

**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 4.2

**“GUÍA PARA ADMINISTRADORES DE DIAM DE LAS BASES DE DATOS DE DINÁMICAS
MARINAS”**

Tarea 4: Definición de las herramientas metodológicas para el uso de las bases de datos

TAREA 4. Definición de las herramientas metodológicas para el uso de las bases de datos.

ENTREGABLE 4.2. “Guía para administradores de DIAM de las bases de datos de dinámicas marinas”

Versión	Fecha	Revisión
0	9/05/2023	Primera versión entregada.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	V
ANTECEDENTES	1
1 INTRODUCCIÓN	2
2 DESCRIPCIÓN DE LAS DINÁMICAS MARINAS	3
2.1 Oleaje	3
2.2 Nivel del Mar	3
3 PROYECCIONES CLIMÁTICAS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR.....	5
4 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS GENERADOS	6
4.1 Nivel 1: Datos espacio-temporales.....	6
<u>4.1.1</u> Descripción	6
<u>4.1.2</u> Flujo del proceso (Linaje)	7
<u>4.1.3</u> Formato y organización.....	7
<u>4.1.4</u> Calidad del dato.....	9
4.2 Nivel 2: Puntos costeros.....	11
<u>4.2.1</u> Series temporales.....	11
<u>4.2.1.1</u> Descripción	11
<u>4.2.1.2</u> Flujo del proceso (Linaje)	11
<u>4.2.1.3</u> Formato y organización.....	12
<u>4.2.1.4</u> Calidad del dato.....	13
<u>4.2.2</u> Nivel de Agua Total (NAT)	14
<u>4.2.2.1</u> Descripción	14
<u>4.2.2.2</u> Flujo del proceso (Linaje)	14
<u>4.2.2.3</u> Formato y organización.....	15
<u>4.2.2.4</u> Calidad del dato.....	15
<u>4.2.3</u> Climatologías	17
<u>4.2.3.1</u> Descripción	17
<u>4.2.3.2</u> Flujo del proceso	17

4.2.3.3	Formato y organización	17
4.2.3.4	Calidad del dato	18
4.3	Nivel 3: Resultados de inundación costera	19
4.3.1	Descripción	19
4.3.2	Flujo del proceso (Linaje)	19
4.3.3	Formato y organización	19
4.3.4	Calidad del dato	20
4.4	Nivel 4: Región marina	22
4.4.1	Climatologías	22
4.4.1.1	Descripción	22
4.4.1.2	Flujo del proceso (Linaje)	22
4.4.1.3	Formato y organización	23
4.4.1.4	Calidad del dato	23
4.4.2	Aumento en el Nivel Medio del Mar (ANMM)	24
4.4.2.1	Descripción	24
4.4.2.2	Flujo del proceso (Linaje)	24
4.4.2.3	Formato y organización	24
4.4.2.4	Calidad del dato	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema sobre los productos generados en el marco del presente proyecto.	6
Figura 2. Estructura de las variables contenidas en los NetCDF.	7
Figura 3. Organización de los datos espacio-temporales en formato NetCDF	8
Figura 4. Diagrama que describe los pasos seguidos para asegurar la mayor calidad posible de los datos de las dinámicas marinas generados mediante modelado numérico.....	9
Figura 5. Puntos objetivo seleccionados a lo largo del litoral panameño con la paleta de colores indicando la profundidad en los mismos.	11
Figura 6. Visualización de parte del contenido de un fichero de texto, en el que se observa tanto el cabecero como la disposición de los datos en filas y columnas.	13
Figura 7. Esquema de los distintos casos de Nivel de Agua Total analizados, que se consideran potenciales de causar inundación costera.	14
Figura 8. Esquema del contenido de la geodatabase de NAT.	15
Figura 9. Capas de Google Earth correspondientes a las climatologías en los puntos costeros.....	18
Figura 10. Esquema del contenido de las geodatabases con los resultados de inundación costera....	20
Figura 11. Área rectangular definida a resolución 0.2ºx0.2º para caracterizar la dinámica marina próxima a Panamá.....	22
Figura 12. Esquema del contenido de la geodatabase de climatologías en la región marina.	23
Figura 13. Esquema del contenido de la geodatabase de climatologías en la región marina.	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables almacenadas en los archivos NetCDF	8
Tabla 2. Variables almacenadas en los ficheros de texto.....	12
Tabla 3. Estadísticos calculados para cada una de las variables en los puntos costeros	17
Tabla 4. Climatologías calculadas en la región marina.....	23

ANTECEDENTES

En agosto de 2021, Naciones Unidas publica, a través del Centro y Red de Tecnología del Clima (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 fomentar el aumento de la resiliencia presente y futura de las zonas costeras de Panamá frente a eventos extremos y al cambio climático (concretamente, al aumento del nivel medio del mar), mediante la generación de bases de datos de las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar, con cobertura nacional sobre todas las regiones costeras de Panamá. 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.

La actividad 4 del proyecto consiste en el desarrollo de unos documentos guía tanto para los administradores de DIAM como para el resto de usuarios en general. Estas guías informan al usuario de los productos disponibles a partir de las bases de datos de dinámicas marinas en Panamá, así como de su organización, formato y principales aplicaciones. El modo de acceso a dichos datos no se puede especificar en estos documentos ya que, a día de hoy, esta información aún no está disponible a través del portal nacional de SINIA.

Este documento en concreto corresponde al entregable 4.2, la guía para el manejo de los datos por parte de los administradores de la Dirección de Información Ambiental (DIAM) de Panamá. Pretende guiar a dichos administradores para la utilización y gestión de las bases de datos de dinámicas marinas a nivel nacional, desarrolladas en el marco de este proyecto. En este documento se describe tanto el flujo el proceso para generar los distintos productos sobre las dinámicas marinas en la costa panameña, así como la organización, el formato y la calidad de los mismos.

Los datos que se ofrecen contienen información sobre las principales variables de oleaje y nivel del mar y sobre las proyecciones climáticas del nivel medio del mar en la región marino-costera de Panamá, así como sobre el índice de Nivel de Agua Total (NAT) a lo largo de la costa y sobre los mapas de inundación costera bajo distintos escenarios y casos analizados. Más información sobre los productos generados a partir de las bases de datos desarrolladas se presenta en la sección 4 de este documento.

1 INTRODUCCIÓN

Los estudios para caracterizar el clima marino y/o llevar a cabo análisis de riesgos e impactos costeros requiere la disponibilidad de unas bases de datos que cumplan las siguientes características:

- Buena calidad, tanto de los valores medios como de los extremos.
- Serie de datos relativamente larga, que cubra, al menos, tres décadas.
- Datos con alta resolución temporal (por ejemplo, resolución hora a hora).
- Series de datos homogéneas y continuas, que no tengan huecos.
- Datos multivariantes, que incluyan información sobre las principales variables utilizadas para este tipo de estudios.

A fin de poder llevar a cabo estudios de este tipo a lo largo de la costa panameña, se han generado unas bases de datos de las dinámicas marinas a alta resolución que cumplen con estos requisitos. En concreto, se han desarrollado cuatro (4) bases de datos diferentes, que corresponden con las dos cuencas (Caribe y Pacífico) y con las dos dinámicas marinas principales (nivel del mar y oleaje).

Estas bases de datos se han generado mediante modelado numérico utilizando los campos de viento en superficie y la presión atmosférica a nivel del mar como forzamientos. Además, los datos de oleaje y nivel del mar (es decir, marea astronómica y residuo no astronómico) procedentes de una base de datos a nivel global con resolución más grosera se han utilizado como condiciones de contorno. Estos datos se introducen en una malla numérica que contiene información batimétrica de alta resolución. En cada nodo de esta malla se resuelven las ecuaciones matemáticas incorporadas en los modelos para, así, obtener como resultado las series temporales horarias de las principales variables de oleaje y nivel del mar en cada uno de estos nodos. Las bases de datos generadas reconstruyen las condiciones de ambas dinámicas en el periodo comprendido entre enero de 1993 y diciembre de 2021, alcanzando una resolución espacial de, aproximadamente, 2 km a lo largo de la costa de Panamá. Por otro lado, se analizan las proyecciones climáticas de aumento en el nivel medio del mar a partir de la base de datos utilizada en el Sexto informe del IPCC (AR6). Se consideran dos escenarios climáticos, correspondientes a un escenario de estabilización media y otro de altas emisiones de gases de efecto invernadero (SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente), datos con confianza media y baja, así como los valores de tres percentiles del conjunto de estudios independientes (el percentil del 5%, del 50% y del 95%).

