

**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 4.1

“GUÍA PARA USUARIOS 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 4.1. “Guía para usuarios 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	7
<u>4.1.3</u> Formato y organización.....	7
<u>4.1.4</u> Aplicaciones.....	9
4.2 Nivel 2: Puntos costeros.....	10
<u>4.2.1</u> Series temporales.....	10
<u>4.2.1.1</u> Descripción	10
<u>4.2.1.2</u> Flujo del proceso	10
<u>4.2.1.3</u> Formato y organización.....	11
<u>4.2.1.4</u> Aplicaciones.....	12
<u>4.2.2</u> Nivel de Agua Total (NAT)	13
<u>4.2.2.1</u> Descripción	13
<u>4.2.2.2</u> Flujo del proceso	14
<u>4.2.2.3</u> Aplicaciones.....	14
<u>4.2.3</u> Climatologías	15
<u>4.2.3.1</u> Descripción	15
<u>4.2.3.2</u> Flujo del proceso	15
<u>4.2.3.3</u> Formato y organización.....	15

4.2.3.4	Aplicaciones.....	16
4.3	Nivel 3: Resultados de inundación costera	17
<u>4.3.1</u>	Descripción	17
<u>4.3.2</u>	Flujo del proceso	17
<u>4.3.3</u>	Aplicaciones.....	17
4.4	Nivel 4: Región marina	19
<u>4.4.1</u>	Climatologías	19
4.4.1.1	Descripción	19
4.4.1.2	Flujo del proceso	20
4.4.1.3	Aplicaciones.....	20
<u>4.4.2</u>	Aumento en el Nivel Medio del Mar (ANMM)	20
4.4.2.1	Descripción	20
4.4.2.2	Flujo del proceso	20
4.4.2.3	Aplicaciones.....	21

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. Esquema de modelado de alta resolución. Los círculos indican los nodos de la malla de alta resolución y los puntos negros las localizaciones donde se tiene información procedente de una base de datos más grosera que se utiliza como condiciones de contorno (correspondería con la base de datos creada en el marco de este proyecto a nivel nacional).	9
Figura 5. Puntos objetivo seleccionados a lo largo del litoral panameño con la paleta de colores indicando la profundidad en los mismos.	10
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.	12
Figura 7. Ejemplos de caracterización de las condiciones de oleaje en un punto concreto: (izquierda) boxplot representando la variabilidad intra-anual de la altura de ola significativa y (derecha) ajuste de los máximos anuales de la altura de ola significativa a una función generalizada de extremos, donde las bandas de confianza del 90% se representan con una franja gris.	13
Figura 8. Esquema de los distintos casos de Nivel de Agua Total analizados, que se consideran potenciales de causar inundación costera.	14
Figura 10. Variabilidad espacial del Nivel de Agua Total entre 1993-2021 asociado a los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años a lo largo de la costa de Panamá.	14
Figura 11. Capas de Google Earth correspondientes a las climatologías en los puntos costeros.	16
Figura 12. Patrones espaciales y rangos de variación de las condiciones de temporal (es decir, del percentil del 99%) de la altura de ola significativa a lo largo del litoral panameño.	16
Figura 14. Análisis de riesgos y adaptación en un tramo de la costa pacífico panameña.	18
Figura 15. Área rectangular definida a resolución 0.2°x0.2° para caracterizar la dinámica marina próxima a Panamá.	19
Figura 18. Valores de Aumento en el Nivel Medio del Mar (en metros) en el horizonte 2050 en la región marina próxima a Panamá, para el escenario SSP2-4.5, confianza media y percentil del 50%.	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables almacenadas en los archivos NetCDF	8
Tabla 2. Variables almacenadas en los ficheros de texto.....	11
Tabla 3. Variables almacenadas en los ficheros de texto.....	15
Tabla 4. Climatologías calculadas en la región marina.....	20

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 4.1, la guía para el manejo de los datos por parte de los usuarios interesados. Pretende guiar al usuario para la utilización 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 contenido, como el flujo del proceso para generar los distintos productos sobre las dinámicas marinas en la costa panameña y sus principales aplicaciones.

Los datos que se ofrecen contienen información sobre las principales variables de oleaje y nivel del mar y las proyecciones climáticas del nivel medio del mar en la región marino-costera de Panamá, así como el índice de Nivel de Agua Total a lo largo de la costa y 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 baja resolución 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, el formato y organización de los mismos, así como sus principales aplicaciones en estudios relacionados con el clima marino, cambio climático y gestión costera.

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.

