.3 y Figura 4.4 presentan la proyección del aumento del nivel medio del mar en los nueve nodos analizados (valor medio y límites del intervalo de confianza de 90%). Los valores correspondientes a los años 2045 y 2100 se listan en las Tabla 4.1. **Aumento de nivel medio del mar en 9 puntos a lo largo de la costa de la provincia de Buenos Aires para escenarios RCP 4.5 en los años 2045 y 2100, respecto a la media del período 1985-2005.** y Tabla 4.2. Se observa que en cualquiera de los dos casos las diferencias en las proyecciones a lo largo de la costa son pequeñas en términos relativos (algún cm en aumento de decenas de cm). En lo que refiere a los aumentos proyectados, estas proyecciones indican aumentos de unos 20 cm en el horizonte

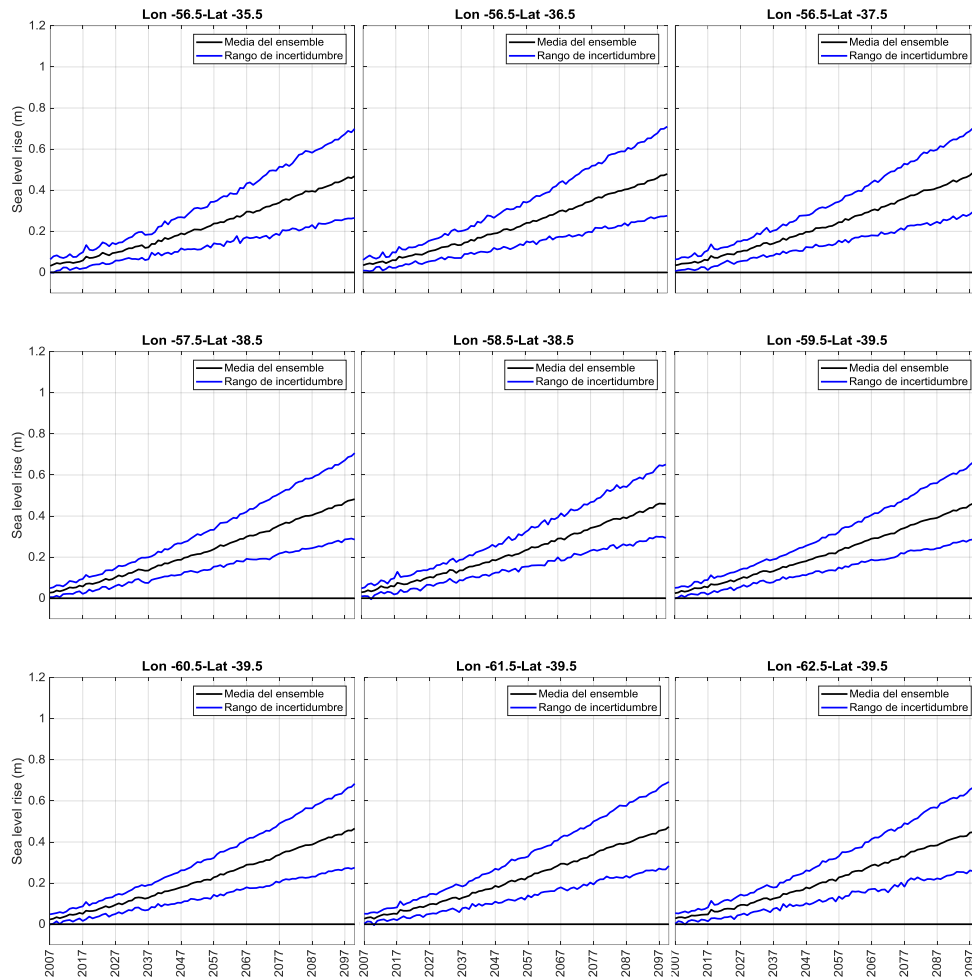
2045 para ambos escenarios y de 50 cm (70 cm) para el horizonte 2100 para el escenario RCP4.5 (RCP8.5). Cabe señalar que para 2100 se obtienen algunos valores de proyección de aumento del nivel medio del mar en el escenario RCP8.5 que superan 1 m.



**Figura 4.1.** Localización de los puntos para los cuales se extraen las series temporales de aumento de nivel de mar en la provincia de Buenos Aires.