Una descripción detallada sobre los aspectos técnicos para la generación de estas bases de datos se presenta en el Entregable 3.2 de este proyecto.

A partir de estos datos brutos de las dinámicas marinas se han generado cuatro tipos de productos, con un nivel de postprocesamiento y aplicabilidad diferente y, por tanto, dirigidos a usuarios con distinto perfil técnico. Estos productos se describen en detalle en el Entregable 3.4 del proyecto.

A continuación, se presenta cada uno de estos productos describiendo su contenido, los pasos seguidos en su generación (linaje o flujo del proceso), el formato y organización de los mismos, así como información sobre la calidad del dato.

2 DESCRIPCIÓN DE LAS DINÁMICAS MARINAS

Las dos dinámicas marinas consideradas en este estudio son el oleaje y el nivel del mar. A continuación, se hace una breve descripción de ambas y se definen las principales variables utilizadas para su caracterización, así como su nomenclatura.

2.1 Oleaje

El oleaje se define como una sucesión de ondas sobre la superficie de las aguas, generalmente generadas por la acción del viento y comprendidas entre periodos de 2- 30s. Son ondas de gravedad, ya que la perturbación del viento sobre la superficie del mar provoca que el agua tienda a su estado de equilibrio nuevamente mediante la acción de la gravedad. Se distinguen dos tipos de oleaje generado por el viento, en función de su distancia a la zona de generación. El mar de viento (o *sea waves*) es el oleaje que se encuentra próximo a la zona de generación y se caracteriza por ser un oleaje caótico y desordenado. El mar de fondo (o *swell*) es un oleaje que ha viajado grandes distancias desde la zona de generación y que, por tanto, le ha dado tiempo a “ordenarse” en trenes de ondas con periodos y direcciones similares.

Los parámetros más representativos para caracterizar el oleaje son:

- Altura de ola significativa (H_s): representa la altura de las olas que un observador experimentado apreciaría a simple vista en el punto de medida (no desde la costa), que equivale, aproximadamente, a la altura media del tercio de olas más altas.
- Periodo medio (T_m , T_{02} , T_{m02}): periodo medio de todas las ondas que constituyen el oleaje.
- Periodo de pico (T_p): es el periodo del grupo de ondas con más energía.
- Dirección media (Dir): representa la dirección media de las olas.

2.2 Nivel del Mar

Se conoce como nivel del mar a aquél que se toma como referencia para determinar la altitud de diversas localidades y accidentes geográficos. El nivel medio del mar, por su apariencia plana en relación a la tierra, se ha considerado históricamente una referencia de medida de altitudes. Sin embargo, la superficie media del mar sí presenta variaciones de altura de un lugar a otro y a lo largo del tiempo. Estas variaciones son debidas, principalmente, a fenómenos astronómicos y meteorológicos. De esta manera, el nivel del mar se puede descomponer en las siguientes variables:

- Nivel medio del mar: se define como el nivel de las aguas tranquilas del mar promediado durante un periodo determinado de tiempo (meses, años) de tal forma que los efectos provocados periódicamente por mareas y por otras causas frecuentes queden compensados.
- Marea astronómica: son movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel del mar con periodos próximos a las 12 o 24 horas que se producen por los efectos gravitacionales del sistema Tierra-Sol-Luna.

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

- Marea meteorológica (o *storm surge*): Los fenómenos meteorológicos que más influencia tienen sobre las mareas son el viento fuerte soplando de manera prolongada sobre una determinada zona y las variaciones bruscas de la presión atmosférica.

3 PROYECCIONES CLIMÁTICAS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

Los datos de las proyecciones regionales de cambio climático del nivel medio del mar para el siglo XXI en Panamá proceden de la base de datos utilizada en el Sexto informe del IPCC (AR6). Esta base de datos tiene cobertura global a una resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y temporal decadal. Aporta información sobre las estimaciones del ascenso del nivel medio del mar respecto al periodo de referencia 1995-2014, considerando varios escenarios de cambio climático (es decir, de trayectorias socio-económicas distintas y, por tanto, de diferentes concentraciones de emisión de gases de efecto invernadero).

Los datos publicados en el AR6 sobre aumento futuro del nivel del mar parten de una recopilación de múltiples estudios, de diferentes instituciones a nivel internacional. Estos datos se han agrupado en dos bloques, denominados: confianza media y confianza baja. Los bloques hacen referencia a procesos físicos que afectan al aumento del nivel medio del mar sobre los que se tiene mayor o menor incertidumbre. En concreto, los datos con confianza media (*medium confidence*) son las proyecciones de aumento del nivel del mar estimadas a partir de procesos físicos sobre los que se tiene una 'pericia' media para su modelado. Por otro lado, los datos confianza baja (*low confidence*) corresponden con las proyecciones de aumento del nivel del mar que incluyen la contribución de ciertos procesos que tienen una incertidumbre mayor (procesos geofísicos asociados a la contribución del deshielo de banquisa antártica). Es por ello que el escenario de confianza baja pronostica mayores aumentos del nivel medio del mar en el futuro.

Por otro lado, esta base de datos proporciona el valor del aumento del nivel medio del mar para distintos percentiles, a fin de poder caracterizar la incertidumbre asociada. El percentil se define como el valor que divide un conjunto ordenado de datos estadísticos de forma que un porcentaje de tales datos sea inferior a dicho valor. Estos percentiles indican la concordancia entre todos los estudios independientes utilizados por el IPCC-AR6.

En este proyecto, se facilitan los valores de aumento en el nivel medio del mar para el año horizonte 2050, para dos escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), los dos bloques de confianza y el valor de tres percentiles:

- Percentil del 50%: indica el valor de aumento del nivel medio del mar a partir del cual la mitad de las estimaciones independientes están por encima y la mitad están por debajo (la mediana, un indicador medio de cambio).
- Percentil del 5%: indica el valor de aumento del nivel medio del mar a partir del cual el 95% de las estimaciones independientes están por encima y solo un 5% están por debajo (un indicativo de un nivel de incertidumbre inferior).
- Percentil del 95%: indica el valor de aumento del nivel medio del mar a partir del cual sólo un 5% de las estimaciones independientes están por encima y un 95% están por debajo (un indicativo de un nivel de incertidumbre superior).

4 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS GENERADOS

La Figura 1 muestra el esquema general seguido para la obtención de los distintos productos generados a partir de las bases de datos de dinámicas marinas. Se distinguen 4 niveles de postprocesamiento a partir de las series temporales brutas de oleaje y nivel del mar. Estos incluyen: (1) los datos espacio-temporales brutos almacenados en un formato de archivo específico; (2) datos en puntos seleccionados a lo largo de la costa panameña para caracterizar la dinámica costera; (3) los resultados de aplicar un modelo de inundación costera y (4) datos en la región marino-costera de Panamá para caracterizar la dinámica marina.

Algunos de estos productos constan, a su vez, de una serie de subproductos tal y como se indica en la Figura 1.

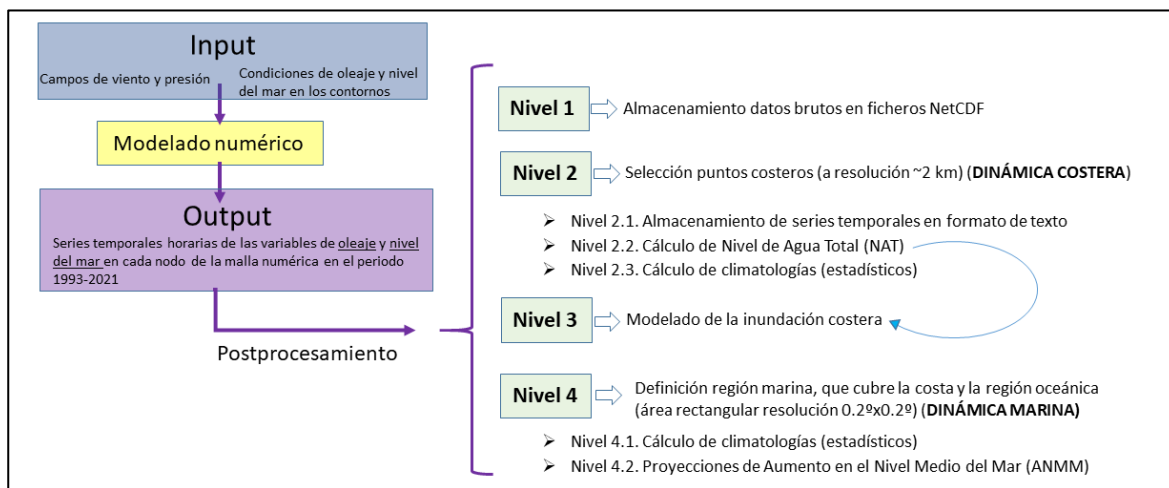


Figura 1. Esquema sobre los productos generados en el marco del presente proyecto.