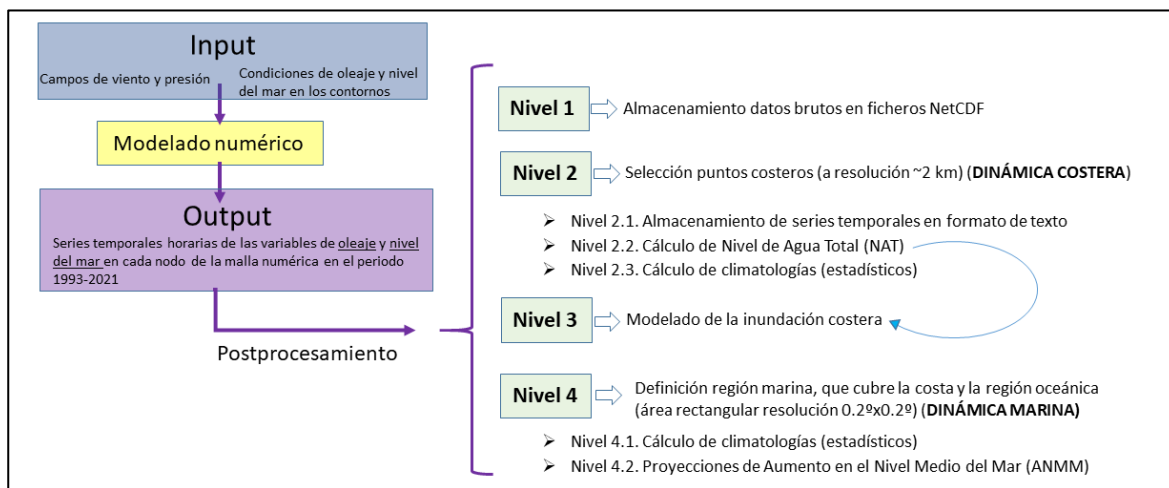


Figura 1. Esquema sobre los productos generados en el marco del presente proyecto.

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

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.

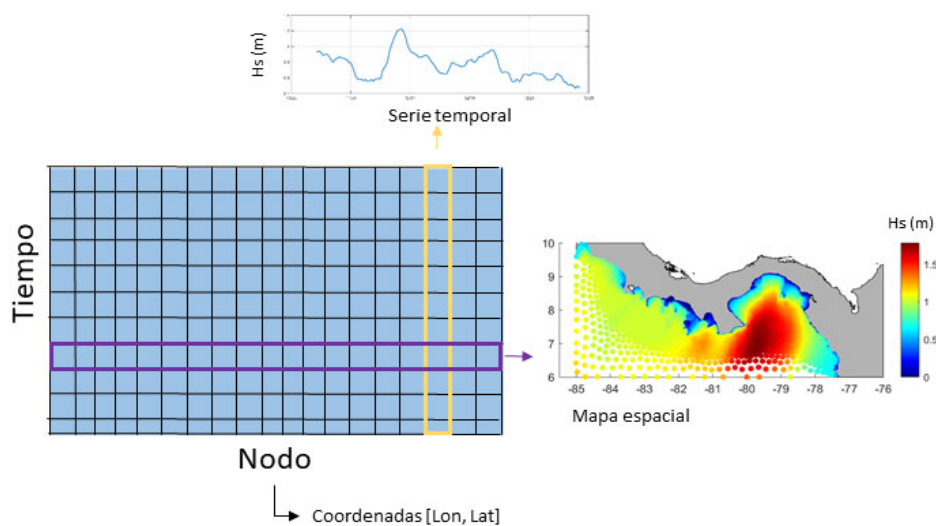


Figura 2. Estructura de las variables contenidas en los NetCDF.

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.

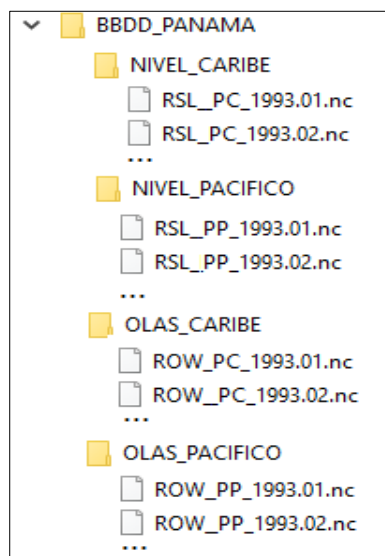


Figura 3. Organización de los datos espacio-temporales en formato NetCDF

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 Aplicaciones

Este producto está dirigido a usuarios expertos con un alto nivel técnico, que manejen algún lenguaje de programación y/o sepan utilizar modelos numéricos para simular las condiciones de oleaje y nivel del mar.