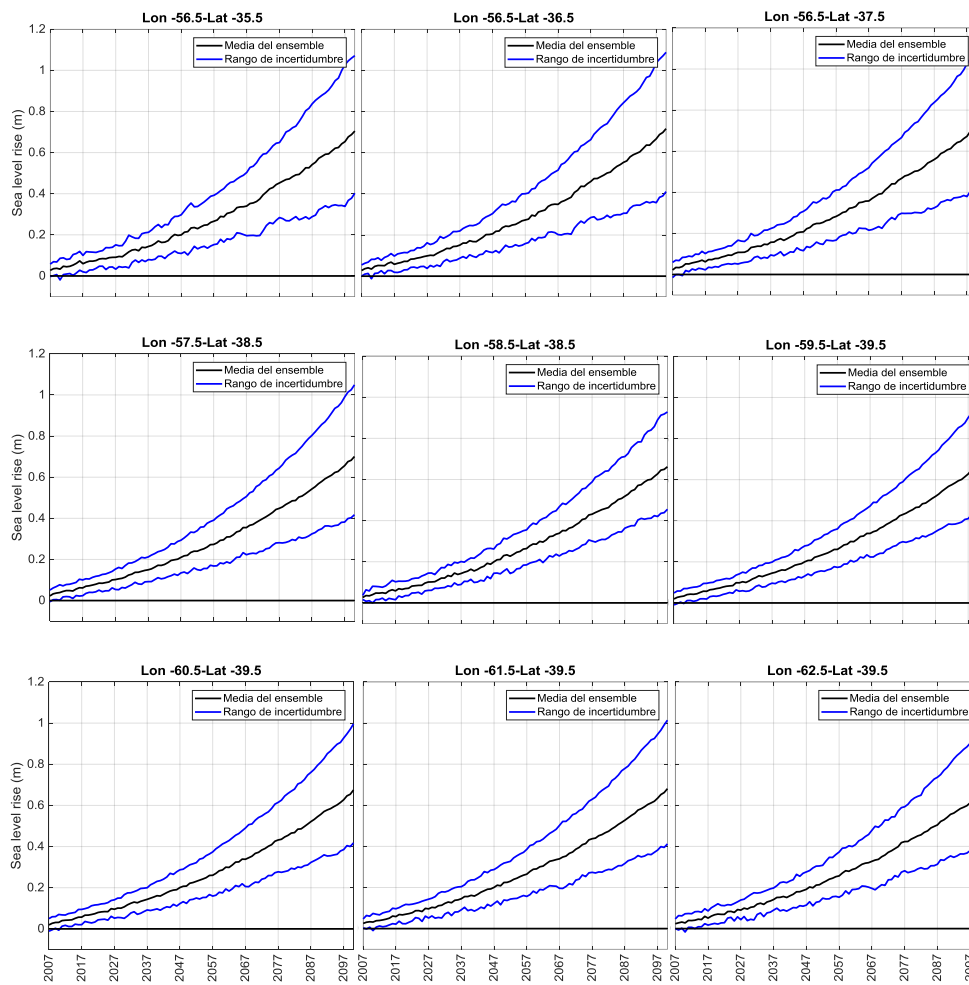
**Figura 4.2.** Aporte de cada componente al aumento del nivel medio del mar en relación a la media del período 1986-2006, para una localidad representativa de la costa de la provincia de Buenos Aires, RCP 4.5 panel izquierdo y RCP 8.5 panel derecho.



**Figura 4.3.** Proyección de aumento del nivel medio del mar para diferentes puntos de la costa de la provincia de Buenos Aires, respecto a la media del período 1986-2005, para el escenario RCP 4.5.

**Tabla 4.1.** Aumento de nivel medio del mar en 9 puntos a lo largo de la costa de la provincia de Buenos Aires para escenarios RCP 4.5 en los años 2045 y 2100, respecto a la media del período 1985-2005.

Nodo	Aumento NMM a 2045 (RCP4.5) [cm]			Aumento NMM a 2100 (RCP4.5) [cm]		
	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.
1	<b>18</b>	10	26	<b>47</b>	27	70
2	<b>18</b>	10	28	<b>48</b>	28	71
3	<b>19</b>	10	28	<b>48</b>	28	71
4	<b>18</b>	11	26	<b>48</b>	29	71
5	<b>17</b>	11	24	<b>46</b>	29	66
6	<b>17</b>	11	24	<b>47</b>	29	67
7	<b>17</b>	10	25	<b>47</b>	28	68
8	<b>17</b>	10	25	<b>47</b>	28	69
9	<b>16</b>	9	24	<b>47</b>	28	68
1	<b>18</b>	10	26	<b>47</b>	27	70
2	<b>18</b>	10	28	<b>48</b>	28	71



**Figura 4.4.** Proyección de aumento del nivel medio del mar para diferentes puntos de la costa de la provincia de Buenos Aires, respecto a la media del período 1986-2005, para el escenario RCP 8.5.

**Tabla 4.2.** Aumento de nivel medio del mar en 9 puntos a lo largo de la costa de la provincia de Buenos Aires para escenarios RCP 8.5 en los años 2045 y 2100, respecto a la media del período 1985-2005.