A continuación, se describe cada uno de estos productos por separado.

4.1 Nivel 1: Datos espacio-temporales

4.1.1 Descripción

Este producto corresponde con los datos brutos procedentes de la salida de los modelos numéricos. Tanto el modelo hidrodinámico ADCIRC (utilizado para simular las condiciones de nivel del mar) como el modelo de oleaje SWAN guardan sus resultados en ficheros de texto. Cada uno de estos ficheros tienen un formato y características distintas, por lo que resulta tediosa su lectura y comprensión. Además, debido al gran volumen de información generada, estos ficheros ocupan mucho espacio. Por estos motivos, resulta necesario su conversión a un formato de archivo más homogéneo, eficiente y fácil de manipular. El formato de archivo que se ha elegido es el NetCDF (*Network Common Data Form*), que es un formato ampliamente utilizado por la comunidad científica para el almacenamiento de datos

climáticos multidimensionales. El apartado 4.1.3 de este documento aporta más información sobre este formato.

4.1.2 Flujo del proceso (Linaje)

Los pasos seguidos para generar este producto son:

- 1) Lectura de los ficheros de texto brutos procedentes de la salida de los modelos numéricos.
- 2) Almacenamiento de estos datos en formato NetCDF.
- 3) Escritura de los metadatos del fichero, incluyendo tanto atributos globales (es decir, a nivel de fichero) como a nivel de variable.

4.1.3 Formato y organización

Los datos espacio-temporales de las distintas variables de oleaje y nivel del mar se han almacenado en archivos NetCDF, que son un conjunto de bibliotecas de software y formatos de datos independiente que admiten la creación, el acceso y el intercambio de datos científicos orientados a matrices. Los archivos NetCDF permiten almacenar datos en forma matricial y tienen la ventaja de que son auto-descriptivos, portables, escalables y agregables. La mayoría de los lenguajes de programación (por ejemplo, C, C++, Python, Matlab, R, Fortran, Java...) tienen funciones específicas para la lectura, manipulación y creación de estos archivos.

La Figura 2 muestra la estructura de las variables contenidas en los NetCDF creados, las cuales tienen dos dimensiones (*tiempo x nodo*), en donde la variable tiempo hace referencia a cada dato horario y el nodo a cada punto de la malla. Cada nodo tiene asociado, a su vez, unas coordenadas de longitud y latitud.

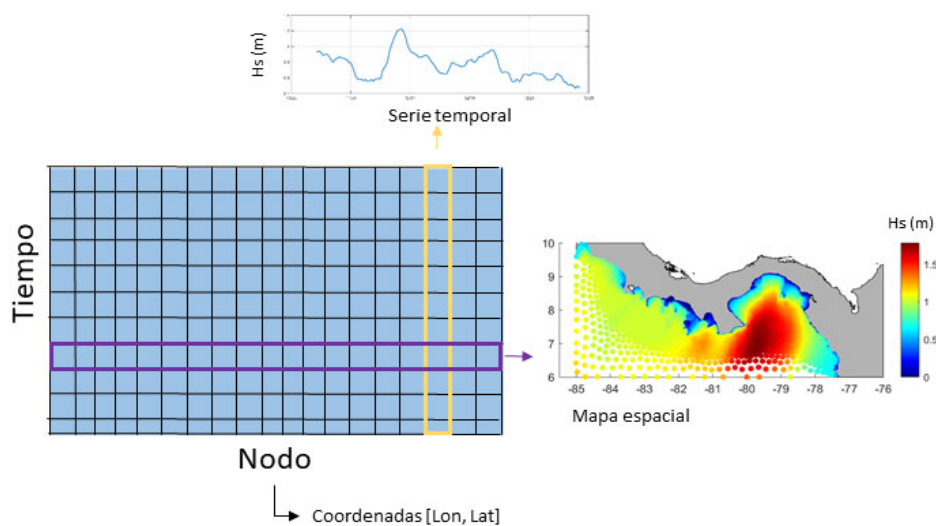


Figura 2. Estructura de las variables contenidas en los NetCDF.

La Tabla 1 muestra las variables almacenadas en los archivos NetCDF.

Dinámica marina	Variable	Unidades
Oleaje	<i>Altura de ola significativa (hs)</i>	metros
	<i>Periodo medio (tm02)</i>	segundos
	<i>Periodo de pico (tp)</i>	segundos
	<i>Dirección media del oleaje (dir)</i>	grados
	<i>Dirección del oleaje asociada al periodo de pico (pdir)</i>	grados
	<i>Profundidad (z)</i>	metros
Nivel del mar	<i>Elevación del nivel del mar (level)</i>	metros

Tabla 1. Variables almacenadas en los archivos NetCDF

Los NetCDF creados se organizan en 4 carpetas, correspondientes a cada cuenca y dinámica consideradas. Dentro de cada una de estas carpetas hay ficheros mensuales, desde enero de 1993 a diciembre de 2021 (Figura 3). Por tanto, cada carpeta contiene 348 archivos.

La nomenclatura de los archivos es la siguiente: *Dinamica_cuenca_año.mes.nc*,

donde “Dinamica” puede tomar el valor de RSL (*Regional Sea Level*) o ROW (*Regional Ocean Waves*), para hacer referencia a si se trata de la base de datos de nivel del mar o del oleaje. “Cuenca” puede ser PP o PC, referente a “Panamá Pacífico” o “Panamá Caribe”, respectivamente. Por último, el nombre del archivo indica el año y el mes al que corresponden esos datos.

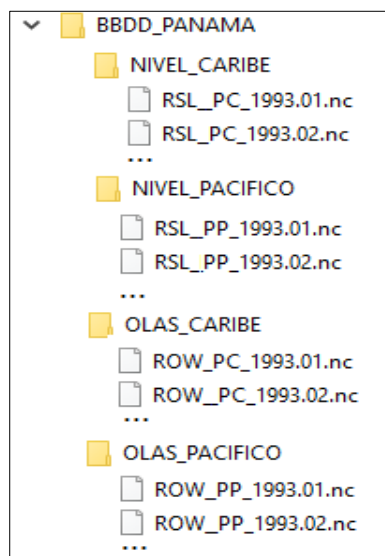


Figura 3. Organización de los datos espacio-temporales en formato NetCDF

Dentro de cada archivo NetCDF se han definido una serie de metadatos (atributos) que aportan información global sobre el origen del archivo (institución creadora, proyecto, fecha de creación...), así como sobre cada una de las variables (dimensiones, nombre, unidades, ...). Estos metadatos siguen la convención del *Climate and Forecast (CF) Metadata Convention*.

4.1.4 Calidad del dato

La calidad de los datos obtenidos sobre dinámicas marinas mediante modelado numérico depende, en primer lugar, de la calidad de los datos de partida y, en segundo lugar, del modelo numérico utilizado y de su configuración. La Figura 4 muestra, de forma esquemática, los distintos pasos seguidos en este proyecto para asegurar la máxima calidad posible de los datos generados. Cabe destacar que esta metodología es aplicada en la mayoría de los proyectos relacionados con la generación de bases de datos de dinámicas marinas mediante modelado numérico. Los siguientes párrafos describen en detalle el procedimiento seguido.

