

**DEVELOPMENT OF A MARINE DYNAMICS DATABASE FOR THE  
PANAMANIAN COASTS TO ASSESS VULNERABILITY AND CLIMATE  
CHANGE IMPACTS TO SEA LEVEL RISE**

**UN RFP NUMBER: 3100004805**

**Entregable 3.2**

**“Base de datos de dinámicas marinas en Panamá”**

**Tarea 3: Desarrollo de datos numéricos de las dinámicas marinas a alta resolución**

## ÍNDICE

ANTECEDENTES .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. MARCO METODOLÓGICO .....	4
3. BASES DE DATOS DE PARTIDA .....	7
3.1. Datos batimétricos .....	7
3.2. Registros instrumentales .....	8
3.3. Datos atmosféricos procedentes de reanálisis .....	9
3.4. Datos de las dinámicas marinas .....	12
3.4.1. Oleaje .....	12
3.4.2. Nivel del mar .....	13
4. DOMINIOS Y MALLAS DE CÁLCULO .....	17
5. BASES DE DATOS DE NIVEL DEL MAR .....	20
5.1. Hindcast de nivel del mar compuesto .....	20
5.1.1. Configuración del modelo de nivel .....	20
5.1.2. Resultados y Validación .....	21
5.2. Proyecciones climáticas de nivel medio del mar .....	24
6. BASE DE DATOS DE OLEAJE .....	31
6.1. Configuración del modelo de oleaje .....	31
6.2. Resultados y Validación .....	32
7. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES .....	38
BIBLIOGRAFÍA .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la metodología. ....	6
Figura 2. Datos batimétricos utilizados. (Izquierda) Base de datos Global de GEBCO (2021) y (derecha) batimetría regional procedente del proyecto de Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica (TNC, 2008). ....	7
Figura 3. Serie temporal de (arriba) velocidad (W) y (centro) dirección (Dir W) del viento en superficie y de (abajo) presión atmosférica a nivel del mar (SLP) en un punto con coordenadas [-79°,7°]. ....	10
Figura 4. (Arriba) Valor medio y (abajo) percentil del 99% de la velocidad del viento en superficie en la región oceánica de Panamá y alrededores. ....	11
Figura 5. Situación sinóptica de un evento extremo, correspondiente al 22 de noviembre de 2016 a las 12:00 h. (Izquierda) Velocidad y dirección del viento y (derecha) presión atmosférica. ....	11
Figura 6. Resultados de la calibración de la altura de ola de la base de datos de hindcast GOW ERA5 en un punto frente a la costa Pacífico panameña. Esta calibración se ha llevado a cabo con los datos de altimetría de ESA Sea State CCI v1 en un radio de 0.25° en torno al punto objetivo. ....	13
Figura 7. Valor de la pleamar máxima viva equinoccial a lo largo de la costa de Panamá. ....	14
Figura 8. Valor del rango (o carrera) de marea a lo largo de la costa panameña (m). ....	14
Figura 9. Series temporales de anomalías en el nivel medio del mar (o sea surface height, SSH) de (izquierda) la base de datos de CMEMS y (derecha) de la de CFSR en (arriba) un punto frente a la costa caribeña (Lon: -80°, Lat: 12°) y (abajo) frente a la costa pacífico (Lon:-81°, Lat: 6°) de Panamá. En negrita se han marcado los años 1997 y 2015. ....	15
Figura 10. Comparación de las bases de datos de CMEMS y CFSR con los registros instrumentales de Cristóbal y Naos. ....	16
Figura 11. Ejemplo de mallas de mayor extensión creadas para probar su idoneidad en este proyecto. (Izquierda) Malla para el Caribe y (derecha) malla para el Pacífico. ....	18
Figura 12. Malla de cálculo de la costa Caribe panameña. ....	19
Figura 13. Malla de cálculo de la costa Pacífico panameña. ....	19
Figura 14. Ejemplo de series temporales de nivel del mar obtenidas con el modelo ADCIRC (línea azul) en el nodo más cercano a la localización de los mareógrafos. En negro se representa para comparación el registro de nivel del mar medido por los 6 mareógrafos disponibles. ....	22
Figura 15. Validación de la base de datos de nivel del mar generada con el modelo ADCIRC, utilizando los datos medidos por los 6 mareógrafos disponibles en Panamá. ....	23
Figura 16. Valor del percentil del 99% del nivel del mar compuesto (SWL, en metros) a lo largo de la costa panameña. ....	24
Figura 17. Los escenarios de emisiones y sus cinco trayectorias socioeconómicas (SSP). Se ilustran los niveles de temperatura relativos a la era pre-industrial, los niveles actuales (2020) y las ramificaciones de los diferentes escenarios a lo largo del siglo XXI según las cinco trayectorias socioeconómicas. (Meinshausen M. et al. 2020). ....	25
Figura 18. Series temporales de forzamiento radiativo (W m <sup>-2</sup> ) para datos históricos (1765-2004), y para escenarios futuros de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP;2005-2100) y su continuación como RCPs ampliadas (2100-2500) y como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP; 2005-2100). Los escenarios RCP se muestran como curvas discontinuas, y los escenarios SSP se muestran como curvas sólidas. (SROCC 2019, Chapter 1, Supplementary material). ....	26
Figura 19. Serie de Aumento del Nivel Medio del Mar (ANMM) en la ubicación 10°N y -79°W, frente a la costa Caribe de Panamá. Se muestran los 107 percentiles del ensemble para los escenarios SSP2-4.5	

y SSP5-8.5 y periodo 2020-2150 de la base de datos regional (RMSL) con nivel de confianza medio. La línea sólida en negro representa el percentil del 50% y las etiquetas el ANMM para los horizontes 2050 y 2100. ....	28
Figura 20. Serie de Aumento del Nivel Medio del Mar (ANMM) en la ubicación 7°N y -80°W, frente a la costa Pacífico de Panamá. Se muestran los 107 percentiles del ensemble para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y periodo 2020-2150 de la base de datos regional (RMSL) con nivel de confianza medio. La línea sólida en negro representa el percentil del 50% y las etiquetas el ANMM para los horizontes 2050 y 2100. ....	28
Figura 21. Patrones espaciales de los valores de los percentiles del 5, 50 y 95% de ANMM (o SLR) a lo largo de la costa de Panamá para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el año 2050, con un nivel de confianza medio. ....	29
Figura 22. Patrones espaciales de los valores de los percentiles del 5, 50 y 95% de ANMM (o SLR) a lo largo de la costa de Panamá para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el año 2050, con un nivel de confianza bajo. ....	30
Figura 23. Series temporales generadas de las variables del estado de mar (altura de ola (Hs), periodo medio y de pico (Tm y Tp) y dirección media (Dir) del oleaje en un punto frente a la costa Caribe de Panamá con coordenadas [Lon:-82.03°, Lat: 9.277°].....	32
Figura 24. Puntos objetivo (en azul) donde se ha llevado a cabo la validación de la base de datos de oleaje en el litoral (arriba) Caribe y (abajo) Pacífico de Panamá. La línea verde discontinua indica el área circular en el que se han tomado los datos de satélite disponibles para la validación. ....	33
Figura 25. Validación de la altura de ola modelada en la costa Caribe, en los 7 puntos objetivo mostrados en la figura anterior-izquierda. ....	34
Figura 26. Validación de la altura de ola modelada en la costa Pacífico, en los 5 puntos objetivo mostrados en la figura anterior-derecha. ....	35
Figura 27. Valores medios de altura de ola significativa (Hs, m), periodo medio (Tm, s), periodo de pico (Tp, s) y dirección media del oleaje (Dir, °) a lo largo de la costa panameña. ....	36
Figura 28. Percentil del 99% de altura de ola significativa (Hs, m), periodo medio (Tm, s) y periodo de pico (Tp, s) a lo largo de la costa panameña. ....	37
Figura 29. Imagen raster de los datos batimétricos regionales procedentes del proyecto de “evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica”. Se observa la falta de información en la región de Guna Yala (zona sureste de la imagen).....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá.....	8
Tabla 2. Altímetros integrados en la base de datos Sea State CCI v1. ....	9
Tabla 3. Características de las bases de datos globales de anomalías en el nivel medio del mar analizadas .....	15
Tabla 4. Características de las mallas numéricas .....	18
Tabla 5. Rango de valores de ANMM a lo largo de la costa de Panamá en el año 2050 para los percentiles del 5, 50 y 95% para dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) y los niveles de confianza medio y bajo. ....	29
Tabla 6. Rango de variación de los valores medios y del percentil del 99% de las variables del estado de mar del oleaje.....	35

## ANTECEDENTES

En agosto de 2021, Naciones Unidas publicó, a través del Climate Technology Centre and Network (CTCN), la solicitud de propuesta (Request for Proposal, RFP) para la asistencia técnica en el “Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar”. El principal objetivo del proyecto es desarrollar esta base de datos de alta resolución. Además, se pretende, por un lado, elaborar unas herramientas y guías prácticas para la evaluación del riesgo costero utilizando los datos generados, así como establecer unas recomendaciones de medidas de adaptación costeras basadas en la naturaleza. Por otro lado, busca formar y capacitar a los expertos de la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente para que sean capaces de utilizar los datos generados y llevar a cabo el análisis de riesgos.

Este proyecto ha sido concedido al Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria, España) que, junto con el Ministerio de Ambiente de Panamá, va a trabajar en el desarrollo de las distintas tareas (productos) previstas.

Este documento en concreto se enmarca dentro del producto 3 “Desarrollo de datos numéricos de las dinámicas marinas a alta resolución” y, específicamente, corresponde a la actividad 3.2 que se basa en “la creación de los modelos para la obtención de las bases de datos de alta resolución de las dinámicas marinas”. El contenido de este informe describe las bases de datos generadas en esta tarea del proyecto, especificando los datos de entrada, la configuración y calibración de los modelos numéricos, los resultados y validaciones de los productos generados, así como las limitaciones de las bases de datos generadas y recomendaciones para futuros modeladores.

La selección de las bases de datos que se van a utilizar en esta actividad (tanto como datos de entrada como para la validación de las bases de datos generadas) se llevó a cabo en el informe anterior, correspondiente al entregable 3.1-b titulado “Revisión y mapeo de las condiciones del clima en la costa, considerando los eventos met-oceánicos históricos”. En dicho informe se hizo una revisión y comparación de las distintas bases de datos de dinámicas marinas disponibles para Panamá y se seleccionaron las más adecuadas, que se utilizan en este documento. Por tanto, para mayor información sobre las bases de datos utilizadas en este informe, recomendamos leer el entregable 3.1-b.

Por otra parte, los datos generados en esta actividad son el punto de partida para calcular las cotas de inundación que se utilizarán para analizar la evolución de la línea de costa. Todo esto se explicará en el informe asociado a la actividad 3.3 del proyecto “evolución temporal de la línea de costa en Panamá”.

Los productos generados a partir de estas bases de datos y que estarán disponibles para descarga en el portal nacional de SINIA se describen con detalle en el entregable 3.6 de este proyecto “Diseño de la base de datos”.

## 1. INTRODUCCIÓN

La costa de la República de Panamá se extiende, aproximadamente, a lo largo de 3000 km, de los cuales 1700.6 km corresponden al litoral Pacífico y 1287.7 km, al Caribe. Se caracteriza por su gran diversidad de ecosistemas y accidentes costeros y por su gran importancia socio-económica. De hecho, el 50% de la población panameña habita en la zona costera. La costa panameña se ve afectada por fenómenos met-oceánicos como los ciclones tropicales, los eventos Nortes, los tsunamis, el fenómeno de El Niño/La Niña, etc. susceptibles de causar condiciones extremas en las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar. Por otro lado, las costas, en general, son zonas especialmente susceptibles a los impactos del cambio climático, al situarse en la interfaz entre la tierra y el mar y albergar distintos procesos que las convierten en zonas altamente dinámicas. Los principales impactos identificados en la costa son la inundación y la erosión, que dependen principalmente de las variables superficiales marinas, que son el oleaje, la marea meteorológica y el aumento del nivel medio del mar.

Para llevar a cabo una adecuada evaluación de los principales impactos costeros a lo largo del litoral panameño, se requiere tener información de todas las variables implicadas con suficiente resolución espacio-temporal. A fin de dar respuesta a esta demanda, se han generado unas bases de datos de las condiciones históricas de oleaje y nivel del mar en las aguas oceánicas y costeras de la República de Panamá.

Este documento describe la metodología y los resultados obtenidos a alta resolución de las dinámicas marinas que se describen a continuación:

- Nivel medio del mar

El nivel medio del mar (MSL por su sigla en inglés) se refiere al promedio de la superficie del mar en todas las fases de la marea astronómica. El nivel medio del mar es la variable más relevante en los estudios de cambio climático en la costa. El calentamiento global observado en el último siglo ha dado lugar al aumento de la temperatura del agua del mar, con su consiguiente expansión térmica, y al deshielo de glaciares y otras reservas de agua continentales, lo que, en conjunto, está produciendo el aumento del nivel medio del mar global (3.2 mm al año desde 1993 hasta 2013). Debido a la inercia del sistema climático, es muy probable que este efecto perdure durante mucho tiempo, aun mitigando totalmente la emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, se espera que los cambios del nivel medio del mar tengan un patrón regional fuerte, de forma que algunos lugares experimenten desviaciones significativas respecto del cambio medio global.

- Marea astronómica y meteorológica

La marea astronómica es la variación periódica de la superficie del mar debido a forzamientos astronómicos (principalmente las fuerzas gravitacionales que ejercen la Luna y el Sol sobre la Tierra). Produce ascensos y descensos cíclicos del nivel por la interacción de los astros mencionados (Douglass, Nathan, & Malyszek, 2004).

La marea meteorológica es la variable que define la variación del nivel del mar como consecuencia de agentes atmosféricos sobre la superficie marina, en concreto, cambios en la presión atmosférica y en el viento (US Army Corps of Engineers [USACE], 2003). Ciertas condiciones meteorológicas (ej. ciclogénesis) dan lugar a una sobre elevación del nivel del mar que, cuando coinciden con mareas astronómicas altas, pueden dar lugar a niveles del agua especialmente altos, generando inundación y erosión costera.

- Oleaje

El oleaje es la ondulación de alta frecuencia que genera el viento al soplar sobre la superficie del mar. Una vez generado viaja por el océano y puede propagarse hasta la costa, donde disipa la energía que transporta mediante distintos procesos (ej. rotura del oleaje). El oleaje es, por tanto, un fenómeno que contribuye de manera importante a la inundación y erosión costera. Los procesos que disipan la energía cuando el oleaje se aproxima a costa dan lugar a cambios en la altura de ola y dirección (ej. refracción), lo que confiere unas características del oleaje cerca de la costa diferente al de mar abierto. En los estudios de impacto costero es necesario contar con datos de oleaje en costa que tengan una buena cobertura temporal (una serie de datos larga), pero también una cierta resolución espacial, ya que la variabilidad a lo largo de la costa es muy importante.

El oleaje no es un proceso homogéneo ni estacionario, sin embargo, la inercia del fenómeno permite que el oleaje se mantenga aproximadamente estacionario durante un período de tiempo llamado estado de mar. Un estado de mar se puede sintetizar a través de los parámetros integrales de oleaje: altura significativa de ola ( $H_s$ ), período asociado al pico espectral ( $T_p$ ) y dirección promedio ( $Dir$ ).  $H_s$  se refiere al promedio del tercio superior de un estado de mar,  $T_p$  es el período de onda asociado al máximo valor del espectro de energía del oleaje. Por su parte,  $Dir$  corresponde a la dirección promedio hacia donde viaja el oleaje (USACE, 2003).

## 2. MARCO METODOLÓGICO

La generación de las bases de datos de dinámicas marinas se lleva a cabo mediante simulación numérica. Los modelos numéricos son una herramienta eficaz en el estudio hidrodinámico del oleaje y nivel del mar, ya que permiten resolver las ecuaciones que gobiernan, en el caso del oleaje, las teorías de generación, propagación y transformación del oleaje a medida que se aproxima a costa, y, en el caso del nivel, las principales características de circulación de las masas de agua. Estos modelos presentan algunas ventajas sobre las observaciones, ya que permiten obtener series temporales largas y homogéneas, así como una alta resolución espacial. Además, permiten analizar los posibles cambios hidrodinámicos asociados a intervenciones antrópicas o a distintos escenarios de cambio climático.

El modelado numérico de las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar está estructurado matemáticamente con técnicas y esquemas de mallado y espaciado espacio-temporal. Por ello, el primer paso antes de llevar a cabo este modelado consiste en definir el dominio de cálculo y generar las mallas numéricas. Para esto se necesita disponer de la información batimétrica y de la línea de costa. A continuación, se definen los forzamientos del modelo, así como las condiciones iniciales y/o de contorno del mismo. En el caso del modelo hidrodinámico de nivel del mar, los forzamientos son los campos de viento en superficie y la presión atmosférica a nivel del mar, mientras que como condiciones de contorno se introducen la marea astronómica y las anomalías en el nivel medio del mar. En el caso del modelo de oleaje, los forzamientos son los campos de viento en superficie y como condiciones de contorno se utilizan los espectros de oleaje.

El siguiente paso consiste en configurar y calibrar el modelo numérico. Éste utiliza una serie de parametrizaciones o formulaciones para representar distintos procesos físicos (por ejemplo, la fricción por fondo). Además, todo modelo numérico requiere de un tiempo de calentamiento para que se estabilice. Por tanto, es necesario decidir, entre otros aspectos, qué formulaciones o valores de los coeficientes usar o el periodo de calentamiento. Éste último ha de ser lo suficientemente largo como para asegurar que el resultado converja, pero incrementando lo menos posible el tiempo de computación.