Nodo	Aumento NMM a 2045 (RCP4.5) [cm]			Aumento NMM a 2100 (RCP4.5) [cm]		
	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.
1	20	12	29	70	40	107
2	20	12	29	72	41	109
3	20	13	28	72	42	109
4	20	13	28	70	42	105
5	19	13	26	66	46	93
6	19	13	26	67	45	96
7	19	12	26	67	42	97
8	19	12	27	68	41	101
9	18	11	26	66	42	97
1	20	12	29	70	40	107
2	20	12	29	72	41	109

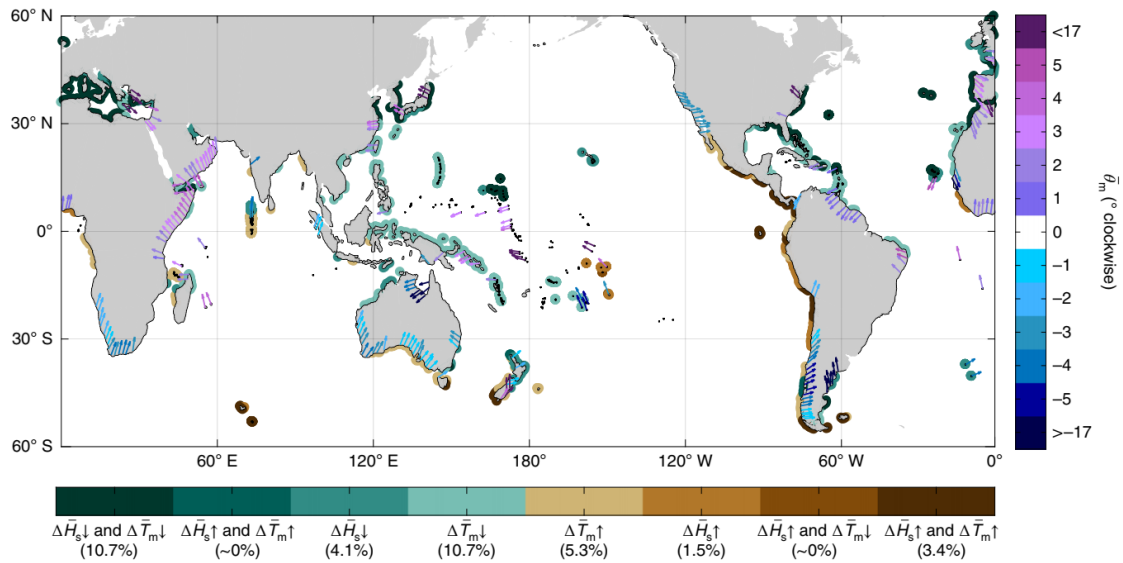
## 5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que las proyecciones de cambio en las variables relacionadas con el oleaje y la marea meteorológica son muy bajas, inclusive para los escenarios de cambio climático relativamente severos (RCP8.5), siendo estos cambios en general no significativos. En contraposición a lo anterior, las proyecciones de aumento de nivel medio del mar en la región sí son significativas, del orden de 20 cm para mediados del siglo XXI y en el rango 30 cm – 1 m para finales del siglo XXI, según qué escenario se considere.

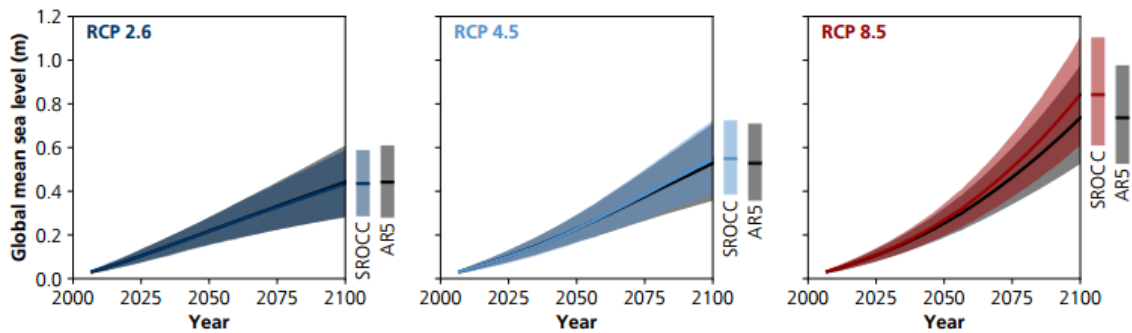
Estos resultados son coherentes con los obtenidos para la costa de Uruguay en el informe IH-Cantabria (2019), en donde las proyecciones de cambio del oleaje y la marea meteorológica, si bien son significativas en algunos casos, son de magnitud tal que resultan despreciables al contrastarlas con las proyecciones de aumento del nivel medio del mar (y sus consecuencias).