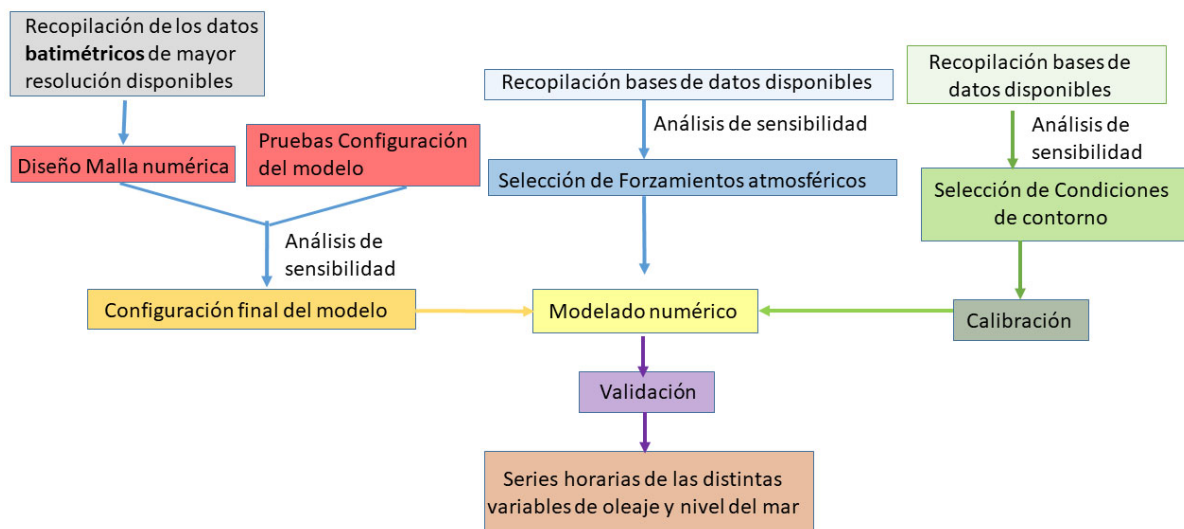


Figura 4. Diagrama que describe los pasos seguidos para asegurar la mayor calidad posible de los datos de las dinámicas marinas generados mediante modelado numérico.

En cuanto a la **calidad de los datos de partida**, ésta se refiere, principalmente, a la resolución de la información batimétrica, a la resolución y calidad de los forzamientos atmosféricos y a la resolución y calidad de las bases de datos de oleaje y nivel del mar utilizadas como condiciones de contorno. En este sentido, y tal y como se describe en el Entregable 3.1b, la fase inicial de este proyecto consistió en hacer una revisión exhaustiva de las bases de datos e información disponible en Panamá, en cuanto a datos medidos y simulados de las dinámicas marinas, fuentes de información batimétricas, bases de datos de reanálisis globales, etc. Tras esta revisión, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de las bases de datos disponibles a fin de seleccionar las más adecuadas para Panamá. En concreto, se compararon las bases de datos procedentes de modelos numéricos con datos medidos (in situ o de forma remota) a fin de determinar su precisión y fiabilidad. Este análisis de sensibilidad se llevó a cabo con:

- Las bases de datos de reanálisis global de las variables atmosféricas: se utilizaron las bases de datos que constituyen el estado del arte y que tienen mayor resolución temporal y espacial. Éstas se compararon con datos de viento medidos por boyas internacionales y por estaciones meteorológicas costeras gestionadas por entidades nacionales.

- Las bases de datos de hindcast de oleaje: se analizaron las bases de datos de hindcast a nivel global disponibles y se compararon con medidas procedentes de los satélites en aguas profundas frente a las costas panameñas.
- Las bases de datos de hindcast de la componente no astronómica del nivel del mar: se analizaron las bases de datos de hindcast a nivel global disponibles y se compararon con las medidas de los mareógrafos disponibles en Panamá.
- La base de datos de marea astronómica: se utilizó el modelo global de mareas más actual y fiable, que constituye el estado del arte y se comparó con los datos procedentes de los mareógrafos.

Los resultados de estos análisis de sensibilidad se detallan en los Entregables 3.1b y 3.2 del proyecto.

En cuanto a los **modelos numéricos utilizados**, se emplearon aquellos que constituyen el estado del arte en estudios similares y para los cuales IHCantabria tiene una amplia experiencia y conocimiento. Una descripción de los mismos se presenta en el Entregable 3.2.

Una vez seleccionados los datos de partida de mejor calidad, se procede a **configurar los modelos numéricos** a fin de que reproduzcan de la forma más precisa posible los procesos naturales. En este sentido, destaca:

- El diseño de la malla numérica de modo que tenga en cuenta las peculiaridades de la batimetría y la morfología de la costa.
- Las parametrizaciones utilizadas en los modelos, como por ejemplo la forma de introducir la fricción por fondo, o el coeficiente de rotura, o la disipación del oleaje...
- Otros aspectos relacionados con la configuración del modelo, como por ejemplo la definición de los pasos de tiempo del modelo, o del tiempo de calentamiento necesario para que el modelo converja y se estabilice, etc.

La configuración óptima se define comparando los resultados obtenidos a partir de distintas configuraciones con datos instrumentales medidos en la zona de estudio.

Además, es importante destacar que antes de introducir los datos de oleaje como condiciones de contorno en el modelo de oleaje, estos fueron calibrados con medidas satelitales.

Una vez generadas las bases de datos a partir de la información de partida descrita anteriormente y utilizando los modelos numéricos y la configuración mencionada, se procede a validar los datos obtenidos. Para ello, se comparan los datos simulados con las medidas instrumentales disponibles y se obtienen medidas del error asociado. En concreto, se calcula el coeficiente de correlación, el error cuadrático medio, el sesgo (o *BIAS*) y el índice de dispersión (o *scatter index*) entre ambas bases de datos. Se pone especial atención en la similitud no sólo de los valores más comunes (característicos de las condiciones normales), sino en los valores más extremos y menos frecuentes, característicos de las condiciones extremas de las variables, ya que son los causantes de los mayores impactos en la costa.

Además de la validación de los datos generados, se procede a comprobar que las ejecuciones y la transferencia de datos han terminado de forma satisfactoria, sin que haya huecos ni valores anómalos en la información generada.

4.2 Nivel 2: Puntos costeros

Con el objetivo de caracterizar la dinámica costera en Panamá, se han seleccionado una serie de puntos a lo largo de toda la costa panameña. El criterio seguido para dicha selección ha sido que estén lo más cercanos posibles a costa como para que el oleaje en dichas localizaciones haya sufrido los efectos de asomeramiento y refracción pero sin que haya llegado a romper. Por este motivo, se buscan puntos de las mallas numéricas que estén a una profundidad en torno a los 10-20 m en la mayoría de los casos. En total, se han seleccionado 1454 puntos costeros, con una resolución espacial de unos 2 km, aproximadamente (Figura 5).

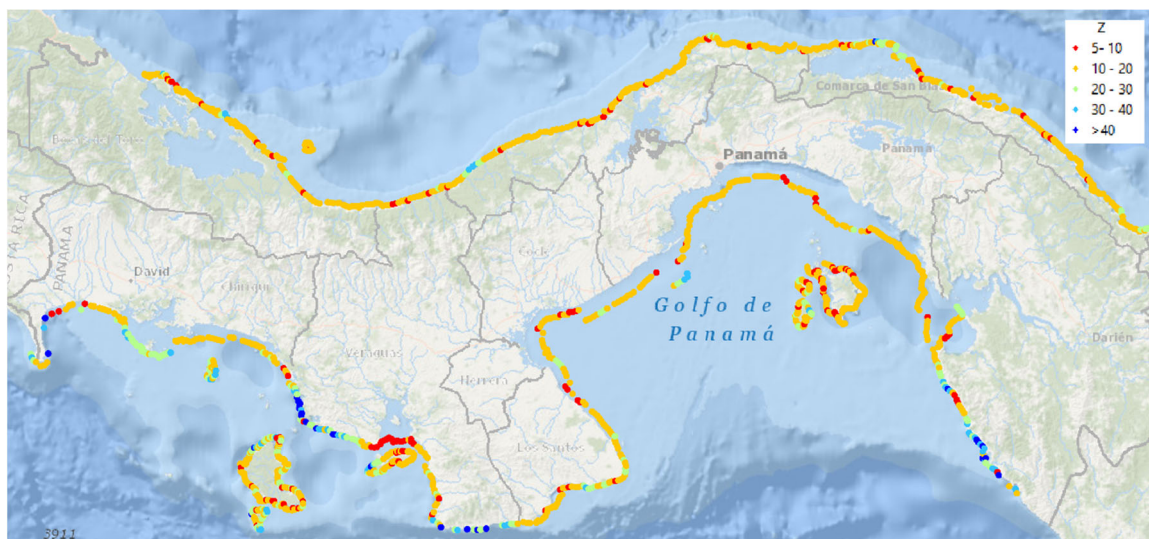


Figura 5. Puntos objetivo seleccionados a lo largo del litoral panameño con la paleta de colores indicando la profundidad en los mismos.

En dichos puntos se han creado tres tipos de productos: (1) las series temporales completas en formato de texto, (2) datos geo-espaciales con el valor del índice de Nivel de Agua Total (NAT) y (3) datos geo-espaciales con las principales climatologías de oleaje y nivel del mar. A continuación, se describe cada uno de estos subproductos.