Una vez configurado y calibrado el modelo y con todos los datos de partida preparados, se realizan las simulaciones numéricas. La existencia de dos mallas (una para la costa Caribe y otra para la Pacífico) y de dos dinámicas a simular (oleaje y nivel del mar), el elevado número de nodos de las mallas y la extensión del periodo a simular (desde 1993 a 2021, 29 años), hacen inviable realizar las simulaciones en un único computador. Por ello, se recurre al cluster de supercomputación de IHCantabria para lanzar las simulaciones en paralelo y agilizar este proceso.

Cuando finalizan las simulaciones, se analiza la calidad de los datos generados y se validan con los datos instrumentales disponibles. A continuación, se lleva a cabo el postprocesado de los datos para generar los productos finales que se van a entregar al cliente. Se distinguen 3 tipos de productos, que se describen con mayor detalle en un entregable posterior de este proyecto. A modo resumen estos productos son:

(1) ficheros con los datos brutos que consisten en series temporales horarias de las variables que se obtienen del modelo en todos los nodos de la malla. Además, se generan ficheros con los datos procesados de las proyecciones de cambio climático del nivel medio del mar en Panamá.

(2) El segundo producto consiste en una serie de puntos localizados a lo largo de todo el litoral panameño con una resolución aproximada de 2 km. En cada uno de ellos se calculan distintas climatologías (como los valores medios, percentil del 99% y valores máximos), así como la cota de inundación, que se describe más adelante.

(3) Por último, se generan una serie de mapas que abarcan la región oceánica de Panamá. En estos mapas se representan también una serie de climatologías, que permiten visualizar los patrones espaciales en las condiciones de oleaje y nivel en la zona de estudio.

Por otro lado, en la siguiente actividad del proyecto se va a analizar la evolución de la línea de costa, para lo que se necesita información del índice denominado Nivel de Agua Total (o Total Water Level, en inglés, TWL). Éste se obtiene a partir de los datos generados de las dinámicas y, más concretamente, se calcula con la siguiente fórmula:

$$TWL (m) = MA + MM + run-up$$

Donde MA es la marea astronómica y MM, la marea meteorológica. El run-up del oleaje es la máxima cota de agua alcanzada en una playa o estructura por encima del nivel del mar. Este fenómeno se produce después de que la ola rompa sobre la playa, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por el talud. El cálculo del run-up se ha hecho a partir de los parámetros de estado de mar del oleaje, utilizando la formulación de Stockdon et al. (2006):

$$R_{2\%} = 1.1 \cdot \left( 0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right)$$

Donde  $H_0$  es la altura de ola significativa,  $L_0$  la longitud de onda asociada al periodo de pico ( $T_p$ ) y  $\beta_f$  es la pendiente de la zona intermareal.  $L_0$  se ha calculado en base a:

$$L_0 = \frac{g \cdot T_p^2}{2\pi}$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Todos estos cálculos se explican con mayor detalle en el entregable 3.3 de este proyecto.

Además, también se van a analizar los cambios en la cota de inundación debido al aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático. Para ello, se calcula el Nivel de Agua Total (NAT o TWL) tanto en el periodo analizado 1993-2021, como en distintos horizontes futuros y bajo varios escenarios de cambio climático.

La Figura 1 muestra un diagrama con el resumen de la metodología aplicada en la generación de las bases de datos a alta resolución de las dinámicas marinas en Panamá.

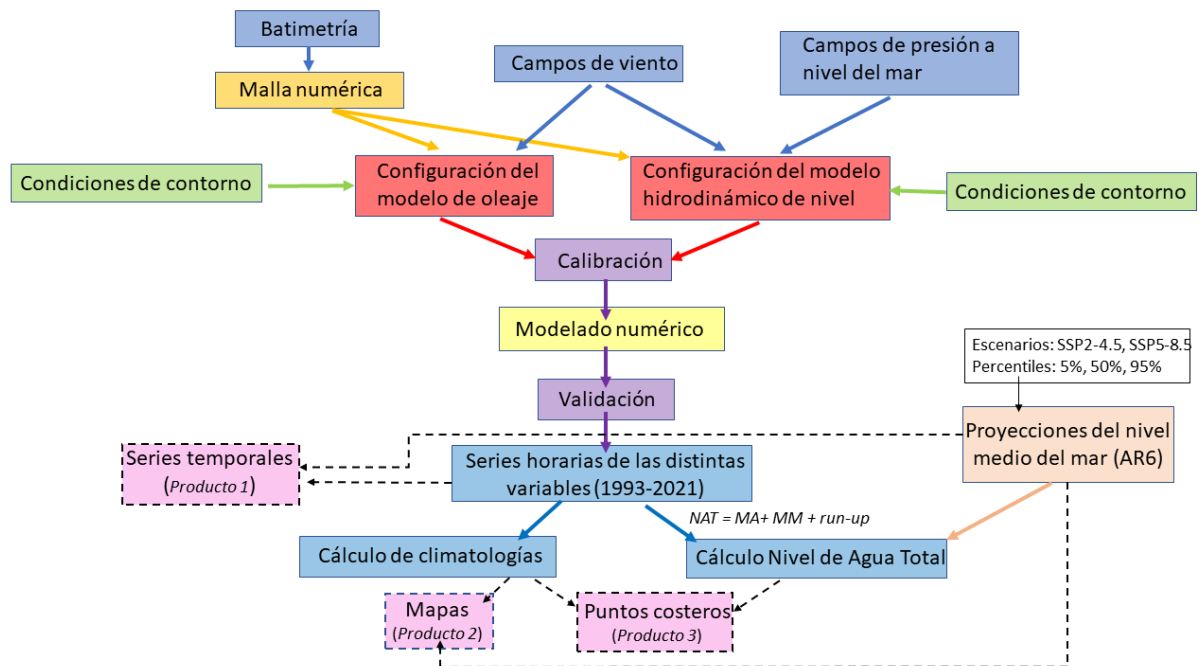


Figura 1. Esquema de la metodología.

Este documento se centra en describir los distintos pasos de esta metodología hasta obtener los resultados de los modelos y los datos de las proyecciones del nivel medio del mar. Los distintos productos que se van a generar se explican en entregables posteriores.

### 3. BASES DE DATOS DE PARTIDA

En este apartado se describen los datos utilizados en la generación de las bases de datos de nivel del mar y oleaje en Panamá. Por un lado, se describen los datos instrumentales utilizados para validar los productos generados. Por otro lado, se especifican los datos de partida que se han utilizado para realizar el modelado numérico en la zona de estudio.

#### 3.1. Datos batimétricos

Para modelar correctamente las variaciones en el nivel del mar, así como la evolución del oleaje en zonas costeras debido a los procesos de asomeramiento, refracción y rotura, es muy importante representar de forma fiable la batimetría de la zona de estudio.

Se ha integrado información batimétrica de diferentes fuentes, las cuales están referidas al nivel medio del mar (NMM). Estas fuentes son dos:

- Base de datos global GEBCO 2021 (Beker et al., 2009): Esta base de datos tiene una cobertura global y una resolución espacial de 15 arco-segundos (~460 m). Contiene información no sólo de la profundidad, sino también de la elevación sobre la tierra y sobre el hielo. Combina distintas fuentes de datos desde medidas directas, tales como datos de sondas monohaz y multihaz, sensores lidar, sensores ópticos, etc.; y medidas indirectas, como datos recogidos mediante vuelos aéreos, de satélite, de cartas náuticas, datos interpolados, etc.
- Información batimétrica procedente del proyecto de “Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica” (TNC, 2008): esta base de datos contiene información batimétrica y de la línea de costa para ambas costas panameñas. Estas batimetrías proceden de la digitalización de cartas náuticas (1:25000 a 1:300000), combinado con el resto de información cartográfica disponible en la región.

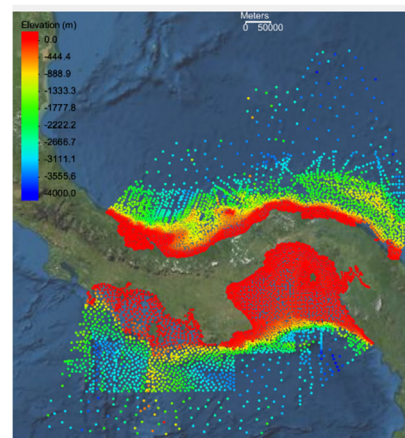
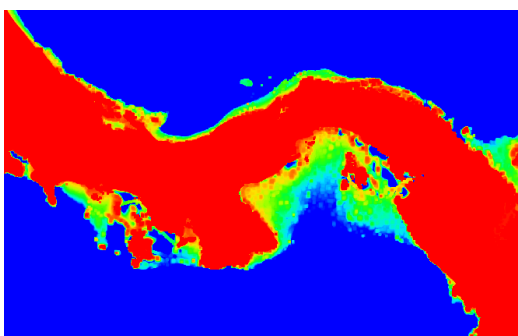


Figura 2. Datos batimétricos utilizados. (Izquierda) Base de datos Global de GEBCO (2021) y (derecha) batimetría regional procedente del proyecto de Evaluación de Ecorregiones marinas en Mesoamérica (TNC, 2008).

Por otro lado, se dispone de los datos de la línea de costa de alta marea a resolución 1:25000 facilitados por la DIAM para el desarrollo de este proyecto. Esta información se va a utilizar en la generación de las mallas numéricas.

### 3.2. Registros instrumentales

Las medidas instrumentales del oleaje y nivel del mar proporcionan una información valiosa del comportamiento de las variables de estudio. Estas medidas pueden haberse tomado in-situ o remotamente. Los registros in-situ permiten obtener información local, mientras que las medidas satelitales (principal fuente de medidas remotas) aportan información sobre áreas de la superficie marina donde no se dispone de ninguna otra fuente de observación. Estos registros, no obstante, requieren de un control de calidad específico y suelen aportar información durante periodos de tiempo demasiado cortos para llevar a cabo un estudio climático riguroso (donde se recomienda al menos disponer de varias décadas de información para poder caracterizar la variabilidad climática natural). Por ello, en este trabajo las medidas instrumentales recopiladas se han utilizado para comparar las bases de datos simuladas durante el periodo analizado 1993-2021. Este proceso de comparación permite validar las bases de datos generadas, tanto para los valores medios como diferentes magnitudes de cada variable, incluyendo una validación de los eventos extremos. Además, la validación con medidas instrumentales permite, a su vez, validar las metodologías de downscaling utilizadas.

Los datos instrumentales de nivel del mar utilizados para validar la base de datos generada proceden de seis mareógrafos disponibles en Panamá, cinco de ellos de GESLA3 (Global Extreme Sea Level Analysis) y uno de EC-WSL (World Sea Levels from the European Commission). GESLA3 proporciona datos horarios de nivel del mar, mientras que los datos del WSL son 3-minutales, por lo que se ha promediado a escala horaria. Las características de estos 6 mareógrafos se detallan en la Tabla 1.

Mareógrafo	Localización [Lon, Lat] (°)	Cobertura temporal
Bocas del Toro	[-82.26, 9.35]	2015- 2021
Cristobal	[-79.9, 9.35]	1907- 2017
Porvenir	[-78.948, 9.558]	2012 - 2018
Balboa	[-79.573,8.962]	1907 - 2018
Naos (I y II)	[-79.533, 8.917]	1961 – 1965; 1991- 1997
Puerto Armuelles (I y II)	[-82.86, 8.273]	1955- 1968; 1983- 2001

Tabla 1. Características de los 6 mareógrafos disponibles en Panamá

Respecto a datos instrumentales de oleaje, no se han encontrado medidas in-situ en Panamá. Por ello, la validación de la base de datos generada se ha llevado a cabo mediante datos de altimetría satelital. En concreto, se ha utilizado la base de datos de altimetría perteneciente a la Iniciativa de Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (ESA-CCI). En junio de 2019 se publicó la primera versión de

ESA-Sea State CCI v1. Los datos se pueden descargar de forma gratuita en <https://climate.esa.int/en/projects/sea-state/data/>. Dicha base de datos abarca un periodo de 28 años (de 1992 a 2018) e integra medidas intercalibradas procedentes de 10 altímetros: Topex-Poseidón, Jason1, Jason2, ERS-1, ERS-2, Envisat, CryoSat-2 y SARAL. Más detalles sobre esta base de datos se describen en la Tabla 2. Los datos empleados en este estudio corresponden con el nivel 2 de procesamiento (L2p), caracterizado por medidas de altura de ola significativa a una frecuencia de 1 Hz, que han pasado un control riguroso de calidad y de validación (Dodet et al., 2020).

Misión	Instrumento	Periodo observado
ERS-1	RA	1991 - 2000
TOPEX	NRA	1992 - 2006
ERS-2	RA	1995 - 2011
GFO	GFO-RA	1998 - 2008
JASON-1	Poseidon-2	2001 - 2013
ENVISAT	RA-2	2002 - 2012
JASON-2	Poseidon-3	2008 - 2019
CRYOSAT-2	SIRAL	2010 - presente
SARAL	AltiKa	2013 - presente

Tabla 2. Altímetros integrados en la base de datos Sea State CCI v1.

### 3.3. Datos atmosféricos procedentes de reanálisis

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

En este proyecto, se han utilizado los datos de ERA-5 de viento en superficie y presión atmosférica a nivel del mar en el periodo 1993-2021 como forzamientos de los modelos numéricos de nivel (ambas variables) y oleaje (sólo el viento).

A modo de ejemplo, la Figura 3 muestra la serie temporal de velocidad y dirección del viento y de presión atmosférica a nivel del mar de la base de datos de ERA5, en un punto frente a la costa pacífico panameña (Lon:  $-79^{\circ}$  y Lat:  $7^{\circ}$ ) en el periodo analizado 1993-2021.

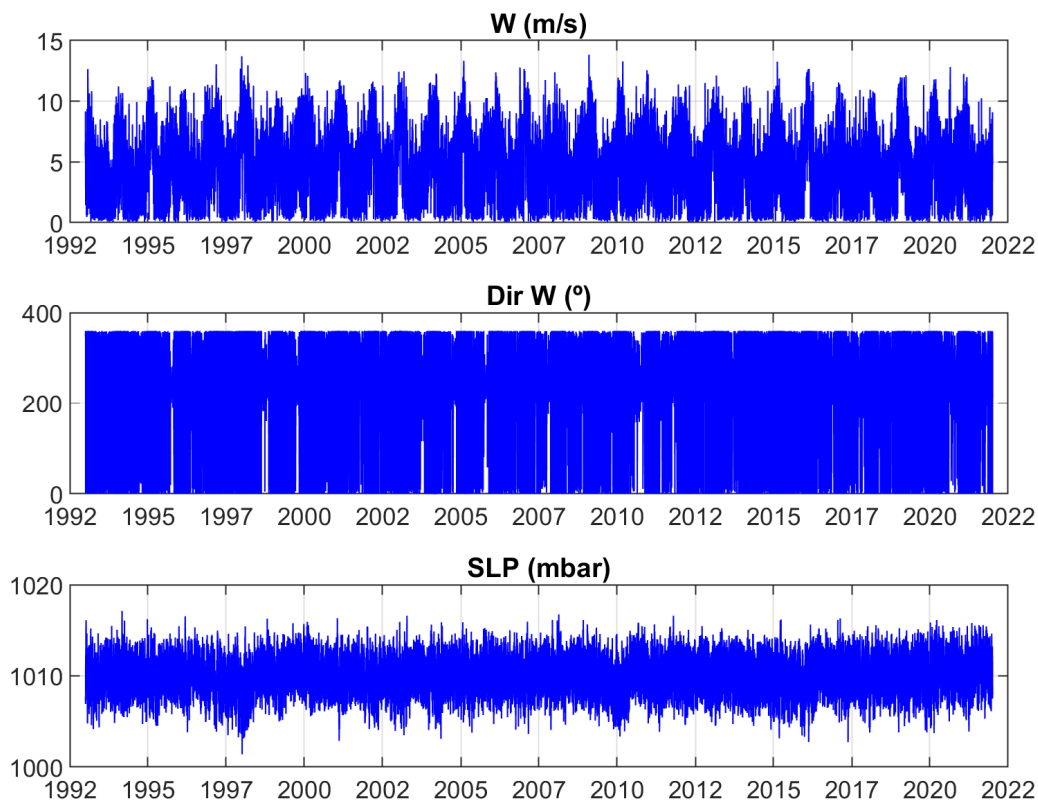


Figura 3. Serie temporal de (arriba) velocidad ( $W$ ) y (centro) dirección ( $Dir W$ ) del viento en superficie y de (abajo) presión atmosférica a nivel del mar ( $SLP$ ) en un punto con coordenadas  $[-79^{\circ}, 7^{\circ}]$ .

Por otro lado, a fin de observar los patrones espaciales, se ha representado el mapa del valor medio y del percentil del 99% de la velocidad del viento en la región oceánica de Panamá. En la zona costera, el valor medio oscila entre los 2-5 m/s, mientras que el percentil del 99% lo hace entre 5-11 m/s. Los valores máximos se localizan en ambas costas en la zona próxima al Canal de Panamá.

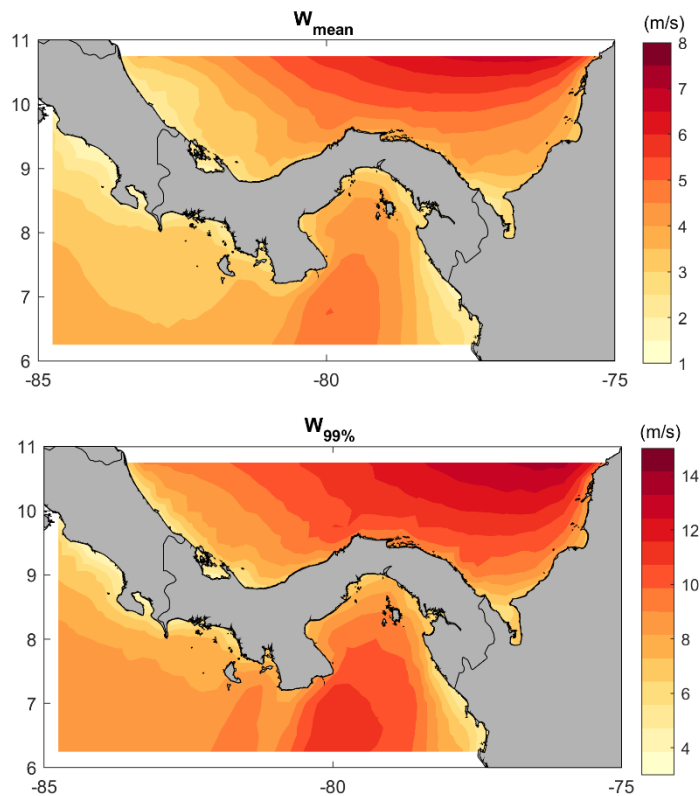


Figura 4. (Arriba) Valor medio y (abajo) percentil del 99% de la velocidad del viento en superficie en la región oceánica de Panamá y alrededores.