A su vez, los resultados obtenidos en cuanto a las proyecciones de oleaje son coherentes con los obtenidos por Morim et al. (2019), en donde se analizan proyecciones de cambio del oleaje obtenidas por varias instituciones mediante distintas metodologías. Entre otros resultados, este estudio señala las zonas en que hay una señal robusta de cambio en el oleaje y las zonas en que no (ya sea por falta de acuerdo entre los distintos modelos o porque el cambio no es significativamente distinto de cero). Como se aprecia en la Figura 5.1 (tomada de Morim et al. 2019), en la costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires no hay una señal robusta de cambio en el oleaje.

Por último, resulta relevante señalar algunos de los resultados parciales incluidos en el borrador del informe “*The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*” también correspondiente al IPCC (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate - SROCC*, IPCC 2019), el cual se ha hecho público recientemente. En las proyecciones de aumento de nivel medio del mar incluidas en el SROCC se reemplazan los resultados del aporte de la Antártida por otros más actualizados respecto al AR5, según los cuales el aporte de esta capa de hielo será aún mayor que el considerado en el AR5 (y por ende en este trabajo). En la Figura 5.2, (extraída del SROCC) se muestra la diferencia en el aumento del nivel medio del mar global calculado para el AR5 y el calculado a partir de estudios más recientes; se observa que tanto para el RCP4.5 como para el RCP8.5 las nuevas estimaciones son mayores a las incluidas en el AR5, siendo la diferencia particularmente notoria para fin de siglo en el escenario RCP8.5. Este resultado refuerza aún más la conclusión alcanzada en este trabajo en cuanto a la relevancia del aumento del nivel medio del mar como principal cambio en lo que refiere a la dinámica marina y su efecto sobre la costa.



**Figura 5.1.** Zonas en que las proyecciones de cambio del clima de oleaje a 2100 en el escenario RCP8.5 son robustas. Tomada de Morim et al. 2019.



**Figura 5.2.** Serie temporal de cambio global en el nivel de mar para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 utilizados en el SROCC y como referencia los resultados del AR5. Todos los aportes se están basados en resultados del AR5 a no ser por la contribución de la Antártida. Extraído de SROCC.

## REFERENCIAS

- Camus et al. 2014. A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate. *J. Geophys. Res. Ocean.* 119, 1–17. DOI: 10.1002/2014JC010141
- Camus et al. 2016. An atmospheric-to-marine synoptic classification for statistical downscaling marine climate. *Ocean Dyn.* 66, 1589–1601. DOI: 10.1007/s10236-016-1004-5
- Camus et al. 2017. Statistical wave climate projections for coastal impact. *Earth's Future.* 5, 918–933. DOI: 10.1002/ef2.234
- Cannon, A.J., 2012. Regression-guided clustering: A semisupervised method for circulation-to-environment synoptic classification. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51, 185–190. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0155.1
- Carson, M. et al., 2016: Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change*, 134 (1-2), 269-281.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change Supplementary Material. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)] Available from [www.climatechange2013.org](http://www.climatechange2013.org) and [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- Farrell, W.E., and Clark, J.A., 1976. On postglacial sea-level, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 46, 647–667.
- Fettweis, X., B. Franco, M. Tedesco, J. H. van Angelen, J. T. M. Lenaerts, M. R. van den Broeke, and H. Gallee, 2013: Estimating Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric model MAR. *Cryosphere*, 7, 469–489.
- Gregory, J. M., and P. Huybrechts, 2006. Ice-sheet contributions to future sea-level change. *Philos. Trans. R. Soc. London A*, 364, 1709–1731.
- IH-Cantabria, 2019, Entregable 3.2: PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO. OLEAJE, RESIDUO DEL NIVEL DEL MAR Y NIVEL MEDIO DEL MAR EN URUGUAY. Disponible en <https://www.ctc-n.org/content/entregable-32-proyecciones-de-cambio-clim-tico-oleaje-residuo-del-nivel-del-mar-y-nivel>
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H. – O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press.
- Kohonen, T., 2001. *Self-Organizing Maps*. Third Edition. Springer Series in information Sciences 30. Springer-Verlag Berlin.
- Lambeck, K., C. Smither, and P. Johnston, 1998: Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe. *Geophys. J. Int.*, 134, 102–144.

Morim, J., Hemer, M., Wang, X. L., Cartwright, N., Trenham, C., Semedo, A., ..., Andutta, F. (2019). Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nature Climate Change*, 9 (9), 711–718. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5>

Peltier, W. R., 2004: Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 111–149.

Slangen, A. et al., 2014a: Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124 (1-2), 317-332, DOI: 10.1007/s10584-014-1080-9.

Slangen, A. B. et al., 2017b: Evaluating model simulations of twentieth-century sea level rise. Part I: Global mean sea level change. *Journal of Climate*, 30 (21), 8539-8563.

Spada, G., and Stocchi, P., 2006. *The Sea Level Equation, Theory and Numerical Examples*, Aracne, Roma, p. 96, ISBN: 88–548–0384–7.