4.2.1 Series temporales

4.2.1.1 Descripción

Se han almacenado las series temporales horarias de las distintas variables de oleaje y nivel del mar en cada uno de los 1454 puntos costeros. Estas series temporales abarcan el periodo completo analizado, desde enero de 1993 a diciembre de 2021. Estos datos se guardan en ficheros de texto (*.txt).

4.2.1.2 Flujo del proceso (Linaje)

Los pasos seguidos para generar este producto son:

1. Selección de puntos a lo largo de la costa a una resolución de ~2 km y profundidad entre ~10-20 m.

2. En esos puntos, se han leído las series temporales completas (desde 1993-2021) almacenadas previamente en NetCDF, de todas las variables de oleaje y nivel del mar. Es decir, se parte de los datos generados en el Nivel 1 y de ellos se extrae, exclusivamente, la información disponible para las 1454 localizaciones definidas a lo largo de la costa.
3. Los datos se han almacenado en ficheros de texto (un fichero para cada punto).

4.2.1.3 Formato y organización

Estos datos se han almacenado en formato de texto (*.txt) dada la simplicidad en su lectura y en la comprensión de su contenido. Se ha generado un fichero para cada punto, por lo que se dispone de 1454 archivos de texto.

La nomenclatura de estos ficheros es la siguiente: *Punto_ID_[Lat][Lon].txt*, donde el ID puede tomar el valor entre 1 y 1454 y las coordenadas [Lon, Lat] hacen referencia a la localización de ese punto en el sistema de coordenadas geográficas WGS84.

Cada fichero dispone de un cabecero con información sobre el proyecto y la institución creadora. Además, especifica las características del punto (localización y profundidad) y las variables contenidas en el fichero, indicando sus unidades. El listado de estas variables se presenta en la

Tabla 2.

Dinámica marina	Variable	Unidades
Oleaje	<i>Altura de ola significativa (hs)</i>	metros
	<i>Periodo medio (tm02)</i>	segundos
	<i>Periodo de pico (tp)</i>	segundos
	<i>Dirección media del oleaje (dir)</i>	grados
Nivel del mar	<i>Nivel del mar compuesto (nivel)</i>	metros
	<i>Marea astronómica (marea)</i>	metros

Tabla 2. Variables almacenadas en los ficheros de texto

Después del cabecero se facilitan los datos dispuestos en filas y columnas. Cada fila corresponde a un instante (es decir, a cada hora) mientras que las columnas aportan el valor de cada una de las variables (Figura 6).

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

```

=====
DATOS DE PUNTO DE LAS DINÁMICAS MARINAS DE OLEAJE Y NIVEL DEL MAR
=====

Esta base de datos se ha desarrollado en el marco del proyecto:
"Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar"
Financiado por:
Centro y Red de Tecnología del Clima, CTCN
Desarrollado por:
Instituto de Hidráulica Ambiental, IHCantabria

LISTADO DE PARAMETROS
-----
254208 valores de:

Fecha: UTC [año mes día hora]
hs: altura de ola significativa (metros)
tm02: periodo medio (segundos)
tp: periodo de pico (segundos)
dir: dirección media del oleaje (grados sexagesimales, desde el Norte, sentido horario)
nivel: sobreelevación del nivel del mar por marea astronómica y meteorológica (metros)
marea: sobreelevación del nivel del mar por marea astronómica (metros)
* Convención de direcciones: Las direcciones indican de dónde viene el flujo

COORDENADAS
-----
Lon=82.3653 °O
Lat=9.44864 °N
Profundidad=12.49 m

yyyy mm dd hh hs tm02 tp dir nivel marea
1993 1 1 0 1.089 6.372 7.358 29.772 -0.021 0.002
1993 1 1 1 1.074 6.349 7.358 29.868 -0.047 -0.015
1993 1 1 2 1.058 6.326 7.358 30.005 -0.064 -0.041
1993 1 1 3 1.042 6.301 7.358 30.192 -0.103 -0.07
1993 1 1 4 1.025 6.275 7.358 30.436 -0.111 -0.09
1993 1 1 5 1.007 6.247 7.358 30.741 -0.126 -0.095
1993 1 1 6 0.989 6.217 7.358 31.106 -0.099 -0.08
1993 1 1 7 0.97 6.186 7.358 31.518 -0.076 -0.048
1993 1 1 8 0.952 6.155 7.358 31.959 -0.026 -0.004
1993 1 1 9 0.934 6.127 7.358 32.406 0.014 0.043
1993 1 1 10 0.917 6.101 7.358 32.843 0.063 0.087
1993 1 1 11 0.901 6.078 7.358 33.257 0.091 0.122
1993 1 1 12 0.887 6.055 7.358 33.639 0.114 0.14
1993 1 1 13 0.874 6.025 7.358 33.975 0.113 0.139
1993 1 1 14 0.864 5.984 7.358 34.256 0.091 0.118
1993 1 1 15 0.855 5.936 7.358 34.489 0.059 0.083

```

Figura 6. Visualización de parte del contenido de un fichero de texto, en el que se observa tanto el cabecero como la disposición de los datos en filas y columnas.

4.2.1.4 Calidad del dato

Este producto corresponde con los datos de oleaje y nivel del mar obtenidos mediante modelado numérico en puntos concretos a lo largo de la costa. De hecho, el punto de partida para generarlos es el producto de nivel 1 de postprocesamiento descrito en el apartado 4.1. Por tanto, la calidad del dato es la misma que la descrita en la sección 4.1.1.4 de este documento.

Es importante destacar que el espaciamiento entre los puntos costeros no es constante, ya que se parte de una malla irregular. Tal y como se observa en la Figura 5, no se han seleccionado puntos en el interior de los estuarios ni en los archipiélagos de San Blas o Bocas del Toro. Esto se debe a que estas zonas presentan multitud de islas y características batimétricas que no se han tenido en cuenta en el modelado a nivel nacional y, por tanto, no se puede asegurar la calidad del dato en estas zonas tan complejas. La obtención de datos fiables tanto de oleaje como de nivel del mar en estas zonas requeriría de un estudio más detallado a nivel local.

Por último, en algunas zonas los puntos seleccionados se alejan de la costa, tal y como sucede frente a la costa de la provincia de Panamá. Esto se debe a que son zonas muy someras donde la plataforma

continental es muy ancha, por lo que es necesario alejarse de costa para seleccionar puntos cuya profundidad oscile entre 10-20 m.

4.2.2 Nivel de Agua Total (NAT)

4.2.2.1 Descripción

Para estudiar la inundación costera se trabaja con un índice del Nivel de Agua Total (NAT o TWL de sus siglas en inglés, Total Water Level), que hace referencia al nivel que alcanza el agua en la costa bajo determinadas situaciones de ascenso de nivel del mar y/o condiciones extremas de oleaje y nivel del mar. Por ello, se distinguen dos tipos de NAT:

- NAT Permanente: es el nivel de agua debido a la acción combinada de las mareas y del ascenso del nivel medio del mar. Provoca una inundación “permanente” de terrenos.
- NAT Extremos: hace referencia al nivel de agua alcanzado bajo eventos extremos de las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar. Provoca una inundación temporal, ya que tras el paso del temporal el agua vuelve a su nivel inicial.

En este proyecto se han considerado 52 situaciones diferentes de NAT, 13 correspondientes al NAT permanente y 39 al NAT asociado a eventos extremos. Estos casos combinan el NAT para distintos escenarios climáticos, bloques de confianza y percentiles de aumento en el nivel del mar (Figura 7).

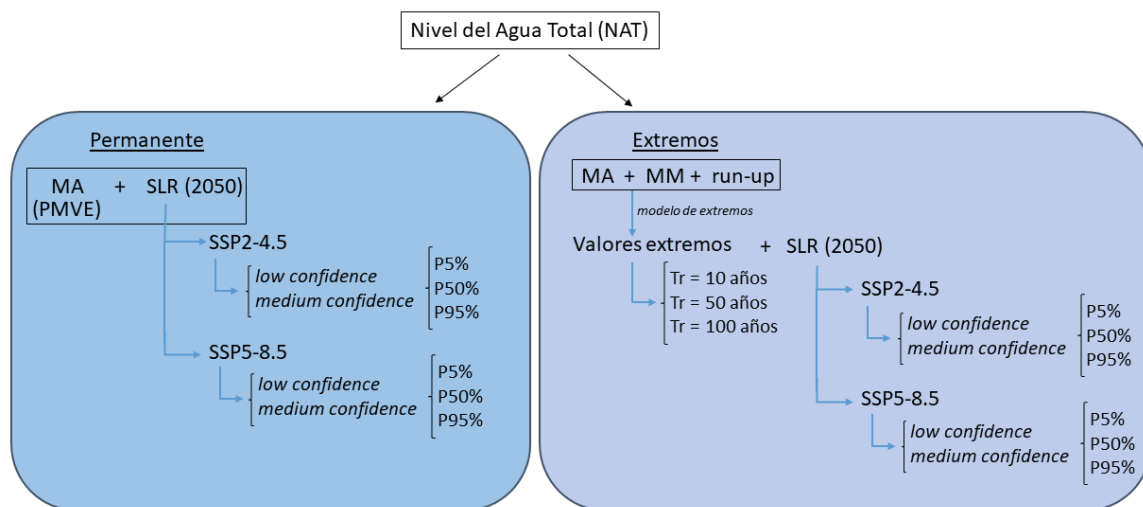


Figura 7. Esquema de los distintos casos de Nivel de Agua Total analizados, que se consideran potenciales de causar inundación costera.