A modo de ejemplo, también se ha representado la situación sinóptica de viento y presión atmosférica de un evento extremo en el mar Caribe. En concreto, corresponde con el instante del 22 de noviembre de 2016, a las 12:00h. Se observa claramente el centro de bajas presiones y con vientos más intensos asociados frente a la costa caribeña de Panamá (Figura 5).

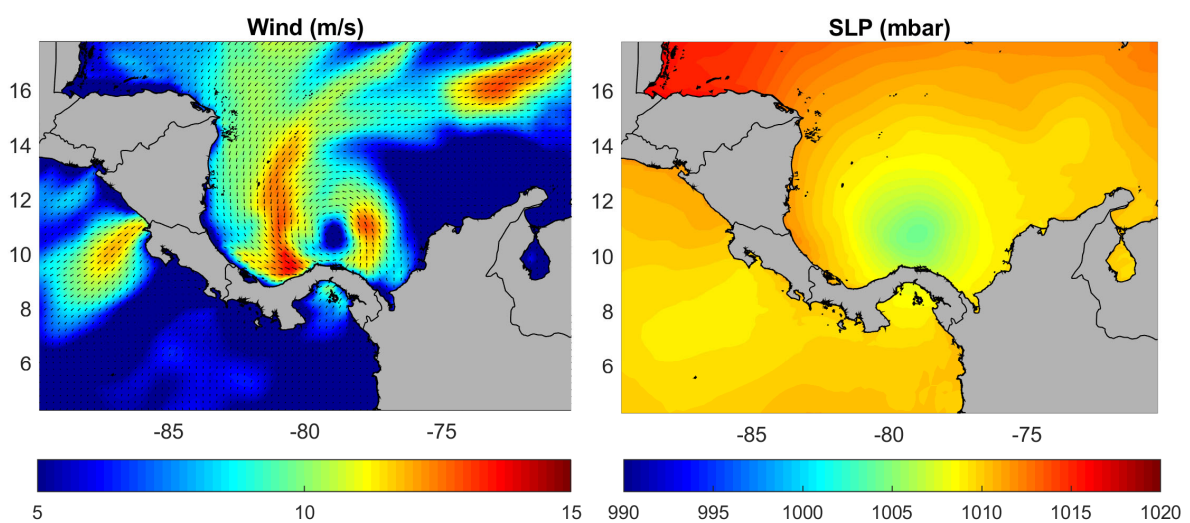


Figura 5. Situación sinóptica de un evento extremo, correspondiente al 22 de noviembre de 2016 a las 12:00 h. (Izquierda) Velocidad y dirección del viento y (derecha) presión atmosférica.

## 3.4. Datos de las dinámicas marinas

### 3.4.1. Oleaje

El hindcast de oleaje con ERA5 desarrollado por IHCantabria es una base de datos a nivel global con resolución espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  y temporal horaria, en el periodo comprendido entre 1985 y 2021. Ha sido generada con el modelo WW3 forzado con el reanálisis de ERA5. La ventaja de esta base de datos es que dispone de información del espectro del oleaje (de 3 particiones) en cada uno de los nodos. En la generación de la base de datos de oleaje en Panamá, los espectros del hindcast de ERA5 se han introducido como condiciones de contorno en las mallas numéricas, a fin de incluir en las simulaciones los oleajes generados fuera de la zona de estudio (es decir, los swells). Además, previamente se ha realizado una validación y corrección de la magnitud de estos oleajes frente a las observaciones procedentes de las medidas satelitales. Las discrepancias en la magnitud del oleaje podrían deberse a defectos en los campos de viento, insuficiente resolución del modelo, bloqueo de islas no resueltas, imperfecciones en las batimetrías, etc.

La técnica de calibración aplicada es un método paramétrico basado en un problema de regresión no lineal. En este método los parámetros de corrección varían suavemente a lo largo de las direcciones posibles por medio de splines cúbicos, lo que permite diferentes correcciones en función de la dirección. Las correcciones se hacen en la información de cuantiles empírica en una escala papel de probabilidad de Gumbel. El procedimiento de calibración da más relevancia a los datos máximos, los más importantes desde el punto de vista del diseño.

A modo de ejemplo, la Figura 6 muestra un resumen del análisis de validación antes y después de la corrección con los datos satelitales en un punto frente a la costa Pacífico panameña. Los gráficos de cuantiles en coordenadas polares se muestran en la parte superior. El color verde representa los datos brutos del hindcast con ERA5 ( $H_{sR}$ ), el color azul representa los datos de altimetría ( $H_{sI}$ ) y el color rojo representa los datos después del procedimiento de corrección ( $H_{sC}$ ). En la parte central de la figura se muestran los gráficos de dispersión y las funciones de distribución. En los diagramas de dispersión se incluye información de los cuantiles y varios índices estadísticos de las observaciones disponibles (eje x) frente a los datos del hindcast (eje y). Los diamantes representan los valores de los cuantiles equiespaciados en la escala de Gumbel (rombos vacíos indican percentiles por encima del 90,0%). Los puntos coloreados son los pares de datos de altura de ola significativa (m) y la intensidad del color representa la densidad de datos. En la parte inferior de la figura se muestran la rosa clásica, las funciones de densidad polares de  $H_{sC}$  y  $H_{sI}$  y los cambios debido a la calibración paramétrica. Los parámetros estimados de la calibración también se proporcionan en la figura. El panel derecho en la parte inferior de la Figura 6 muestra el aumento (rojo) -disminución (azul) del hindcast después de la corrección. Se aprecia una subestimación de  $H_s$ , principalmente para los valores extremos (gráfico de dispersión con puntos verdes), que se corrige tras la calibración con los datos de altimetría de ESA CCI Sea State (gráfico de dispersión con puntos naranjas).

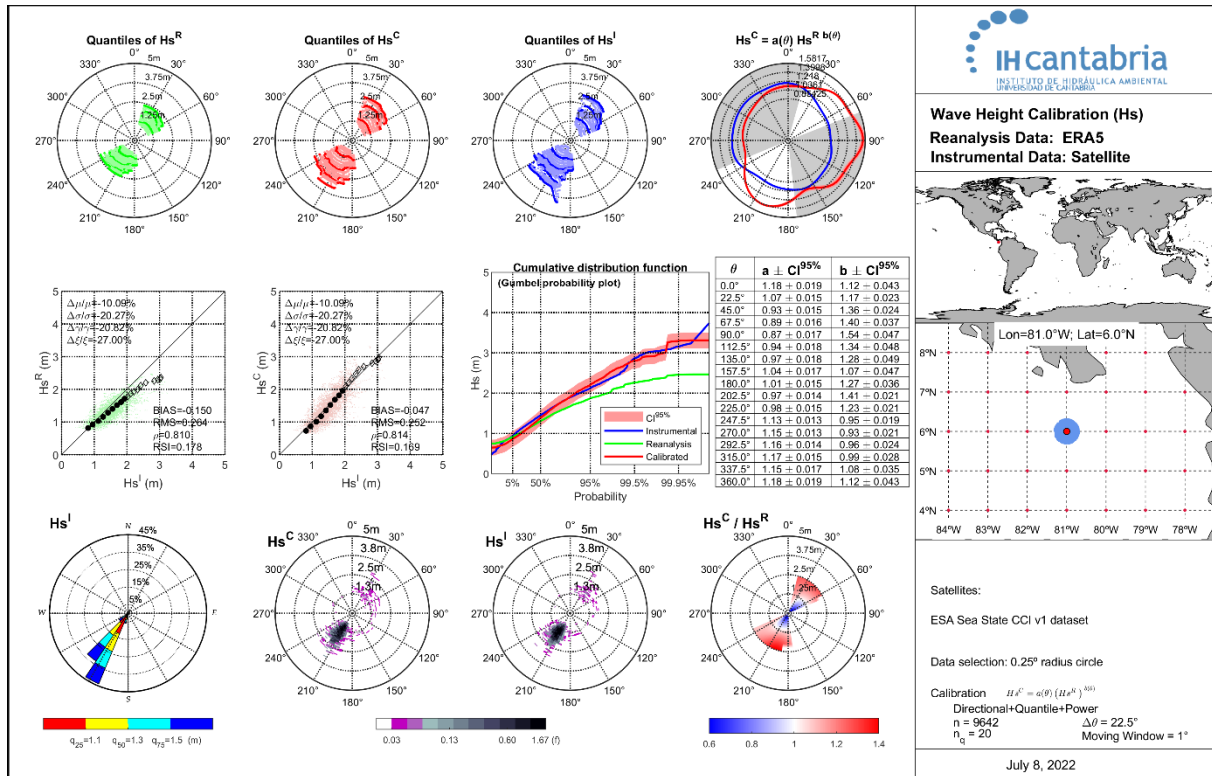


Figura 6. Resultados de la calibración de la altura de ola de la base de datos de hindcast GOW ERA5 en un punto frente a la costa Pacífico panameña. Esta calibración se ha llevado a cabo con los datos de altimetría de ESA Sea State CCI v1 en un radio de 0.25° en torno al punto objetivo.

### 3.4.2. Nivel del mar

Las variaciones en el nivel del mar constan de movimientos periódicos y movimientos irregulares, de los cuales los primeros se deben a la contribución de la marea astronómica mientras que los segundos (llamado residuo no astronómico) incluyen tanto las variaciones en el nivel medio del mar como la marea meteorológica.

El fenómeno de El Niño es responsable de importantes anomalías en el nivel medio del mar, por lo que es necesario tenerlo en cuenta en la generación de las bases de datos de nivel en Panamá. Por estos motivos, como condiciones de contorno en el modelo hidrodinámico se van a introducir las series temporales de marea astronómica y de anomalías en el nivel medio del mar asociadas a causas meteorológicas y oceanográficas.

#### Marea astronómica

Los datos sobre la variación de la superficie del mar debido a forzamientos astronómicos se han obtenido de la base de datos GOT (Global Ocean Tides), desarrollada por IHCantabria. Dicha base de datos consiste en la reconstrucción horaria de la marea astronómica a partir de los constituyentes armónicos procedentes del modelo global de mareas TPX09, desarrollado por la Universidad del Estado de Oregon (Egbert et al., 1994; Egbert y Erofeeva, 2002). El modelo TPX0 asimila datos de las misiones TOPEX/POSEIDON y de mareógrafos, siendo uno de los modelos globales de marea más precisos. La base de datos incluye ocho constantes armónicas primarias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1,

Q1) y dos de largo periodo (Mf y Mm), proporcionadas en una malla global con  $1/30^\circ$  de resolución espacial cerca de costa. A partir de estos constituyentes, se generan series horarias utilizando herramientas de reconstrucción armónica (t-tide, Pawlowicz et al., 2002).

Para incluir la contribución de la marea astronómica en la base de datos de nivel del mar en Panamá, se han reconstruido las series horarias de esta variable en el periodo 1993-2021 en los nodos del contorno de la malla numérica.

La Figura 7 muestra las variaciones espaciales en el valor de la pleamar máxima viva equinoccial a lo largo del litoral panameño. Este parámetro se ha calculado como el valor medio de la máxima marea astronómica de cada mes en el periodo 1993-2021. Su valor oscila entre 0.24-0.29 m en la costa Caribe, y entre 1.69-2.69 m en la costa Pacífico.

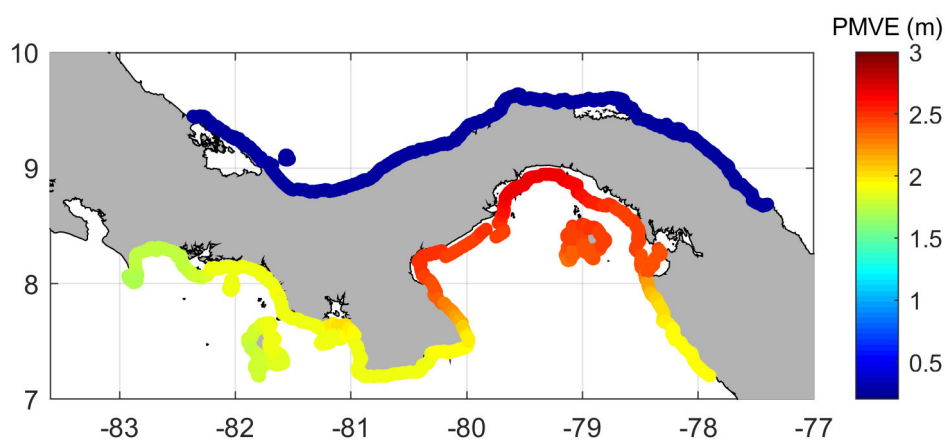


Figura 7. Valor de la pleamar máxima viva equinoccial a lo largo de la costa de Panamá.

Por último, la Figura 8 muestra las variaciones espaciales en el rango (o carrera) de marea a lo largo del litoral panameño. Este parámetro se ha calculado como la diferencia entre el percentil del 99% y del 1% de la marea astronómica en el periodo 1993-2021. Su valor oscila entre 0.36-0.47 m en la costa Caribe, y entre 2.6-5.47 m en la costa Pacífico.

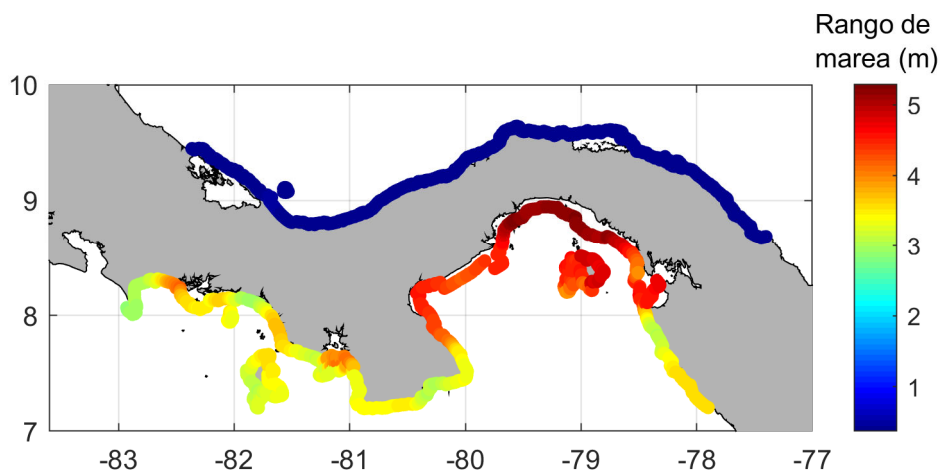


Figura 8. Valor del rango (o carrera) de marea a lo largo de la costa panameña (m).

### Residuo no astronómico

El nivel del mar puede presentar anomalías debidas a temperaturas del agua y salinidades inusuales, a corrientes costeras o a forzamientos atmosféricos, como son el viento y la presión atmosférica. Por ello, se ha tenido en cuenta la contribución de estos factores en la base de datos de nivel del mar generada en el marco de este proyecto.

Existen diversas bases de datos históricas de las anomalías en el nivel medio del mar procedentes de modelos numéricos, entre las que destacan la base de datos de CFSR y la de CMEMS por ser las más actualizadas, contrastadas y de mejor resolución. Las características de ambas se resumen en la Tabla 3. Estas bases de datos han sido generadas utilizando como forzamiento las variables atmosféricas procedentes de los reanálisis de CFSR y de ERA5 (junto con su predecesor ERA-Interim), respectivamente.

Base de datos	CFSR	Global Ocean Physics Reanalysis
Institución	NCAR	CMEMS
Forzamiento	CFSR, CFSv2	ERA-Interim, ERA5
Resolución espacial	0.5 x 0.5	0.083 x 0.083
Resolución temporal	horario	diario
Cobertura temporal	1979-presente	1993-2019, 2019-2022 (forecast)

Tabla 3. Características de las bases de datos globales de anomalías en el nivel medio del mar analizadas

Se han comparado ambas y validado con los datos disponibles de los mareógrafos a fin de determinar cuál es la más indicada para utilizar en este proyecto. La Figura 9 muestra las series temporales de ambas bases de datos en un punto frente a las costas Caribe y Pacífico de Panamá. Se ha marcado en **negrita** los años 1997 y 2015, afectados por un fenómeno de El Niño muy intenso. Mientras que en el Caribe no se observan anomalías en estos años, en el Pacífico es evidente el incremento en dichas anomalías debido a estos fenómenos de El Niño. Estas variaciones se observan en ambas bases de datos.