4.2.2.2 Flujo del proceso (Linaje)

Los pasos seguidos para generar este producto son:

1. A partir de las series temporales de las distintas variables de oleaje y nivel del mar en los 1454 puntos costeros, se calcula el índice de Nivel de Agua Total. La formulación utilizada para su cálculo se describe en detalle en el entregable 3.3 de este proyecto.
2. A fin de obtener los valores extremos asociados a los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, se aplica un análisis estadístico de valores extremos a las series temporales de NAT_{extremos}. Para

ello, se seleccionan los máximos anuales de la serie temporal y se hace un ajuste a una función generalizada de extremos tipo Gumbel.

3. Por último, para estimar el Nivel de Agua Total en el año horizonte 2050, al índice ya calculado se le suma los valores de las proyecciones de aumento en el nivel medio del mar.

4.2.2.3 Formato y organización

El formato en el que se entregan estos resultados es en Base de Datos Geoespacial (File Geodatabase .gdb), donde cada índice es representado en capas vectoriales, de entidad geométrica puntual, correspondientes a los distintos casos analizados (es decir, cada escenario, bloque de confianza y percentil). Por tanto, se ha generado una única base de datos geoespacial, denominada NAT.gdb, que contiene dos dataset de entidad: Permanente y Extremos (Figura 8). En cada uno de ellos, hay una serie de capas correspondientes a los distintos casos de NAT analizados, mostrados en la Figura 7. La nomenclatura de estas capas es la siguiente:

NAT_permanente_horizonte_escenario_Confianza_percentil,

NAT_extremos_horizonte_escenario_Confianza_PeriodoRetorno_percentil,

Donde horizonte puede ser “histórico”, para el clima presente (o periodo 1993-2021) o “2050” para el año horizonte futuro 2050. El escenario es ssp245 o ssp585, para los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente. La confianza puede ser media o baja (“med” o “low”, respectivamente) y el percentil puede ser el 5, el 50 o el 95% (p5, p50 o p95, respectivamente). Por último, para el NAT asociado a eventos extremos, también se indica el valor extremo (periodo de retorno) al que corresponde, que puede ser 10, 50 o 100 años (Tr10, Tr50 o Tr100, respectivamente).

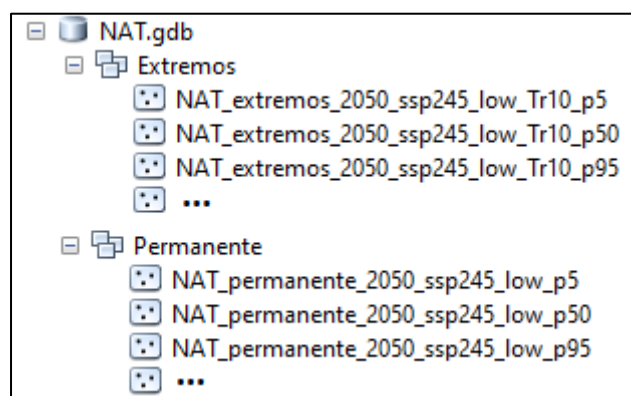


Figura 8. Esquema del contenido de la geodatabase de NAT.

Se han definido una serie de metadatos tanto a nivel de geodatabase como a nivel de capa. Estos han sido creados de acuerdo a la segunda versión del Perfil Latinoamericano de Metadatos (LAMP) que, a su vez se basa en la norma ISO 19115-1:2014. Contienen información sobre la descripción, etiquetas, resumen de la capa, personas de contacto, extensión de la capa, linaje, calidad del dato, etc.

4.2.2.4 Calidad del dato

El índice de Nivel de Agua Total se calcula a partir de los datos de oleaje y nivel del mar generados mediante modelado numérico y cuya calidad ya se ha descrito en el apartado 4.1.4 de este documento.

Sin embargo, la calidad de este índice también va a depender del método empleado para calcular la contribución de oleaje. En este sentido, lo más preciso es determinar la contribución del mismo mediante simulación hidrodinámica en vez de con formulaciones empíricas. Para ello, se podría utilizar el modelo hidrodinámico XBeach ejecutado en perfiles utilizando, como datos de entrada, la base de datos de oleaje cerca de costa. Este modelo permite obtener la sobreelevación del oleaje por rotura con mucha precisión. Sin embargo, no es viable aplicar este modelo a una escala nacional, por lo que se suele recurrir a formulaciones empíricas.

Este proyecto ha utilizado la formulación más común dentro de la comunidad científica y que supone el estado del arte en el cálculo de la contribución del oleaje al Nivel de Agua Total. Dicha formulación se describe en detalle en el Entregable 3.3 del proyecto. En concreto, la contribución del oleaje se ha tenido en cuenta mediante el cálculo del run-up (que incluye la contribución del set-up y del swash), a pesar de que habitualmente sólo se utiliza la componente del set-up. Esta decisión se tomó con el objetivo de considerar la formulación más conservadora (es decir, que daba valores más altos de Nivel de Agua Total) a la hora de aplicar el modelo de inundación, dada la falta de precisión decimal del Modelo Digital del Terreno.

Por otro lado, la formulación del set-up del oleaje requiere de información sobre la pendiente intermareal en la costa. Este dato se desconoce y no es viable estimarlo a nivel nacional con la información de la que se dispone. Por este motivo, se ha recurrido a aproximaciones para estimar este valor. La aproximación utilizada, procedente de un artículo publicado en una revista de alto impacto, ha sido ampliamente utilizada en diversos estudios internacionales a grandes escalas donde es inabordable el cálculo de la pendiente intermareal. Más información sobre la misma se encuentra en el Entregable 3.3 del proyecto.

Por estos motivos, la calidad del Índice de Nivel de Agua Total calculado puede mejorar en estudios posteriores si (1) se aplican modelos hidrodinámicos para el cálculo de la contribución del oleaje o si (2) se tiene información sobre la pendiente intermareal y se aplica la formulación del set-up en vez del run-up.

Además, se dispone de información sobre este índice cada ~2 km a lo largo de la costa. Mejorar la resolución espacial también proporcionaría datos del NAT más precisos.

Respecto a los datos de las proyecciones climáticas de aumento en el nivel medio del mar, la base de datos utilizada en el IPCC-AR6 es una recopilación de los estudios más recientes y punteros llevados a cabo por las instituciones internacionales de referencia. Por tanto, consideramos que es la base de datos de proyecciones de aumento del nivel del mar de mejor calidad disponible en estos momentos. Para más información sobre la misma se recomienda leer el capítulo 9 del Sexto informe del IPCC. Sin embargo, para analizar el Nivel de Agua Total en un horizonte futuro, se debería de tener en cuenta no sólo las proyecciones de aumento en el nivel medio del mar, sino también las de oleaje y marea meteorológica.

4.2.3 Climatologías

4.2.3.1 Descripción

A fin de analizar las variaciones espaciales en las condiciones medias y de temporal de las dinámicas marinas en las costas panameñas, se han calculado una serie de estadísticos (o climatologías) de las distintas variables de oleaje y nivel del mar en los 1454 puntos costeros.

4.2.3.2 Flujo del proceso

Los pasos seguidos para generar este producto son:

1. A partir de las series temporales de las distintas variables de oleaje y nivel del mar en los puntos costeros, se calcula el valor de ciertos estadísticos. En concreto, se calcula el valor medio y el valor del percentil del 99% de toda la serie temporal (1993-2021) para las distintas variables, como representativos de las condiciones medias y de temporal, respectivamente.

4.2.3.3 Formato y organización

Estos datos se almacenan en una Base de Datos Geoespacial, llamada Climatologías.gdb. Dentro de esta geodatabase hay distintas capas en formato vectorial tipo punto, correspondientes a cada una de las climatologías consideradas. La Tabla 3 resume los estadísticos calculados para cada una de las variables.