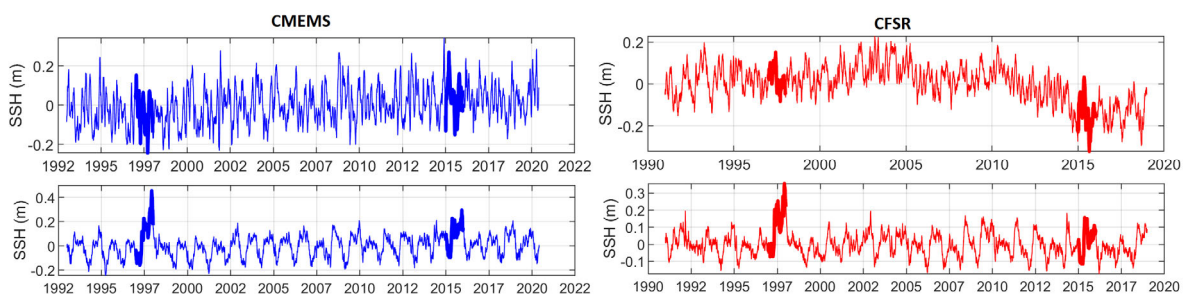


Figura 9. Series temporales de anomalías en el nivel medio del mar (o sea surface height, SSH) de (izquierda) la base de datos de CMEMS y (derecha) de la de CFSR en (arriba) un punto frente a la costa caribeña (Lon: -80°, Lat: 12°) y (abajo) frente a la costa pacífica (Lon: -81°, Lat: 6°) de Panamá. En **negrita** se han marcado los años 1997 y 2015.

Por otro lado, al comparar estas bases de datos con los datos de los mareógrafos, se observa que, principalmente en la costa Caribe, la base de datos de CMEMS se ajusta mucho mejor a las observaciones que la de CFSR, debido a su mayor resolución espacial. La Figura 10 muestra dicha comparación para los mareógrafos de Cristóbal (costa Caribe) y Naos (costa Pacífico).

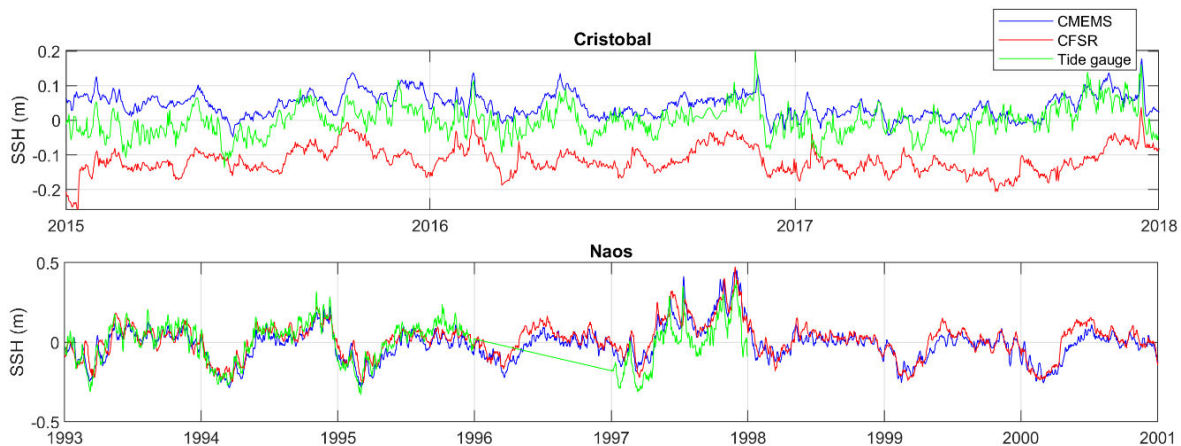


Figura 10. Comparación de las bases de datos de CMEMS y CFSR con los registros instrumentales de Cristóbal y Naos.

En base a estos resultados y teniendo en cuenta que los forzamientos atmosféricos utilizados en los modelos numéricos proceden de ERA5, se ha elegido la base de datos de CMEMS para introducirla como condición de contorno en la malla numérica del modelo de nivel. De esta manera, en cada nodo del contorno se suman las series temporales horarias de marea astronómica y de anomalías en el nivel medio del mar.

## 4. DOMINIOS Y MALLAS DE CÁLCULO

El modelo numérico empleado para generar la base de datos de nivel utiliza mallas de cálculo no estructuradas basadas en elementos finitos. Por su parte, el modelo de oleaje admite este tipo de mallas, además de otros. Por ello, las mallas generadas tienen estas características. El uso de mallas no estructuradas permite optimizar el tiempo de cómputo, ya que cuentan con una resolución más grosera en aguas profundas o lejos de la zona de interés, mientras que permiten alcanzar una resolución mucho más fina en la zona de estudio, teniendo así en cuenta las particularidades de la batimetría y morfología de la costa.

Las bases de datos de Panamá se han creado utilizando dos mallas independientes, una para la costa Caribe y otra para la Pacífico. Utilizan el sistema de coordenadas geográficas WGS84. La profundidad en cada nodo de las mallas se ha obtenido interpolando la información batimétrica especificada en el apartado 3.1.

Para la construcción de las mallas se parte de los datos sobre la posición de la línea de costa de alta marea (además de la línea de costa extraída de GEBCO para la región fuera de Panamá). Con esta información se define tanto el contorno de tierra como la presencia de islas. Es importante destacar que las islas o islotes con un tamaño inferior a la resolución de la malla (es decir,  $\sim 1$  km) se han ignorado. Además, la línea de costa se ha suavizado hasta esta resolución, por lo que tampoco se han tenido en cuenta los detalles de la línea de costa por debajo de esta resolución. Por último, no se han obtenido las dinámicas marinas en los interiores de estuarios ni bahías muy cerradas.

La creación de las mallas se ha llevado a cabo mediante el software SMS 12.2 de Aquaveo, utilizando su herramienta disponible basada en el análisis del error de truncamiento localizado (LTEA, de sus siglas en inglés). Esta herramienta va colocando los nodos dentro del dominio de modo que minimiza el error del modelo. Tanto en el caso de la malla Caribe como la del Pacífico, se han hecho varias pruebas y se han ido optimizando hasta seleccionar la más adecuada. Se probaron distintos tamaños de malla, desde unas más grandes que abarcaran una gran extensión del océano abierto, hasta unas más ajustadas a la zona de interés. La figura muestra un ejemplo de las mallas de mayor extensión. Sin embargo, los resultados no mejoraban con respecto a mallas más pequeñas, por lo que se acabó optando por estas últimas.

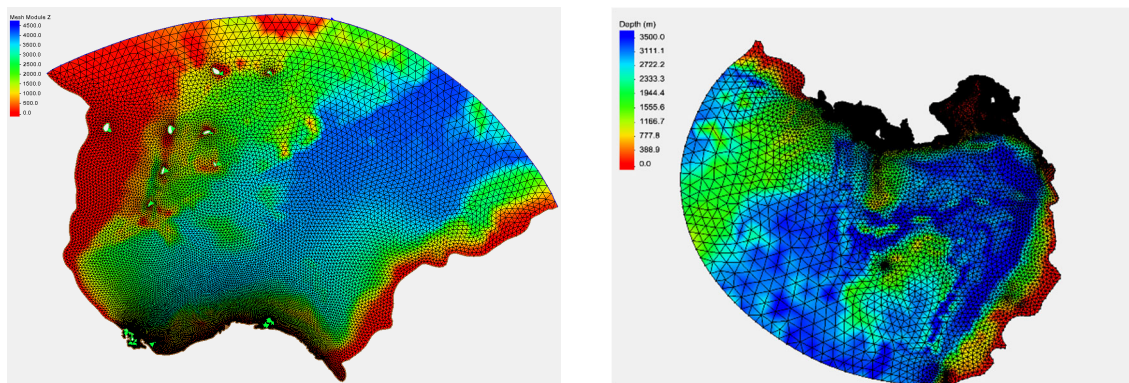


Figura 11. Ejemplo de mallas de mayor extensión creadas para probar su idoneidad en este proyecto. (Izquierda) Malla para el Caribe y (derecha) malla para el Pacífico.

Las mallas definitivas se muestran en las Figura 12 y Figura 13. La malla del Caribe se extiende a lo largo de toda la costa Caribe panameña y cubre el litoral caribe de Costa Rica y de parte de Colombia (hasta Barranquilla). Llega hasta la latitud de 11°. Consta de 11999 nodos y 22460 elementos. Tiene una resolución de unos 20-30 km en océano abierto (valor máximo de 39 km), alcanzando los ~800 m a lo largo de la costa (oscila entre 500 y 1.3 km). La malla del Pacífico, por su parte, cubre el litoral Pacífico desde el Golfo de Nicoya (en Costa Rica) hasta la región de El Valle (en Colombia). Consta de 17952 nodos y 34190 elementos. Tiene una resolución de unos 30 km en océano abierto (valor máximo de 39 km), alcanzando los ~1000 m a lo largo de la costa (oscila entre 775 m y 2 km). Las características de ambas mallas se resumen en la Tabla 4.

Es importante señalar que las mallas tienen forma rectangular para hacer coincidir su contorno con los nodos de la base de datos de hindcast de oleaje de ERA5 de IHCantabria.

MALLA	CARIBE	PACÍFICO
Nº nodos	11999	17952
Nº elementos	22460	34190
Cobertura espacial	Lon: [-83.6°, -75°]; Lat: [8.12°, 11°]	Lon: [-85°, -77.35°]; Lat: [6°, 9.96°]
Resolución espacial mínima/máxima	39 km / 200 m	38 km / 200 m
Resolución espacial en costa	500 m- 1.3 km	775 m – 2 km

Tabla 4. Características de las mallas numéricas

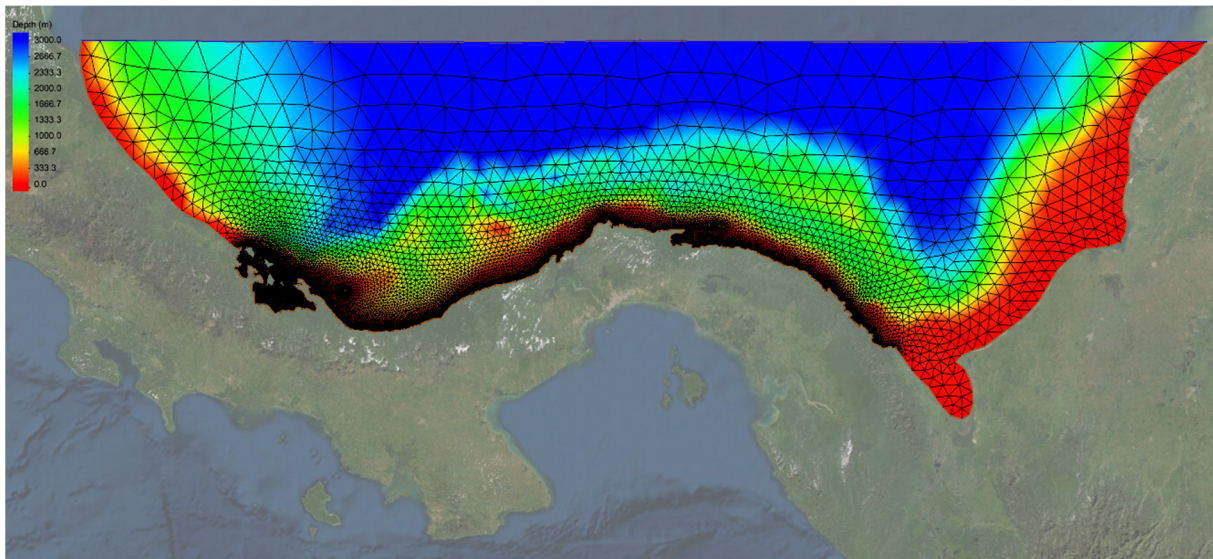


Figura 12. Malla de cálculo de la costa Caribe panameña.

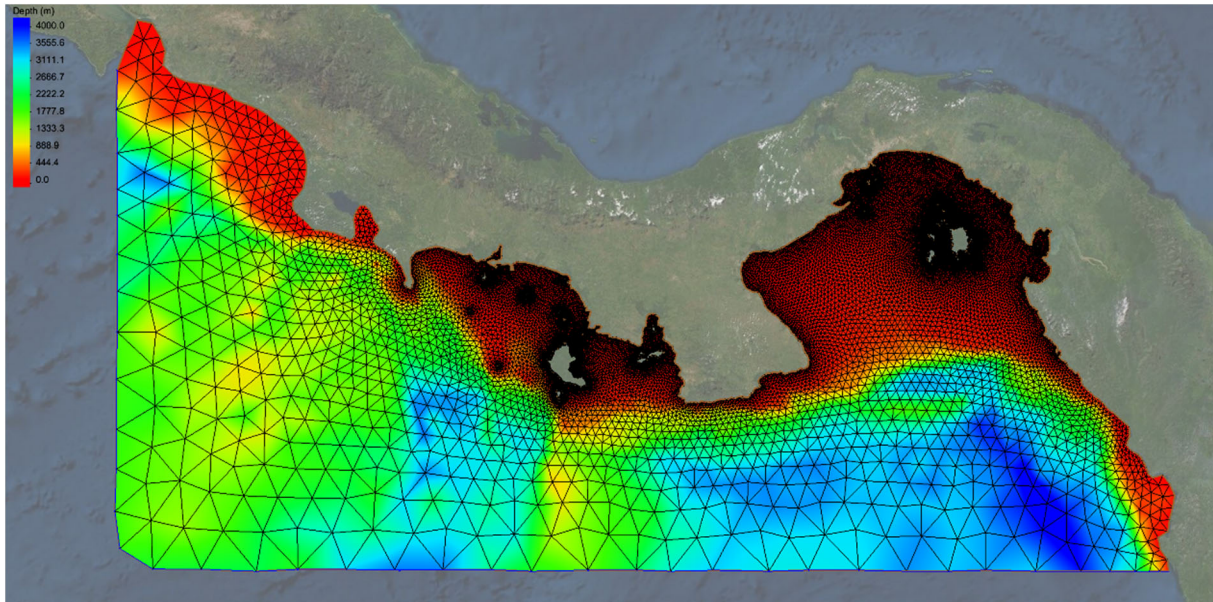


Figura 13. Malla de cálculo de la costa Pacífico panameña.

## 5. BASES DE DATOS DE NIVEL DEL MAR

Los datos de nivel del mar generados en este proyecto son de dos tipos. Por un lado, se ha creado la base de datos de nivel del mar compuesto (o SWL, de sus siglas en inglés) mediante modelado numérico tanto para la costa Caribe como Pacífico de Panamá. Esta base de datos cubre el periodo entre 1993-2021 (29 años) a resolución temporal horaria. La resolución espacial es variable dado el tipo de malla utilizada (es decir, no estructurada), aunque es inferior a 2 km en costa. Esta base de datos incluye la contribución de la marea astronómica y la marea meteorológica.

Por otro lado, se han procesado los datos sobre las proyecciones de cambio climático del nivel medio del mar publicados en el AR6 (IPCC, 2021) para Panamá. Se ha trabajado con dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), el horizonte 2050 y los cuantiles del 5%, 50% y 95% del aumento en el nivel medio del mar con unos niveles de confianza medio y bajo.

A continuación, se describen ambas bases de datos, así como los resultados más relevantes obtenidos para las costas panameñas.

### 5.1. Hindcast de nivel del mar compuesto

#### 5.1.1. Configuración del modelo de nivel

El modelo ADCIRC es un modelo hidrodinámico bidimensional de última generación desarrollado por la Universidad de Carolina (Luettich et al., 1992). Resuelve las ecuaciones del movimiento (ecuaciones de continuidad y de conservación del momento) para un fluido en movimiento en una Tierra en rotación, utilizando las aproximaciones hidrostática y de Boussinesq, discretizadas en espacio utilizando el método de elementos finitos y en tiempo, el de diferencias finitas. Tal y como se comentó anteriormente, este modelo utiliza una malla no estructurada. Se utiliza en multitud de aplicaciones entre las que destaca que es el modelo usado por la USACE y por la FEMA (USA) para el análisis y predicción de la marea meteorológica e inundación asociadas a huracanes.

Se ha llevado a cabo una calibración del modelo para definir su configuración óptima. En concreto, se han realizado los siguientes análisis de sensibilidad:

- ADCIRC incluye 4 tipo de formulaciones distintas para describir la fricción por fondo: fricción lineal y cuadrática constantes, fricción híbrida y coeficiente de Manning. Se analizaron las 4 para definir la más idónea.
- Se probaron 4 pasos de tiempo del modelo: 1, 3, 5 y 10 segundos.
- Se probaron distintos periodos de calentamiento: 2, 5 y 7 días.

La configuración final del modelo consta de las siguientes características:

- Se han tenido en cuenta los términos no lineales del modelo, como son las amplitudes finitas, las derivadas parciales de tiempo y los términos advectivos de las ecuaciones del movimiento.
- Las mallas de cálculo abarcan una extensión inferior a 4° de latitud y 10° de longitud. Por ello, no se considera necesario tener en cuenta ni el efecto de Coriolis ni los potenciales de marea.

- La fricción por fondo se define mediante la fricción cuadrática constante con coeficiente de 0.0025.
- El paso de tiempo del modelo es de 3 segundos.
- Se utiliza un periodo de calentamiento de 2 días para asegurar la convergencia y la estabilidad del modelo.

Como datos de entrada, el modelo utiliza la malla con la información batimétrica, los forzamientos atmosféricos y las condiciones de contorno de nivel. Los campos de viento en superficie y la presión a nivel del mar se introducen en cada nodo de la malla y en cada instante de tiempo. Como condiciones de contorno se incluye el efecto combinado de la marea astronómica y del residuo no astronómico. Así, en cada nodo del contorno del océano se han interpolado los datos de marea astronómica y de anomalías en el nivel medio del mar. Al ser estos últimos datos diarios, se han interpolado a escala horaria para poder sumarlos a los datos de marea.

Por último, las simulaciones se han realizado en bloques de un mes utilizando el cluster de supercomputación de IHCantabria.

### 5.1.2. Resultados y Validación

Como resultados de las simulaciones se han obtenido las series temporales horarias del nivel del mar en el periodo 1993-2021 (29 años) en cada nodo de la malla. Esta variable incluye las componentes de marea astronómica y marea meteorológica, y se conoce con el nombre de nivel del mar compuesto (o still water level, SWL).

La Figura 14 muestra un zoom de la serie temporal de SWL obtenida con el modelo en los nodos más cercanos a la localización de los mareógrafos. Además, se representa la serie temporal medida por estos instrumentos a fin de comprobar su similitud. Se observa que el modelo reproduce correctamente el comportamiento de la marea, caracterizada por un régimen mixto en la costa Caribe (los tres primeros mareógrafos de la Figura 14). Por otro lado, en el caso del Caribe, el modelo subestima ligeramente la amplitud de la señal, tal y como se observa, principalmente, en el mareógrafo de Porvenir. Esto se puede justificar por la localización de los mareógrafos, situados en zonas costeras protegidas y no en mar abierto, por lo que la onda de marea puede amplificarse y distorsionarse. El modelo no alcanza este nivel de detalle y, por tanto, no reproduce estos comportamientos. Además, la amplitud de la marea en el litoral Caribe es muy pequeña (del orden de 0.2 m), por lo que pequeñas diferencias entre el modelo y el mareógrafo son muy visibles. Sin embargo, esto no pasa en el litoral Pacífico con una amplitud de marea superior a 2 m, donde se observa muy buena concordancia, tanto en la forma como en la amplitud de la onda, entre el modelo y las observaciones.

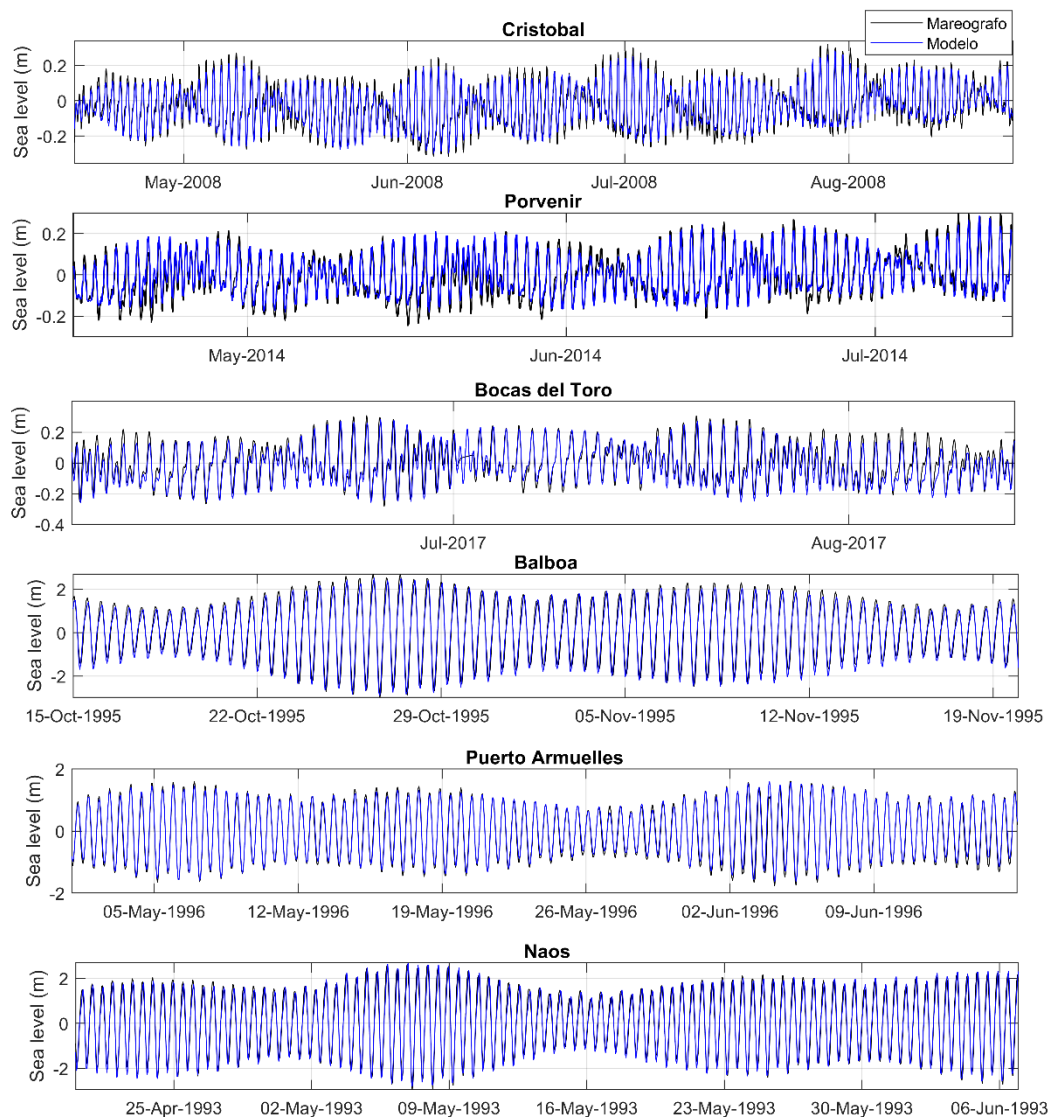


Figura 14. Ejemplo de series temporales de nivel del mar obtenidas con el modelo ADCIRC (línea azul) en el nodo más cercano a la localización de los mareógrafos. En negro se representa para comparación el registro de nivel del mar medido por los 6 mareógrafos disponibles.

La validación de la base de datos generada se ha llevado a cabo utilizando los datos de los mareógrafos. La Figura 15 muestra la correlación entre ambas bases de datos en los 6 mareógrafos analizados, así como las métricas de error (es decir, el valor del BIAS, del error cuadrático medio (RMSE) y de los coeficientes de correlación). Los cuantiles por debajo del 0.9 (condiciones medias) se representan con rombos negros, mientras que los cuantiles por encima de este valor (régimen extremal), aparecen como rombos rojos. En todos los casos hay muy buena correlación tanto en los valores medios como extremos, tal y como se deduce de la posición de los cuantiles a lo largo de la línea 1:1 y de los valores del BIAS muy próximos a cero. El coeficiente de correlación en los mareógrafos del Pacífico es superior a 0.94, mientras que en los del Caribe es ligeramente inferior (entre 0.82 y 0.91). En el mareógrafo de Bocas del Toro se observa mayor dispersión en ciertos puntos, lo que se debe a los valores anómalos

registrados por este mareógrafo y que se describieron en el entregable 3.1-b de este proyecto. Esta zona está afectada por importantes procesos tectónicos que pueden justificar variaciones en las medidas.

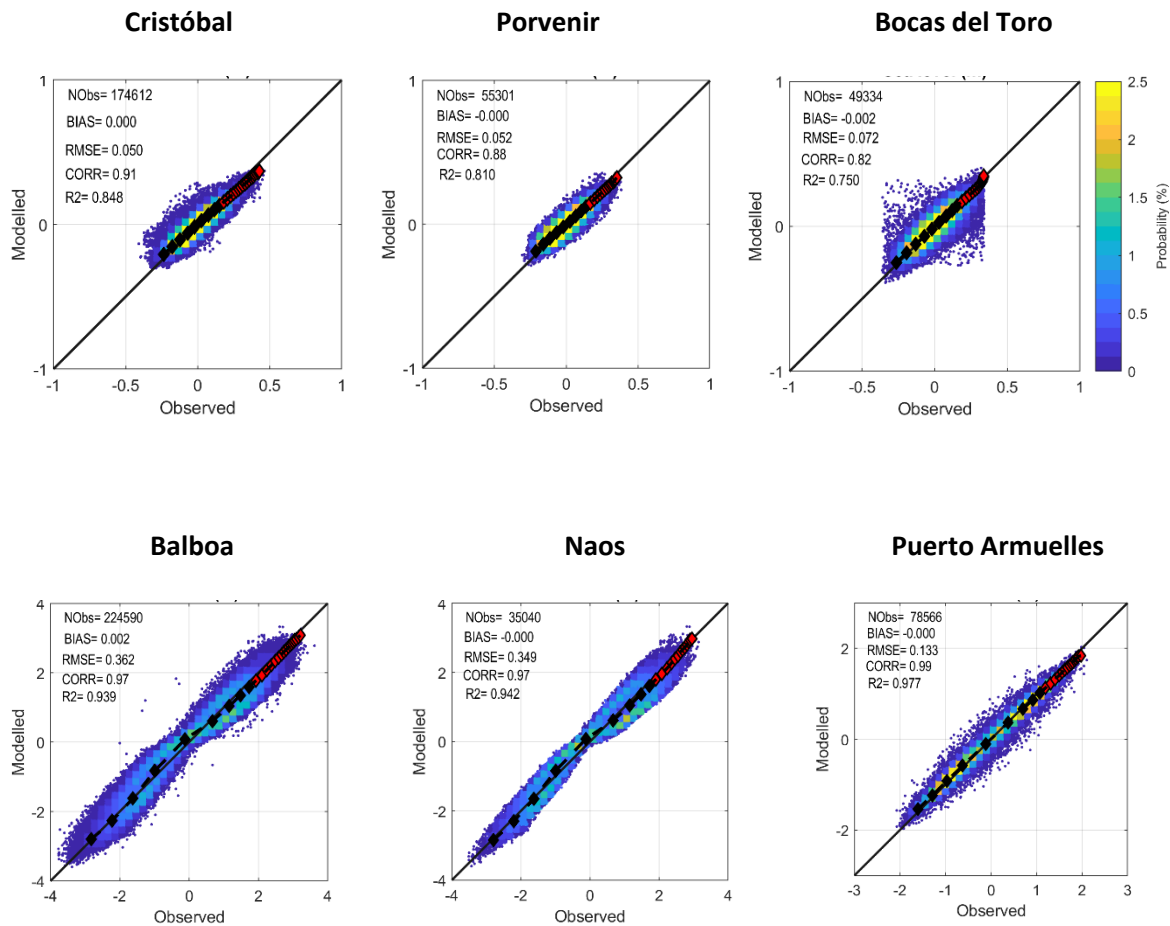


Figura 15. Validación de la base de datos de nivel del mar generada con el modelo ADCIRC, utilizando los datos medidos por los 6 mareógrafos disponibles en Panamá.

A fin de visualizar los patrones espaciales y los rangos de variación de la serie de nivel generada, se ha representado el valor del percentil del 99% del nivel del mar compuesto a lo largo de la costa panameña (Figura 16). Su valor oscila entre 0.24-0.29 m a lo largo del litoral caribeño, y entre 1.42-2.62 m a lo largo de la costa pacífico. Los valores máximos se localizan en el interior del Golfo de Panamá, en la región comprendida entre Punta Chame y la zona al este del río Chepo.

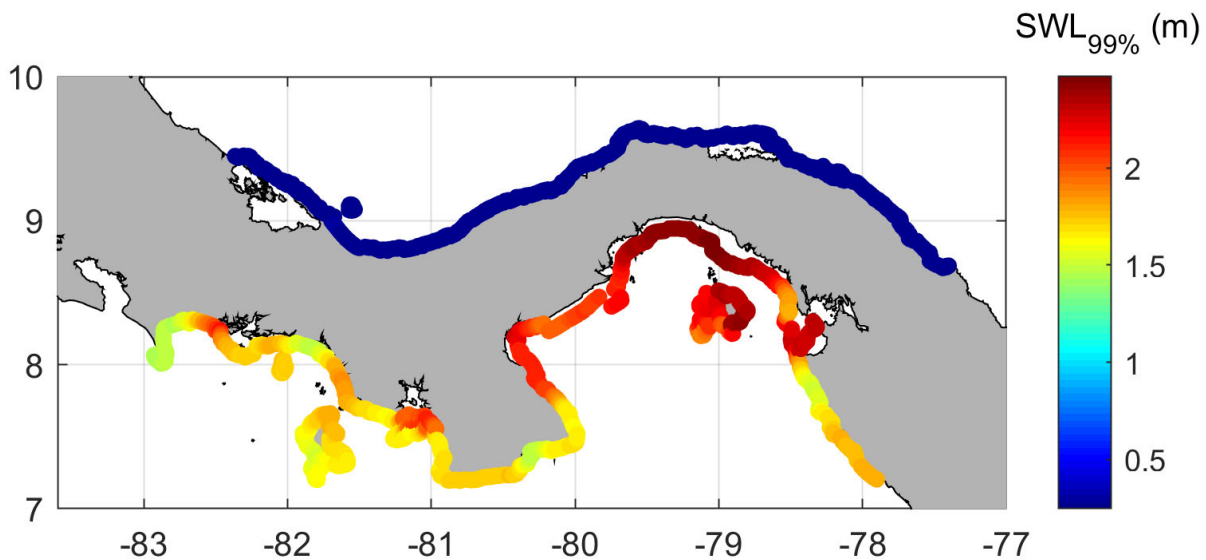


Figura 16. Valor del percentil del 99% del nivel del mar compuesto (SWL, en metros) a lo largo de la costa panameña.

## 5.2. Proyecciones climáticas de nivel medio del mar

Los datos de las proyecciones de Aumento del Nivel Medio del Mar (ANMM) proporcionan las variaciones (incrementos) del NMM ante unos escenarios futuros de cambio climático. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su Sexto Informe de Evaluación del Grupo de Trabajo I, AR6, (IPCC, 2021) ha presentado nuevas proyecciones correspondientes a un conjunto de escenarios en los que se integran los forzamientos radiativos con diferentes Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés) a los que se asocian las proyecciones climáticas de la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Estos escenarios abarcan una gama más amplia de futuros gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos que los evaluados en anteriores informes del grupo de Trabajo I (es decir, los escenarios RCPs), e incluyen trayectorias de altas emisiones de CO<sub>2</sub> sin mitigación del cambio climático, así como diferentes vías de bajas emisiones de CO<sub>2</sub>.

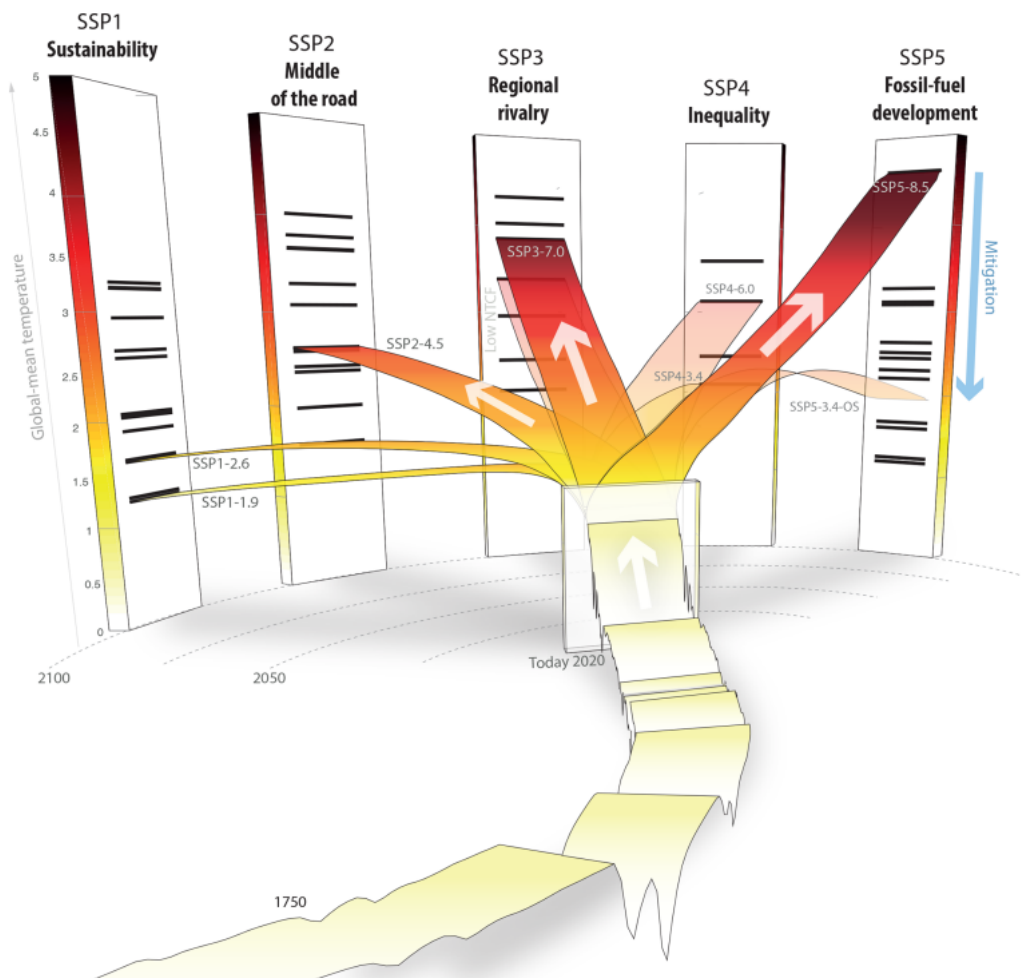


Figura 17. Los escenarios de emisiones y sus cinco trayectorias socioeconómicas (SSP). Se ilustran los niveles de temperatura relativos a la era pre-industrial, los niveles actuales (2020) y las ramificaciones de los diferentes escenarios a lo largo del siglo XXI según las cinco trayectorias socioeconómicas. (Meinshausen M. et al. 2020).

Las trayectorias socioeconómicas compartidas para el sexto informe comienzan en 2015. Los cambios se evalúan respecto al periodo de referencia 1995-2014 e incluyen:

- Escenarios con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) altas y muy altas (SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y emisiones de CO<sub>2</sub> que se duplican aproximadamente sobre los niveles actuales para 2100 y 2050, respectivamente.
- Escenarios con emisiones de GEI intermedias (SSP2-4.5) y emisiones de CO<sub>2</sub> que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo.
- Escenarios con emisiones de GEI muy bajas y bajas (SSP1-1.9 y SSP1-2.6) y emisiones de CO<sub>2</sub> que descienden hasta cero alrededor o después de 2050, seguidas de niveles variables de emisiones netas negativas.