Dinámica marina	Variable	Estadísticos
Oleaje	<i>Altura de ola significativa (Hs)</i>	Valor medio, percentil del 99%
	<i>Periodo medio (tm02)</i>	Valor medio, percentil del 99%
	<i>Periodo de pico (Tp)</i>	Valor medio, percentil del 99%
	<i>Dirección media del oleaje (Dir)</i>	Valor medio
Nivel del mar	<i>Nivel del mar compuesto (NMC)</i>	Percentil del 99%
	<i>Marea astronómica</i>	Rango de marea

Tabla 3. Estadísticos calculados para cada una de las variables en los puntos costeros

Análogamente al resto de productos, cada una de las capas de esta geodatabase contiene una serie de metadatos creados de acuerdo a la segunda versión del Perfil Latinoamericano de Metadatos (LAMP) que, a su vez se basa en la norma ISO 19115-1:2014.

Además, para facilitar su visualización, se han generado ficheros *.kmz con estos datos. Estos se pueden abrir con el software libre de Google Earth y permiten obtener información de forma rápida y sencilla. Se ha creado un kmz para cada una de las capas, que se muestran en la Figura 9.

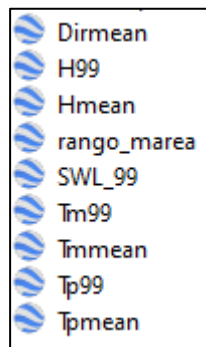


Figura 9. Capas de Google Earth correspondientes a las climatologías en los puntos costeros

4.2.3.4 *Calidad del dato*

Este producto se ha generado a partir de los datos de oleaje y nivel del mar obtenidos mediante modelado numérico. Por tanto, la calidad de los mismos ha sido descrita en el apartado 4.1.4 de este documento.

4.3 Nivel 3: Resultados de inundación costera

4.3.1 Descripción

Este producto corresponde con los resultados de inundación costera, una vez aplicado el modelo de inundación utilizando los datos de Nivel de Agua Total en los puntos costeros y el Modelo Digital del Terreno (MDT o DEM, de sus siglas en inglés) como datos de entrada. El modelo utilizado para obtener las manchas de inundación a nivel nacional es el método de la bañera (o *bathtub*), que es un método muy sencillo basado en herramientas de SIG. Una descripción detallada del modelo utilizado se encuentra en el entregable 3.3 del proyecto. Se ha analizado el alcance de la inundación para los 52 casos de NAT considerados, por lo que se han obtenido 52 mapas de inundación diferentes.

Para cada caso analizado, se obtienen dos tipos de resultados: (i) la extensión de la inundación en tierra con su correspondiente calado, y (ii) el polígono que delimita la línea de costa (o el límite en tierra hasta donde llega el agua).

4.3.2 Flujo del proceso (Linaje)

Los pasos seguidos para generar este producto son:

1. Se utilizan los valores de NAT en los puntos costeros y un Modelo Digital del Terreno (DEM) como datos de entrada.
2. Se aplica el método de la bañera para obtener las manchas de inundación para cada escenario analizado. Requiere utilizar un software de Sistemas de Información Geográfica, como el ArcGIS o el QGIS.
3. El calado de la inundación (o altura de la lámina de agua) (en metros) de los píxeles inundados se obtiene de restar el valor del Nivel de Agua Total interpolado en tierra menos el valor de elevación del MDT en ese píxel.

4.3.3 Formato y organización

Estos datos se almacenan en Bases de Datos Geoespaciales (File Geodatabase .gdb). En concreto, se han definido dos GDBs, una para los resultados de inundación permanente y otra para los de inundación por eventos extremos (InundacionPermanente.gdb y InundacionExtremos.gdb, respectivamente). Dentro de cada una de estas GDBs, hay dos tipos de productos por cada caso de NAT analizado. Es decir, se han obtenido dos productos para cada uno de los 52 casos considerados: la extensión de la inundación con su calado correspondiente y la línea de costa (Figura 10). La información sobre la extensión de la inundación y su calado se almacena en raster datasets, mientras que la información sobre la línea de costa se almacena en una capa vectorial con entidad geométrica de polígono.

La nomenclatura de estas capas es la siguiente:

Producto_causa_horizonte_escenario_Confianza_PeriodoRetorno_percentil.

Donde Producto hace referencia al tipo de resultado, que puede ser la extensión de la inundación (“Inundacion”) o el polígono de la línea de costa (“LC”). La causa se refiere al tipo de inundación, ya sea permanente o de extremos. El horizonte puede ser “histórico” (para el clima presente) o 2050, para las proyecciones futuras. El escenario hace referencia al escenario de cambio climático SSP2-4.5 o SSP5-8.5, mientras que la confianza se refiere al grado de incertidumbre de los datos de las proyecciones (media, "med", o baja, “low”). El percentil puede ser el del 5% (p5), el del 50% (p50) o el del 95% (p95). Por último, para los casos de inundación por eventos extremos, “PeriodoRetorno” se refiere al valor extremo (periodo de retorno asociado) al que corresponde, que puede ser 10, 50 o 100 años (Tr10, Tr50 o Tr100, respectivamente).

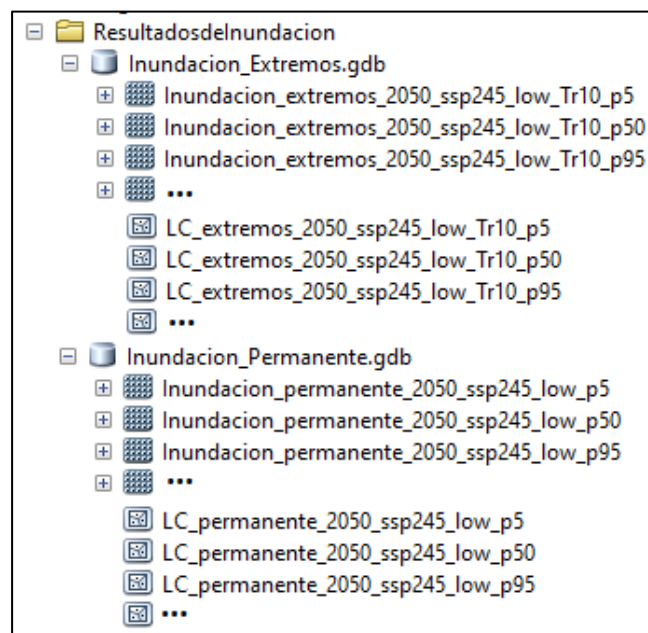


Figura 10. Esquema del contenido de las geodatabases con los resultados de inundación costera.

Análogamente al resto de productos, cada una de las capas de estas geodatabases contienen una serie de metadatos creados de acuerdo a la segunda versión del Perfil Latinoamericano de Metadatos (LAMP) que, a su vez se basa en la norma ISO 19115-1:2014.

4.3.4 Calidad del dato

La calidad de los resultados obtenidos de inundación costera depende, principalmente, de dos factores: (1) la calidad de los datos de partida y (2) el modelo de inundación empleado.

Como **datos de partida** se utilizan dos fuentes de datos:

- El valor del índice de Nivel de Agua Total en puntos a lo largo de la costa: la calidad de estos datos ha sido descrita en el apartado 4.2.2.4 de este documento.
- El Modelo Digital del Terreno (MDT o DEM, de sus siglas en inglés): la calidad de estos datos depende, principalmente, de la resolución espacial que tenga. El MDT utilizado en este proyecto tiene una resolución espacial alta, de 5 m. Sin embargo, los valores de elevación

carecen de precisión decimal (es decir, sólo son valores enteros). Esto supone una gran limitación a la hora de utilizarlo en modelos de inundación.

Por otro lado, el **modelo de inundación** empleado en este proyecto es el método de la bañera (BTM o *bathtub*). El uso de este modelo es muy común en estudios a grandes escalas, como una escala nacional, dada su sencillez y rapidez de cómputo. Sin embargo, son bien conocidas las limitaciones de este método, ya que calcula la extensión de la inundación a través de la interpolación del MDT y no mediante modelado de procesos. Entre otras limitaciones de este método, cabe destacar que no tiene en cuenta ni la rugosidad de la superficie ni la pendiente de la costa. Como consecuencia de ello, este método sobreestima la inundación.