Las emisiones varían entre los distintos escenarios en función de las hipótesis socioeconómicas, los niveles de mitigación del cambio climático y, en el caso de los aerosoles y los precursores del ozono no-metano, de los controles de la contaminación atmosférica.

Además, en el IPCC-AR6 se establecen cinco niveles de superación del calentamiento global en los cuales el cambio en la temperatura media global del aire en superficie (GSAT, por sus siglas en inglés) excede los 1.5°C, 2°C, 3°C, 4°C y 5°C y que se pueden relacionar con diferentes periodos temporales de los posibles futuros en base a los diferentes escenarios de emisión.

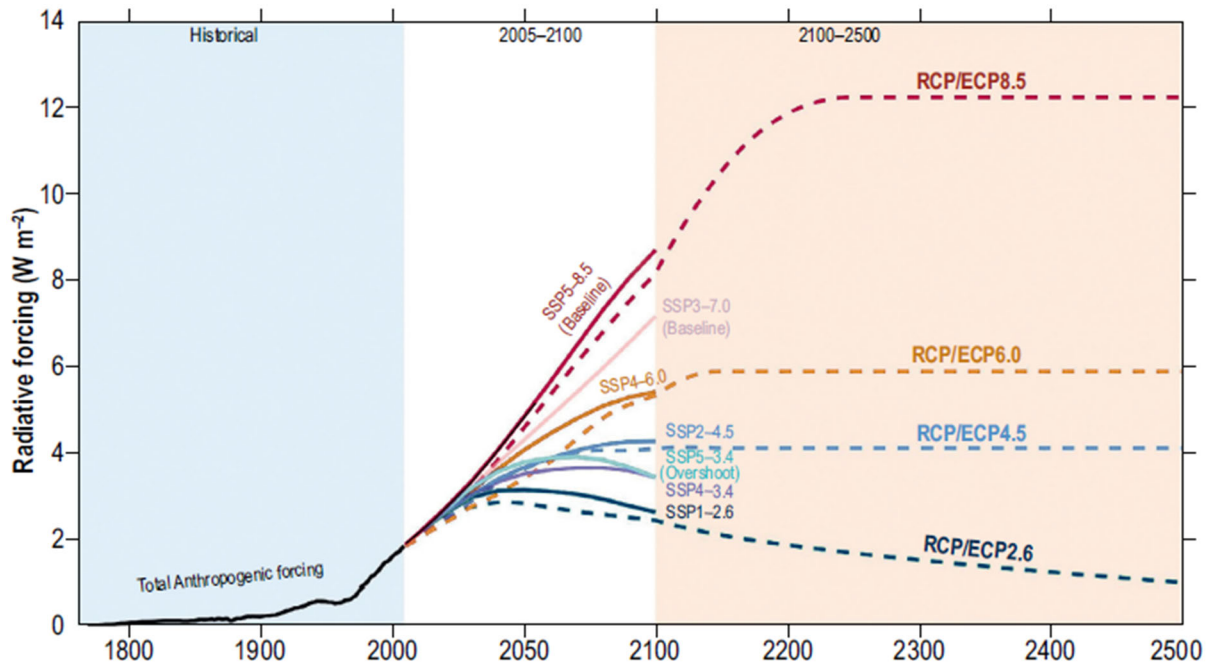


Figura 18. Series temporales de forzamiento radiativo ( $W m^{-2}$ ) para datos históricos (1765-2004), y para escenarios futuros de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP; 2005-2100) y su continuación como RCPs ampliadas (2100-2500) y como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP; 2005-2100). Los escenarios RCP se muestran como curvas discontinuas, y los escenarios SSP se muestran como curvas sólidas. (SROCC 2019, Chapter 1, Supplementary material).

Las bases de datos de proyecciones de ANMM que se presentan en este apartado se han desarrollado en el marco del IPCC-AR6 utilizando simulaciones actualizadas del conjunto de modelos climáticos del CMIP6. Se han obtenido proyecciones actualizadas del nivel medio del mar a nivel global (GMSL) y regional (RMSL) hasta 2150 (con confianza media) y hasta 2300 (con confianza baja) para los diferentes escenarios climáticos.

Dado que no existe un único modelo que pueda calcular directamente todas las componentes que contribuyen al cambio del nivel del mar, las diferentes componentes se simulan por separado y luego se combinan. Por este motivo, la base de datos de ANMM publicadas en el AR6 proporciona información de los 107 percentiles de un único ensemble multi-modelo y no de los modelos por separado. A continuación, se nombran las diferentes componentes que contribuyen al ANMM proyectado:

- Componente asociada a la contribución de la expansión termal.
- Componente asociada a la capa de hielo de Groenlandia (excluyendo los glaciares periféricos).
- Componente asociada a la capa de hielo de la Antártida (excluyendo los glaciares periféricos).
- Componente asociada a la variabilidad de los glaciares (incluyendo glaciares periféricos).
- Componente asociada a los reservorios de agua continental.
- Componente asociada a las dinámicas del nivel de la superficie del mar.
- Componente asociada a efectos gravitacionales, rotacionales y de deformación.
- Componente asociada al GIA (Glacial Isostatic Adjustment) y otros impulsores del movimiento vertical de la tierra.

En todo momento, los rangos probables se evalúan en base a la combinación de la incertidumbre en la distribución de la Temperatura Global del aire en superficie (GSAT) y la incertidumbre en las relaciones entre GSAT y los cambios en las componentes individuales. En general, los resultados de los percentiles 17-83, que incorporan tanto la incertidumbre de la GSAT y la incertidumbre en los procesos del nivel del mar, se interpretan como rangos probables.

Las bases de datos de proyecciones de ANMM tiene una cobertura global, con resolución temporal decadal desde 2020 a 2150 y espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ . Además, incluye información en algunas localizaciones de mareógrafos. Proporciona información de 107 percentiles del ensemble multi-modelo (el 0, 0.001, 0.005, del 0.01:0.01:0.99, el 0.995, el 0.999 y el 1) con un nivel de confianza medio y bajo. En las Figura 19 y Figura 20 se muestran las series correspondientes a un punto frente a la costa Caribe ( $-79^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ) y Pacífico ( $-80^{\circ}$ ,  $7^{\circ}$ ), respectivamente, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y un nivel de confianza medio. Se espera un aumento en el nivel medio del mar más pronunciado en la costa Caribe que en la Pacífico, con un incremento respecto al periodo de referencia 1995-2014 de 0.71 m y de 0.93 m frente a los 0.56 m y 0.76 m del Pacífico, para finales de siglo (año 2100) bajo el SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente.

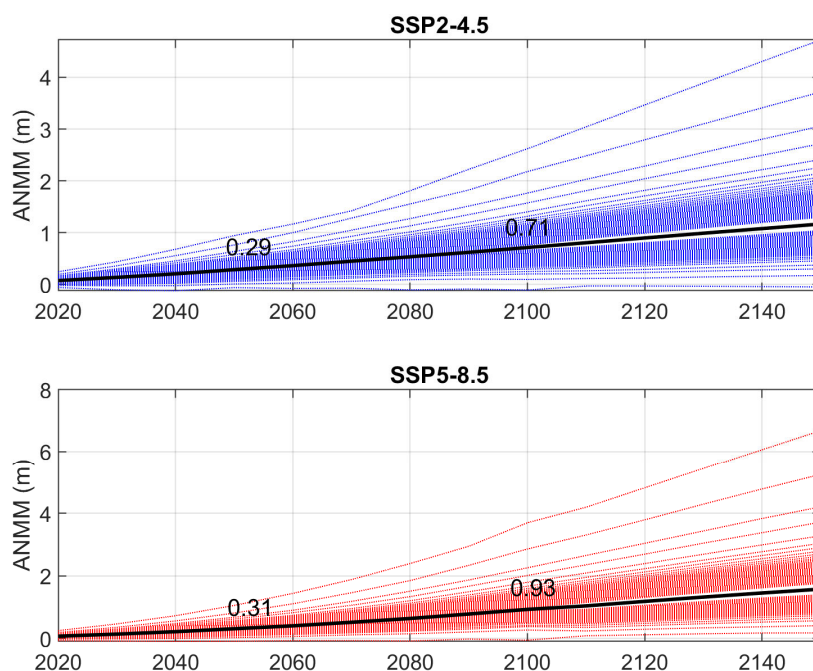


Figura 19. Serie de Aumento del Nivel Medio del Mar (ANMM) en la ubicación 10°N y -79°W, frente a la costa Caribe de Panamá. Se muestran los 107 percentiles del ensemble para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y periodo 2020-2150 de la base de datos regional (RMSL) con nivel de confianza medio. La línea sólida en negro representa el percentil del 50% y las etiquetas el ANMM para los horizontes 2050 y 2100.

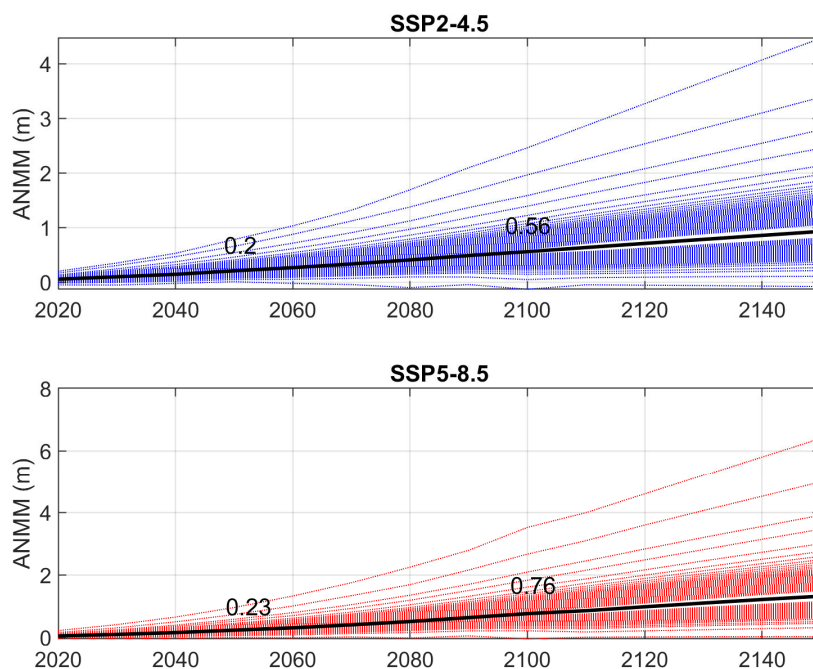


Figura 20. Serie de Aumento del Nivel Medio del Mar (ANMM) en la ubicación 7°N y -80°W, frente a la costa Pacífico de Panamá. Se muestran los 107 percentiles del ensemble para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y periodo 2020-2150 de la base de datos regional (RMSL) con nivel de confianza medio. La línea sólida en negro representa el percentil del 50% y las etiquetas el ANMM para los horizontes 2050 y 2100.

A fin de observar los rangos de incertidumbre, las siguientes figuras muestran los valores de ANMM para los percentiles del 5%, 50% y 95%, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 a lo largo de la costa panameña para el año 2050, con un nivel de confianza medio (Figura 21) y bajo (Figura 22). Se observa que el ANMM es más significativo en el Caribe que en el Pacífico. Además, los valores máximos en el Caribe se localizan en la región más septentrional de la costa (la zona del Porvenir), mientras que en el Pacífico se sitúan en el interior del Golfo de Panamá. El rango de valores que toma cada percentil se resume en la Tabla 5.

		Percentil del 5%	Percentil del 50%	Percentil del 95%
Confianza media	SSP2-4.5	0.11- 0.18 m	0.2– 0.3 m	0.34- 0.47 m
	SSP5-8.5	0.13- 0.2 m	0.23- 0.32 m	0.38- 0.5 m
Confianza baja	SSP2-4.5	0.11- 0.18 m	0.21- 0.3 m	0.43– 0.54 m
	SSP5-8.5	0.13- 0.2 m	0.24- 0.33 m	0.57- 0.67 m

Tabla 5. Rango de valores de ANMM a lo largo de la costa de Panamá en el año 2050 para los percentiles del 5, 50 y 95% para dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) y los niveles de confianza medio y bajo.

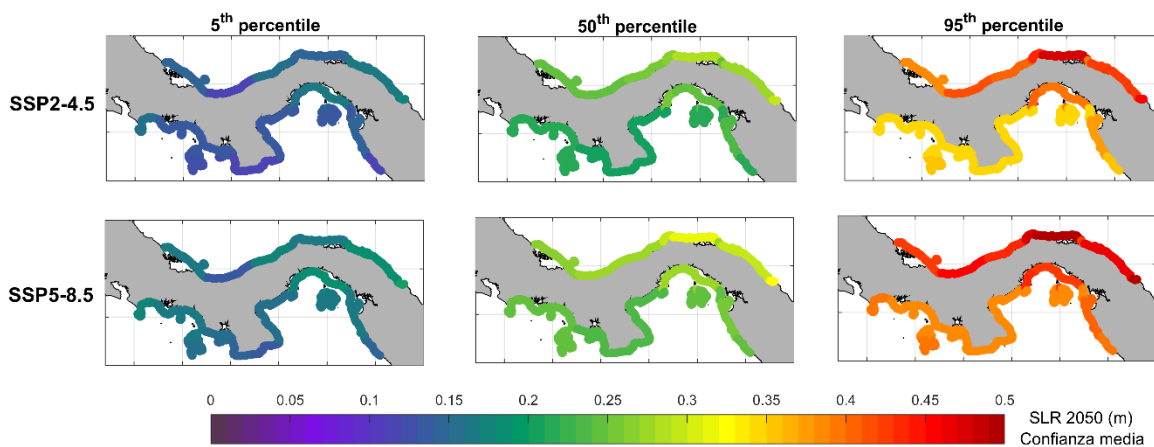


Figura 21. Patrones espaciales de los valores de los percentiles del 5, 50 y 95% de ANMM (o SLR) a lo largo de la costa de Panamá para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el año 2050, con un nivel de confianza medio.

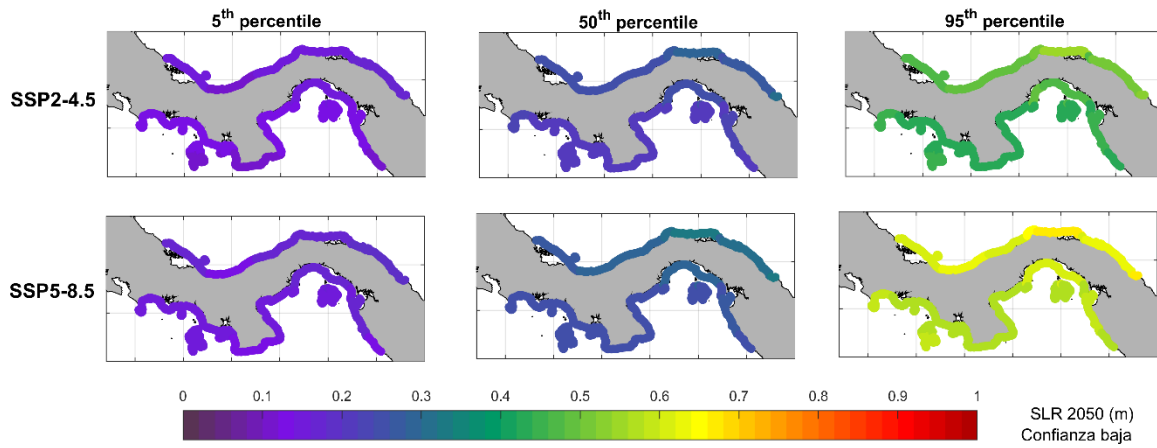


Figura 22. Patrones espaciales de los valores de los percentiles del 5, 50 y 95% de ANMM (o SLR) a lo largo de la costa de Panamá para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el año 2050, con un nivel de confianza bajo.

## 6. BASE DE DATOS DE OLEAJE

Se ha generado una base de datos de oleaje mediante modelado numérico tanto para la costa Caribe como Pacífico de Panamá. Esta base de datos cubre el periodo entre 1993-2021 (29 años) a resolución temporal horaria. La resolución espacial es variable dado el tipo de malla utilizada (es decir, no estructurada), aunque es inferior a 2 km en costa.

### 6.1. Configuración del modelo de oleaje

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) es un modelo de tercera generación de propagación de oleaje espectral, euleriano, no estacionario y promediado en la fase, desarrollado por la Universidad de Delft (Booij et al., 1996). Simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta zonas costeras resolviendo, para ello, la ecuación de transporte de la densidad de acción de onda espectral. Describe, por tanto, la evolución del espectro de energía del oleaje teniendo en cuenta gran cantidad de procesos, como son el asomeramiento, la refracción y la difracción, la disipación por fondo, la rotura, la generación del oleaje por viento, la disipación por decrestamiento (disipación de la energía del oleaje en aguas profundas o whitecapping), la fricción por fondo, etc. El modelo no considera reflexión y no reproduce la difracción en un sentido estricto. Las principales ventajas son que modela la geometría, propagación y los procesos que sufren las olas en el viaje desde el área de generación hasta la costa, se puede acoplar con modelos meteorológicos y ha sido ampliamente validado tanto empíricamente como en el laboratorio.

Los datos de entrada necesarios del modelo son (1) la malla numérica con la información batimétrica, (2) los datos de oleaje en los contornos y (3) los de viento como forzamiento del modelo. Estos dos últimos pueden ser datos paramétricos de oleaje (altura, periodo y dirección) y de viento (dirección y velocidad) o datos espectrales. Como el viento es la componente más importante en los modelos espectrales, datos precisos y con buena resolución sobre los campos de viento incidentes son un aspecto clave en la predicción del oleaje. Los datos de viento se interpolan a cada nodo de la malla y en cada instante de tiempo. La información del oleaje se introduce en todos los nodos del contorno del océano, mediante interpolación de la base de datos de hindcast de ERA5 de IHCantabria. Tal y como se mencionó anteriormente, dicha base de datos ha sido previamente calibrada con datos de satélite. Como este hindcast cuenta con información de tres particiones del espectro, se ha reconstruido el espectro completo tipo Jonswap asumiendo un valor de gamma de 3.3.

Otros datos de entrada del modelo SWAN adicionales son el tipo y forma del espectro, los valores de difracción, la vegetación del fondo, el tipo de whitecapping, etc. En este caso se les han asignado los valores por defecto, que son:

- Coeficiente de fricción por fondo Jonswap =0.038
- Coeficiente de rotura (Breaking) =0.73
- White capping: esta disipación se simula de acuerdo con Komen et al (1984). Los dos coeficientes para definir la tasa de White capping y la pendiente de la onda tienen valores de  $2.36 \cdot 10^{-5}$  y  $3.02 \cdot 10^{-3}$ , respectivamente.
- No se ha tenido en cuenta vegetación en el fondo, ni las corrientes.

Además, es importante mencionar que el modelado del oleaje se ha llevado a cabo respecto al nivel medio del mar, sin considerar variaciones de nivel.

Las simulaciones se han realizado en bloques de un mes, con dos días de calentamiento.

## 6.2. Resultados y Validación

Como resultados de las simulaciones se han obtenido las series temporales de las variables del estado de mar en cada nodo de la malla y a resolución temporal horaria. Las variables son: altura de ola significativa ( $H_s$ ), período medio ( $t_{02}$ ) y de pico ( $t_p$ ) del oleaje, y dirección media del oleaje ( $dir$ ).

A modo de ejemplo, la Figura 23 muestra las serie temporales de las distintas variables del estado de mar del oleaje obtenidas mediante el modelo SWAN en un punto frente a la costa caribe panameña [Lon:-82.03°, Lat: 9.277°].

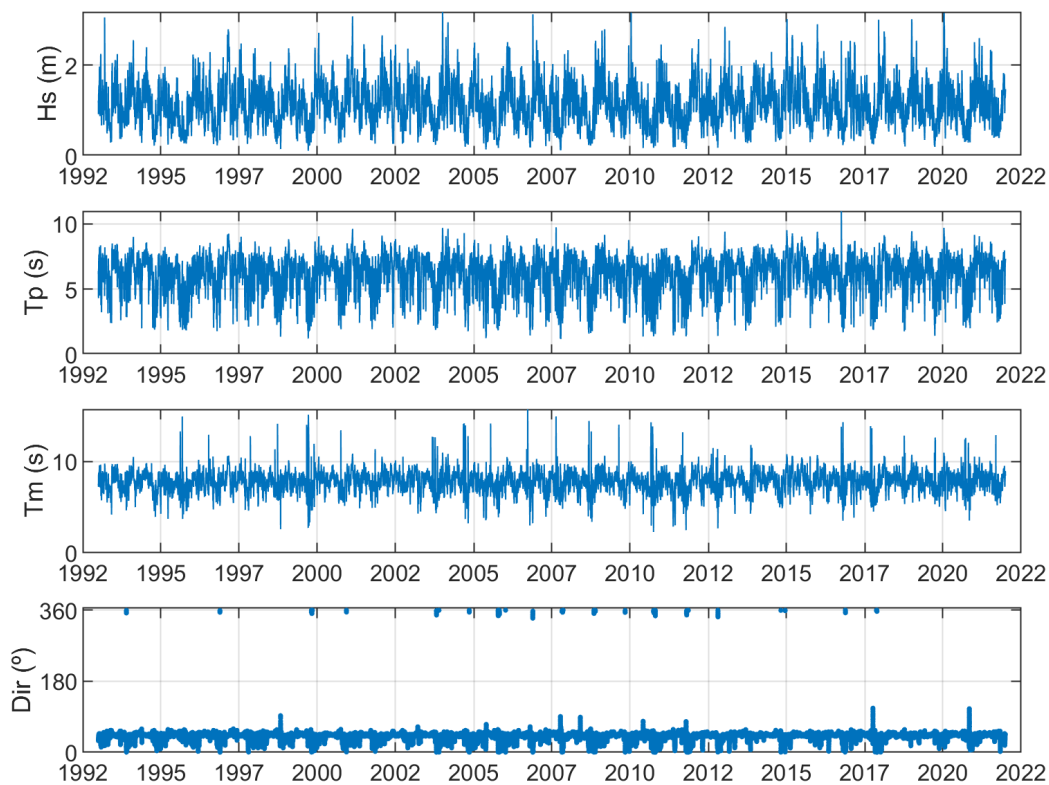


Figura 23. Series temporales generadas de las variables del estado de mar (altura de ola ( $H_s$ ), periodo medio y de pico ( $T_m$  y  $T_p$ ) y dirección media ( $Dir$ ) del oleaje en un punto frente a la costa Caribe de Panamá con coordenadas [Lon:-82.03°, Lat: 9.277°].

La validación de las bases de datos generadas se ha llevado a cabo con los datos de altimetría de ESA Sea State CCI. Ya que los datos de satélite no son fiables cerca de costa (< 5km), la validación se ha llevado a cabo a partir de esta distancia respecto a la costa. Para ello, se han seleccionado los datos de satélite disponibles en el periodo simulado en un radio de  $0.25^\circ$  en torno al punto objetivo que se quiere validar. A continuación, se han definido pares de datos modelo-satélite, asignándole a cada dato individual de satélite su más próximo en tiempo (siempre inferior a 1 hora) de la serie temporal del modelo. Después, se representa el diagrama de dispersión de estos pares de datos y se calculan las métricas de error asociadas. Además, se comparan los cuantiles de ambas bases de datos. A fin de validar toda la malla, se han seleccionado una serie de puntos que cubren todo el dominio offshore (Figura 24). Las Figura 25 y Figura 26 muestran los resultados de la validación de las bases de datos de oleaje en el Caribe y Pacífico, respectivamente. Los rombos negros indican los cuantiles por debajo del 0.9, mientras que los rojos corresponden con los cuantiles del 0.95, 0.99, 0.995 y 0.999. En general, se observa muy buena correlación, principalmente cerca de los contornos de las mallas, con un coeficiente de correlación superior a 0.77, un RMSE inferior a 0.26 m y un BIAS despreciable (puntos 1-3 de las mallas Caribe y Pacífico). A medida que nos acercamos a costa la correlación disminuye ligeramente, principalmente para los valores más extremos (rombos rojos). Sin embargo, esto puede ser debido a la cantidad y calidad de los datos de satélite en esa zona más próxima a costa.

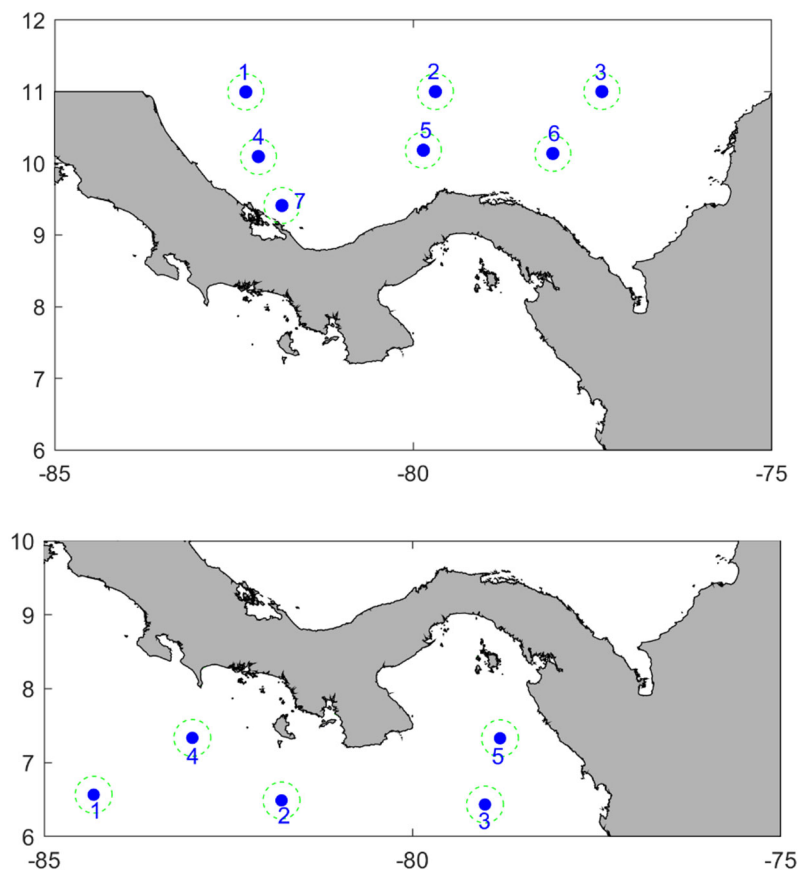


Figura 24. Puntos objetivo (en azul) donde se ha llevado a cabo la validación de la base de datos de oleaje en el litoral (arriba) Caribe y (abajo) Pacífico de Panamá. La línea verde discontinua indica el área circular en el que se han tomado los datos de satélite disponibles para la validación.

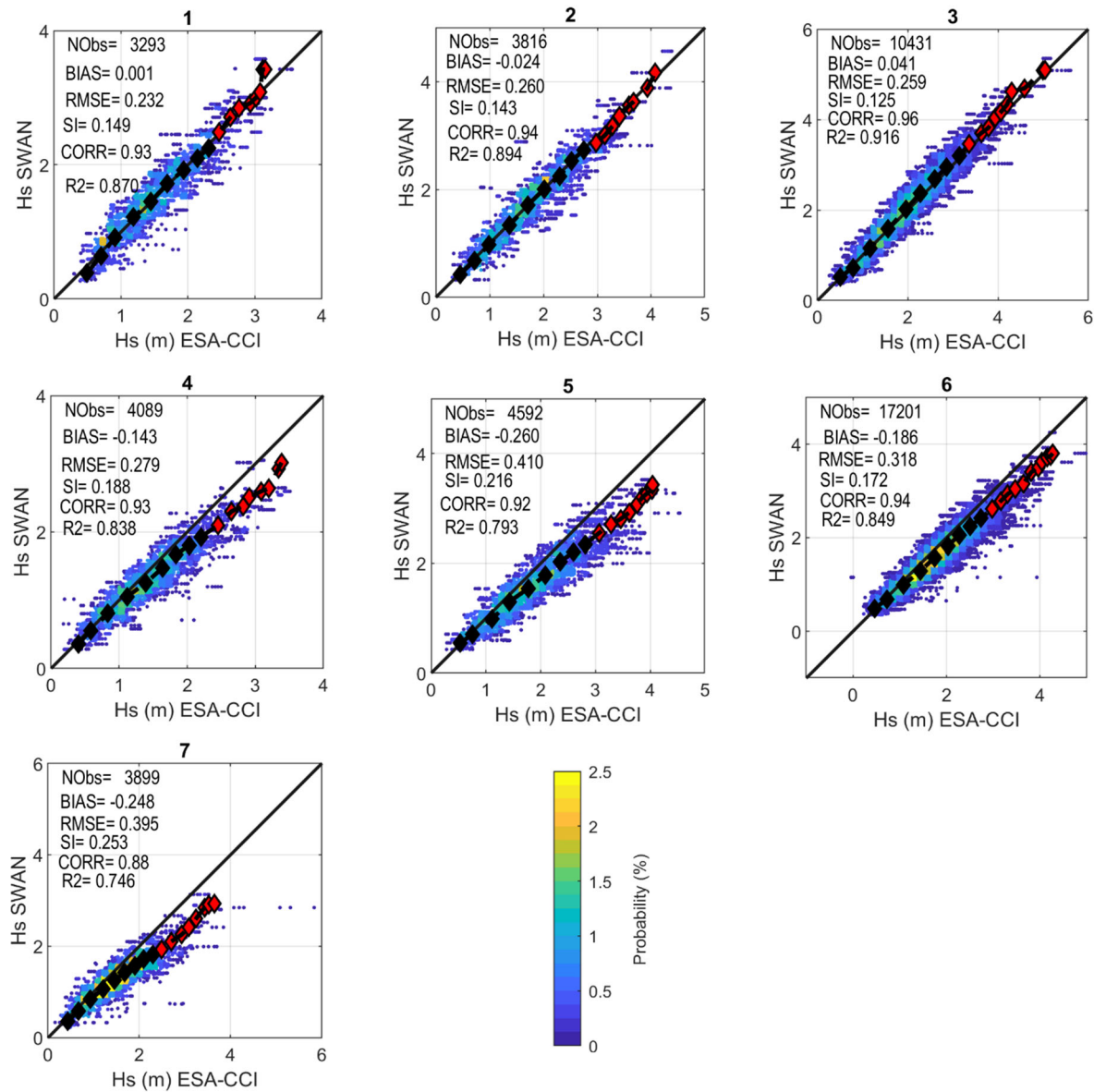


Figura 25. Validación de la altura de ola modelada en la costa Caribe, en los 7 puntos objetivo mostrados en la figura anterior-izquierda.

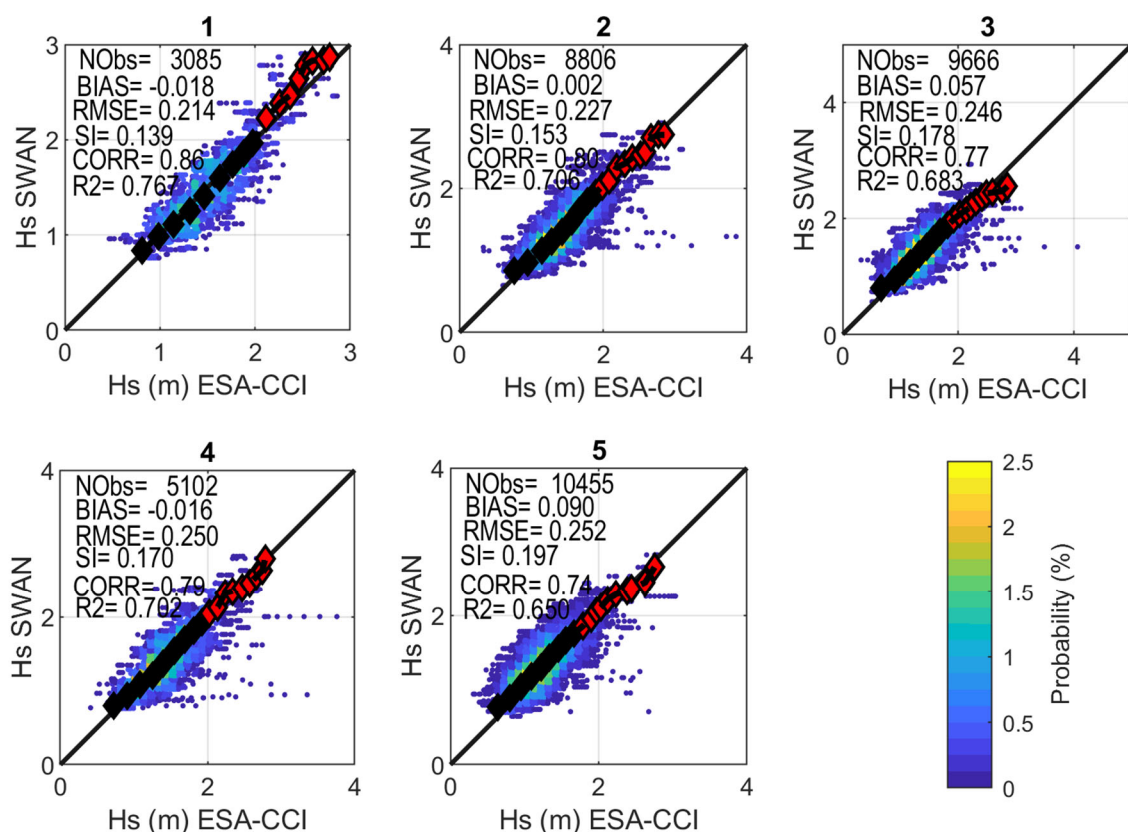


Figura 26. Validación de la altura de ola modelada en la costa Pacífico, en los 5 puntos objetivo mostrados en la figura anterior-derecha.

A fin de visualizar los patrones espaciales y los rangos de variación de los parámetros del estado de mar del oleaje, se ha representado el valor medio y el del percentil del 99% de las variables de altura de ola significativa, periodo medio y de pico y dirección media del oleaje (Figura 27 y Figura 28, respectivamente). Sus valores se resumen en la Tabla 6.

	Valor medio		Percentil del 99%	
	Caribe	Pacífico	Caribe	Pacífico
Altura de ola (Hs, m)	0.4- 1.38	0.14- 1.66	0.91- 2.97	0.37- 3.16
Periodo medio (Tm, s)	3.54- 6.86	1.22- 8.98	5.74- 9.52	1.95- 13.69
Periodo de pico (Tp, s)	7.18- 8.22	5.19- 14.02	9.7- 12.81	16.89- 18.53

Tabla 6. Rango de variación de los valores medios y del percentil del 99% de las variables del estado de mar del oleaje.