Por ello, la calidad de estos datos puede mejorar en un futuro si:

- Se parte de datos de NAT a mayor resolución espacial y de mejor calidad: esto se consigue si se determina la contribución del oleaje mediante simulación numérica en vez de con formulaciones empíricas.
- Se parte de un MDT con valores de elevación más precisos (es decir, con valores decimales).
- Se aplica un modelo de inundación más sofisticado, como por ejemplo el modelo hidráulico bidimensional RFSM-EDA.
- Para analizar la inundación en un horizonte futuro, se debería de tener en cuenta no sólo las proyecciones de aumento en el nivel medio del mar, sino también las de oleaje y marea meteorológica.

4.4 Nivel 4: Región marina

Con el objetivo de caracterizar las condiciones de las dinámicas marinas en una región más extensa en torno a las costas de Panamá, se ha definido un área rectangular que abarca la región marino-costera de ambas costas. Esto permite caracterizar los patrones espaciales, así como los rangos de variación de las dinámicas marinas. En este dominio marino se representan los valores medios y los del percentil del 99%, como representativos de las condiciones medias y de temporal en el área marina próxima a Panamá. La Figura 11 muestra el área rectangular definida a una resolución de $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ (cuadrados azules). Los puntos negros representan los nodos de las mallas numéricas donde se dispone de los resultados de las salidas de los modelos numéricos.

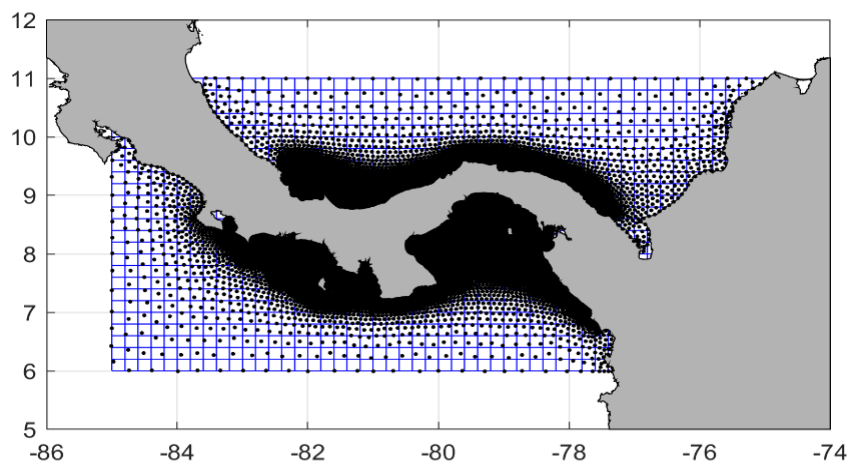


Figura 11. Área rectangular definida a resolución $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ para caracterizar la dinámica marina próxima a Panamá.

En este dominio rectangular se han creado dos tipos de productos: (1) imágenes ráster con las principales climatologías de oleaje y nivel del mar y (2) imágenes ráster con los valores de las proyecciones de aumento del nivel del mar. A continuación, se describe cada uno de estos subproductos.

4.4.1 Climatologías

4.4.1.1 Descripción

Se ha calculado el valor de ciertos estadísticos de las distintas variables de oleaje y nivel del mar en la zona marino-costera próxima a Panamá, a fin de caracterizar las condiciones medias y de temporal en esta área. A diferencia de las climatologías calculadas en los puntos costeros, en este caso se pueden observar más fácilmente patrones espaciales y permite tener una idea más conjunta de cómo varían las condiciones de oleaje y nivel del mar en la zona de estudio.

4.4.1.2 Flujo del proceso (Linaje)

Los pasos seguidos para generar este producto son:

1. Se ha definido un dominio rectangular que abarca toda la región marina de ambas costas panameñas a resolución de $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$.

2. En cada punto de este dominio, se han interpolado las series temporales de las distintas variables de oleaje y nivel del mar, obtenidas de las salidas de los modelos numéricos. Por tanto, se ha interpolado hora a hora la serie temporal de 29 años a fin de reconstruirla en cada nodo del dominio rectangular (es decir, en cada cuadrado azul de la Figura 11).
3. Para cada variable, se ha calculado el valor medio y el percentil del 99% de toda la serie temporal (1993-2021) en cada uno de los puntos del dominio.

4.4.1.3 Formato y organización

Estos datos se almacenan en una Base de Datos Geoespacial, llamada Climatologias.gdb. Dentro de esta geodatabase hay 9 capas en formato ráster, correspondientes a cada una de las climatologías calculadas (Figura 12). La Tabla 4 resume los estadísticos calculados para cada una de las variables.

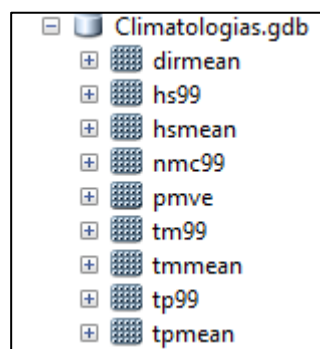


Figura 12. Esquema del contenido de la geodatabase de climatologías en la región marina.

Dinámica marina	Variable	Estadísticos
Oleaje	Altura de ola significativa (Hs)	Valor medio, percentil del 99%
	Periodo medio (tm02)	Valor medio, percentil del 99%
	Periodo de pico (Tp)	Valor medio, percentil del 99%
	Dirección media del oleaje (Dir)	Valor medio
Nivel del mar	Nivel del mar compuesto (NMC)	percentil del 99%
	Marea astronómica	Pleamar máxima viva equinoccial (PMVE)

Tabla 4. Climatologías calculadas en la región marina

Análogamente al resto de productos, cada una de las capas de esta geodatabase contiene una serie de metadatos creados de acuerdo a la segunda versión del Perfil Latinoamericano de Metadatos (LAMP) que, a su vez se basa en la norma ISO 19115-1:2014.

4.4.1.4 Calidad del dato

Este producto se ha generado a partir de los datos de oleaje y nivel del mar obtenidos mediante modelado numérico. Por tanto, la calidad de los mismos ha sido descrita en el apartado 4.1.4 de este documento.

4.4.2 Aumento en el Nivel Medio del Mar (ANMM)

4.4.2.1 Descripción

Se representan los valores de las proyecciones de aumento en el nivel medio del mar en el dominio marino-costero definido en torno a Panamá. Esto se realiza para los dos escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), los dos bloques de confianza (media y baja) y los tres percentiles (del 5%, 50% y 95%) considerados en este proyecto. Este producto permite visualizar los patrones espaciales y los rangos de variación de las proyecciones climáticas del nivel del mar en la zona de estudio.

4.4.2.2 Flujo del proceso (Linaje)

Los pasos seguidos para generar este producto son:

1. Se ha definido un dominio rectangular que abarca toda la región marina de ambas costas panameñas a resolución de $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$.
2. En cada punto de este dominio, se han interpolado los valores de las proyecciones de aumento en el nivel medio del mar utilizadas en el Sexto Informe del IPCC (AR6). La resolución de esta base de datos es de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

4.4.2.3 Formato y organización

Estos datos se almacenan en una Base de Datos Geoespacial, llamada ANMM.gdb. Dentro de esta geodatabase hay 12 capas en formato ráster, correspondientes a cada uno de los escenarios/bloques de confianza/percentiles considerados (Figura 13).

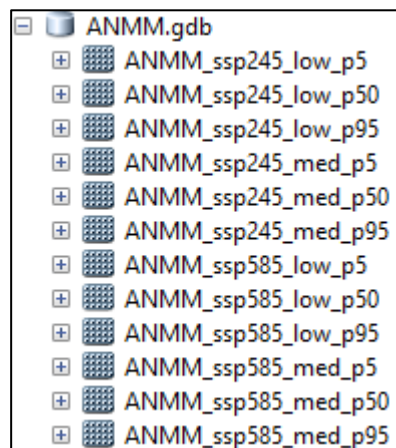


Figura 13. Esquema del contenido de la geodatabase de climatologías en la región marina.

Análogamente al resto de productos, cada una de las capas de esta geodatabase contiene una serie de metadatos creados de acuerdo a la segunda versión del Perfil Latinoamericano de Metadatos (LAMP) que, a su vez se basa en la norma ISO 19115-1:2014.

4.4.2.4 Calidad del dato

La base de datos de proyecciones futuras de aumento del nivel del mar utilizada en el IPCC-AR6 es una recopilación de los estudios más recientes y punteros llevados a cabo por las instituciones internacionales de referencia. Por tanto, consideramos que es la base de datos de proyecciones de

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

aumento del nivel del mar de mejor calidad disponible en estos momentos. Para más información sobre la misma se recomienda leer el capítulo 9 del Sexto informe del IPCC.