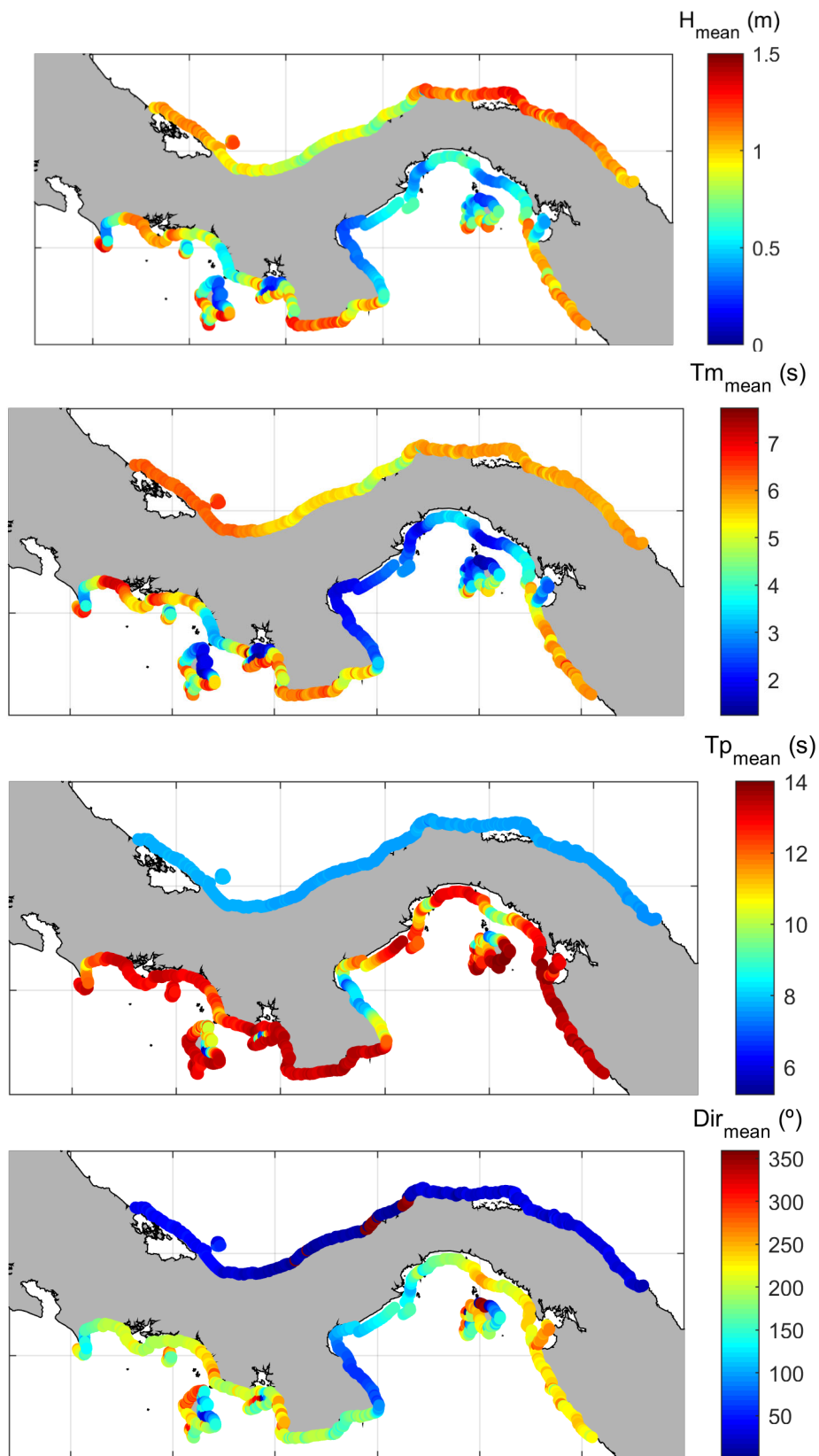


Figura 27. Valores medios de altura de ola significativa ( $H_s$ , m), periodo medio ( $T_m$ , s), periodo de pico ( $T_p$ , s) y dirección media del oleaje ( $\text{Dir}$ , °) a lo largo de la costa panameña.

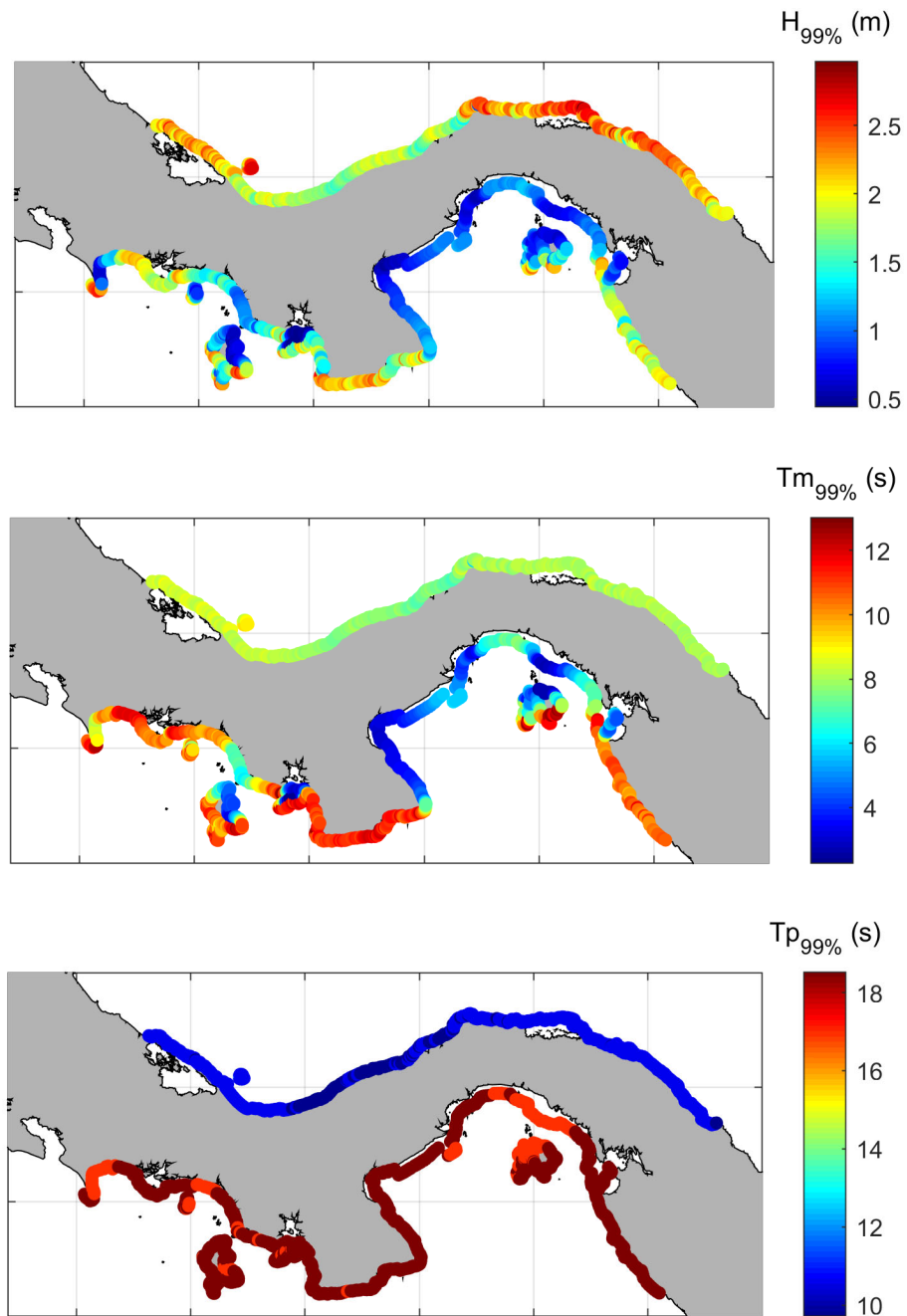


Figura 28. Percentil del 99% de altura de ola significativa ( $H_s$ , m), periodo medio ( $T_m$ , s) y periodo de pico ( $T_p$ , s) a lo largo de la costa panameña.

## 7. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

En el marco de este proyecto, se han desarrollado un total de cuatro bases de datos de las dinámicas marinas en Panamá: dos de oleaje (una para la costa Caribe y otra para la Pacífico) y otras dos de nivel del mar (una para cada costa). Además, se ha procesado la base de datos de proyecciones climáticas de aumento en el nivel medio del mar publicada en el AR6 (IPCC, 2021) para Panamá. Los autores no tienen conocimiento de la existencia de ninguna base de datos comparable a escala nacional, por lo que la generación de esta base de datos supone un gran punto de partida para poder realizar estudios de impactos y riesgos costeros. Además, la disponibilidad de estas series temporales largas y homogéneas de los parámetros integrados del oleaje y de nivel del mar permite múltiples aplicaciones. Entre éstas destacan los estudios de clima marítimo, de gestión costera, el diseño de obras marítimas de defensa, la caracterización de las condiciones offshore en las aguas territoriales, etc.

Respecto a consideraciones a tener en cuenta en estas bases de datos generadas, a continuación, se resumen las siguientes fortalezas:

- Estas bases de datos se han generado utilizando como datos de entrada bases de datos de alta calidad, alta resolución, las más actualizadas y contrastadas. Es el caso del reanálisis global de ERA5, de la base de datos de anomalías en el nivel medio del mar de CMEMS o la batimetría regional y la línea de costa utilizadas.
- La base de datos de proyecciones del nivel medio del mar es la más actualizadas y completa a día de hoy (fuente IPCC-AR6, 2022).
- Se han utilizado modelos numéricos de última generación del estado del arte, como son el modelo SWAN de oleaje y el modelo ADCIRC. Las mallas numéricas de estos modelos se han creado con herramientas específicas para minimizar los errores de los modelos. Además, han pasado por un proceso de optimización.
- Los datos abarcan un periodo de 29 años a resolución horaria, lo que permite aplicar modelos estadísticos para caracterizar los valores asociados a periodos de retorno altos (condiciones climáticas de eventos extremos met-oceánicos).
- En la propuesta del proyecto se contemplaba que las bases de datos tendrían una resolución espacial inferior a 30 km. Se ha llegado a una resolución inferior a 3 km a lo largo de toda la costa de Panamá.
- En el modelo hidrodinámico se ha tenido en cuenta tanto la marea astronómica, como las anomalías en el nivel medio del mar asociadas a fenómenos de El Niño y la marea meteorológica. Al simular todas las componentes juntas, también se tienen en cuenta las interacciones no lineales entre ellas.

Como puntos débiles o aspectos a mejorar de las bases de datos generadas destacan:

- Los datos atmosféricos de ERA5 tienen una resolución de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , insuficiente para capturar las condiciones atmosféricas cerca de costa, tal y como se mostró en el entregable anterior 3.1-b cuando se comparaba el viento de ERA5 con las medidas de las estaciones meteorológicas de ETESA. Además, de las validaciones con las boyas del NDBC también se vio cómo ERA5 subestimaba ligeramente la velocidad del viento, principalmente los valores extremos.
- La base de datos de oleaje se ha generado con respecto al nivel medio del mar, sin tener en cuenta las variaciones de nivel debido a la marea astronómica. Esto no supone gran limitación en la costa Caribe, donde la amplitud de la marea es de  $\sim 0.2\text{m}$ . Sin embargo, puede tener efectos importantes en las zonas más someras de la costa Pacífico, donde la amplitud de la marea es superior a 2 m afectando, significativamente, a las condiciones de oleaje en esta zona.
- La batimetría regional utilizada, que procede del proyecto de “evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica”, no cuenta con información batimétrica en la zona costera caribeña de Guna Yala (Figura 29), por lo que en esta zona se han asumido isobatas paralelas a las existentes. Esto puede disminuir la calidad de los datos de oleaje en esta zona.

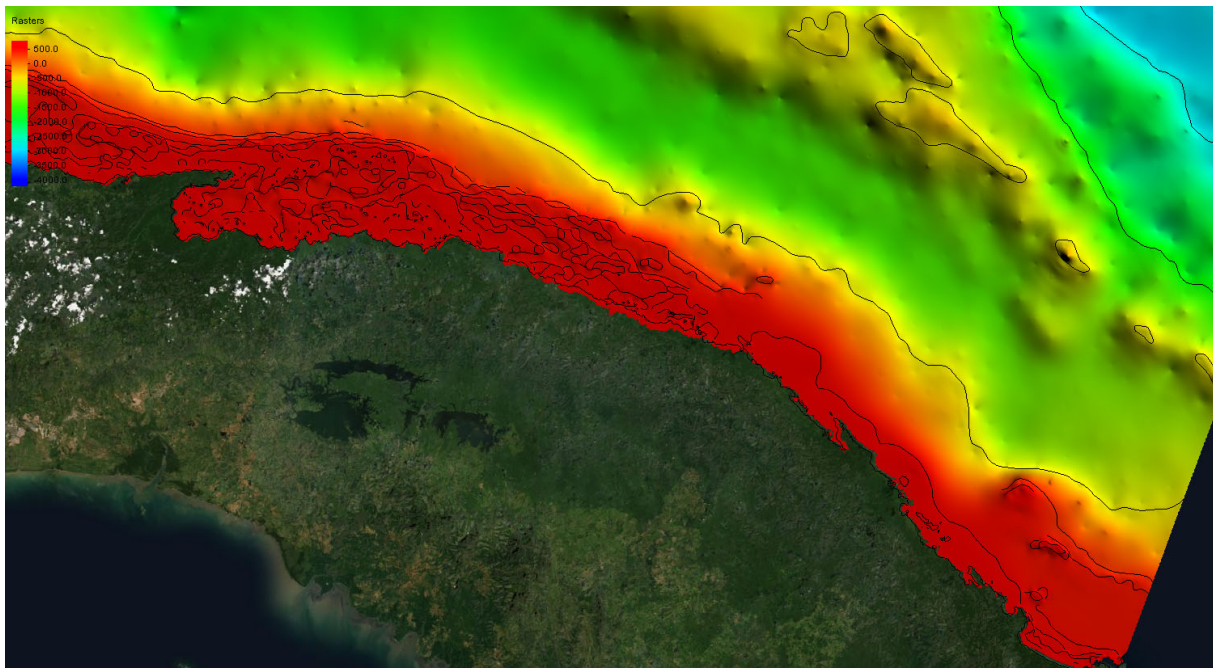


Figura 29. Imagen raster de los datos batimétricos regionales procedentes del proyecto de “evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica”. Se observa la falta de información en la región de Guna Yala (zona sureste de la imagen).

- No se ha podido validar correctamente la base de datos de oleaje en las zonas más costeras, afectadas por los procesos de asomeramiento y refracción, ya que no se dispone de medidas in-situ de las condiciones de oleaje y los datos procedentes de satélite fallan en estas áreas tan próximas a costa (< 5 km).
- Los datos del hincast de oleaje que se han introducido como condiciones de contorno del modelo tienen información de 3 particiones del espectro a partir de las cuales se ha reconstruido el espectro completo. Esto no es del todo acertado en zonas a las que llegan oleajes de muchos tipos (por ejemplo, la costa Pacífico).
- No se han simulado las condiciones de las dinámicas marinas en los interiores de estuarios (ya que estos no se han definido correctamente). En bahías cerradas con numerosas islas e islotes de pequeño tamaño, que no se han tenido en cuenta dada la resolución de la malla (como por ejemplo el archipiélago de Bocas del Toro o el Golfo de Guna Yala), la información generada no es fiable. Por ello, se recomienda usar los datos disponibles fuera de estas zonas y, a partir de ellos, hacer un estudio más específico de las condiciones de las dinámicas a una resolución mucho mayor.

Estas bases de datos se han hecho a nivel regional con lo cual, si se quiere llevar a cabo un estudio específico a nivel local o a nivel de playa, se necesita hacer un downscaling (o regionalización) a partir de esta base de datos. Con dicha regionalización se busca caracterizar correctamente las dinámicas a escala local, muy afectadas por los accidentes costeros de escala inferior a los pocos kilómetros que no se han tenido en cuenta en este proyecto. Además, lo ideal sería utilizar como forzamiento datos de viento locales de gran resolución obtenidos con modelos como el WRF (Weather Research and Forecasting, NCAR).

## BIBLIOGRAFÍA

- Becker, J. J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G., Weatherall, P. (2009). Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS, *Marine Geodesy*, 32:4, 355-371. DOI: 10.1080/01490410903297766
- Booij, N.; Holthuijsen, L.H., and Ris, R.C. (1996). The SWAN wave model for shallow water. *Coastal Engineering*, Nº25. Conference Proceedings, <https://doi.org/10.9753/icce.v25.%25p>
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Dodet, G., Piolle, J.-F., Quilfen, Y., Abdalla, S., Accensi, M., Arduin, F., Ash, E., Bidlot, J.-R., Gommenginger, C., Marechal, G., Passaro, M., Quartly, G., Stopa, J., Timmermans, B., Young, I., Cipollini, P., and Donlon, C. (2020). The Sea State CCI dataset v1: towards a sea state climate data record based on satellite observations, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1929–1951, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1929-2020>.
- Douglass, S. L., Nathan, R. A., & Malyszczek, J. D. (2004). Coastal and Port Engineering. En J. T. Ricketts, M. K. Loftin, & F. S. Merritt, *Standard Handbook for Civil Engineers* (5th ed.). Florida: McGraw-Hill.
- Egbert, G. D., Bennett A. F. , and Foreman M. G. G. , 1994: TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res*, 99 , 24821–24852.
- Egbert, G.D., and Erofeeva, S.Y., (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19.2, 183-204.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B., R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Komen, G. J., Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1984). On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum, *Journal of Physical Oceanography*, 14(8), 1271-1285.
- Luetlich, R.A., Jr., Westerink, J.J., and Scheffner, N.W. (1992). ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, *Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6*, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 137p.

- Pawlowicz, R.; Beardsley, B. and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis with error analysis in MATLAB using T\_TIDE. *Computers & Geosciences*. 28. 929-937. 10.1016/S0098-3004(02)00013-4.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger Jr., A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53 (7), pp. 573-588.
- TNC. 2008. Evaluación de ecorregiones marinas en Mesoamérica. Sitios prioritarios para la conservación en las ecorregiones Bahía de Panamá, Isla del Coco y Nicoya del Pacífico Tropical Oriental, y en el Caribe de Costa Rica y Panamá. Programa de Ciencias Regional, Región de Mesoamérica y El Caribe. The Nature Conservancy, San José, Costa Rica. 165 pags.
- US Army Corps of Engineers (2003) Engineering and Design—Slope Stability (PDF). Coastal Engineering Manual, Washington DC.