Entre las principales aplicaciones de los datos espacio-temporales en NetCDF destacan:

- Representación de mapas sinópticos y series temporales en puntos específicos.
- Implementación de los datos en repositorios o protocolos estándar de datos climáticos. Un ejemplo es la plataforma Thredds.
- Como condiciones de contorno en el modelado de alta resolución (regionalización o *downscaling*): ésta es la principal aplicación de estos datos. El estudio realizado en este proyecto es a nivel nacional, alcanzando una resolución espacial de 2 km en costa. Sin embargo, para estudios locales a nivel de playa, estuario, puerto, etc. se requiere una base de datos a más alta resolución. Para ello, se pueden partir de estos datos e introducirlos como condición de contorno en una malla a más alta resolución definida, específicamente, para la zona de estudio.
- Estos datos sirven también como condiciones de contorno en estudios de diseño y mantenimiento de infraestructuras portuarias.
- Como punto de partida para generar sistemas operacionales de alerta temprana, explotación de puertos, acceso al canal, análisis de vertidos accidentales, etc.
- Constituyen datos útiles para evaluar servicios ecosistémicos de protección.

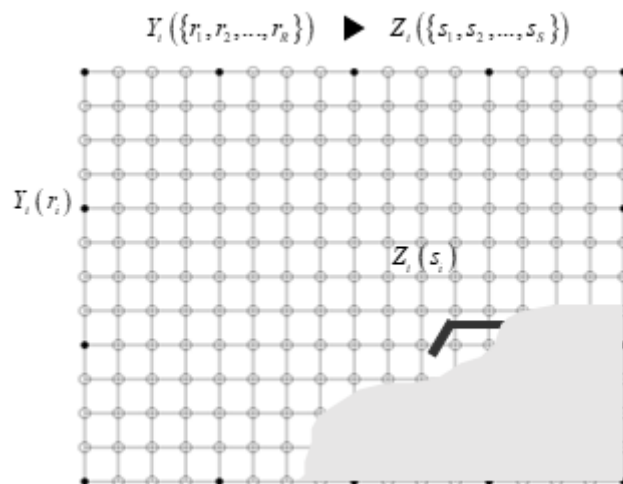


Figura 4. Esquema de modelado de alta resolución. Los círculos indican los nodos de la malla de alta resolución y los puntos negros las localizaciones donde se tiene información procedente de una base de datos más grosera que se utiliza como condiciones de contorno (correspondería con la base de datos creada en el marco de este proyecto a nivel nacional).

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).

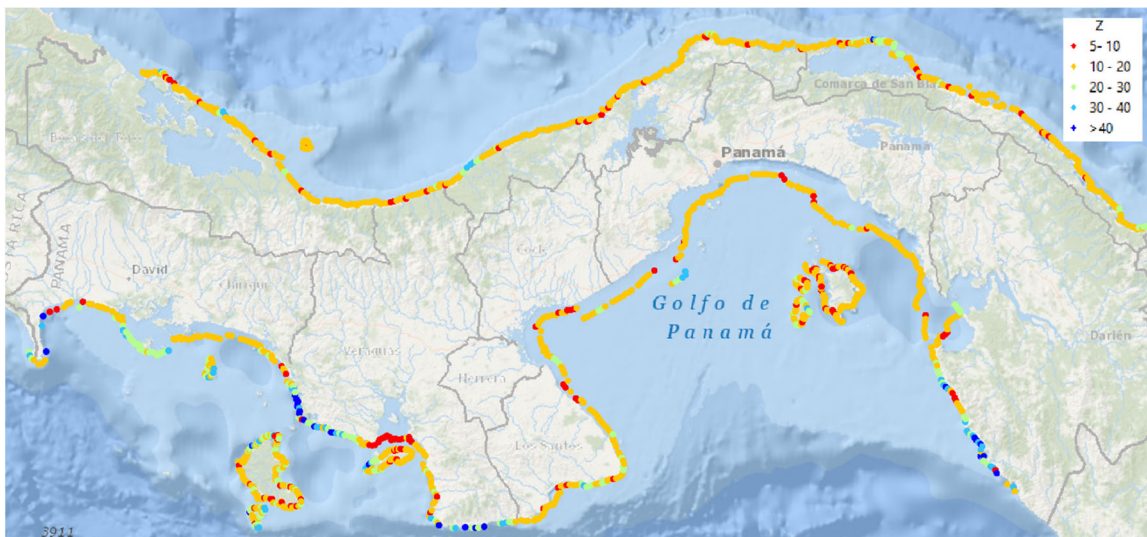


Figura 5. Puntos objetivo seleccionados a lo largo del litoral panameño con la paleta de colores indicando la profundidad en los mismos.

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

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.
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 Aplicaciones

La principal aplicación de este producto es la caracterización de las condiciones de las dinámicas marinas en la zona costera de Panamá. La disposición de una serie temporal de casi 30 años de oleaje y nivel del mar permite analizar las condiciones medias de estas variables, hacer ajuste de extremos para obtener valores asociados a periodos de retorno de hasta 100 años, analizar la variabilidad intra- e interanual, examinar la tendencia, etc. (Figura 7). Este producto está dirigido, principalmente, a usuarios con un nivel técnico intermedio, capaces de aplicar análisis estadísticos, ajustar a distintos tipos de funciones, etc.

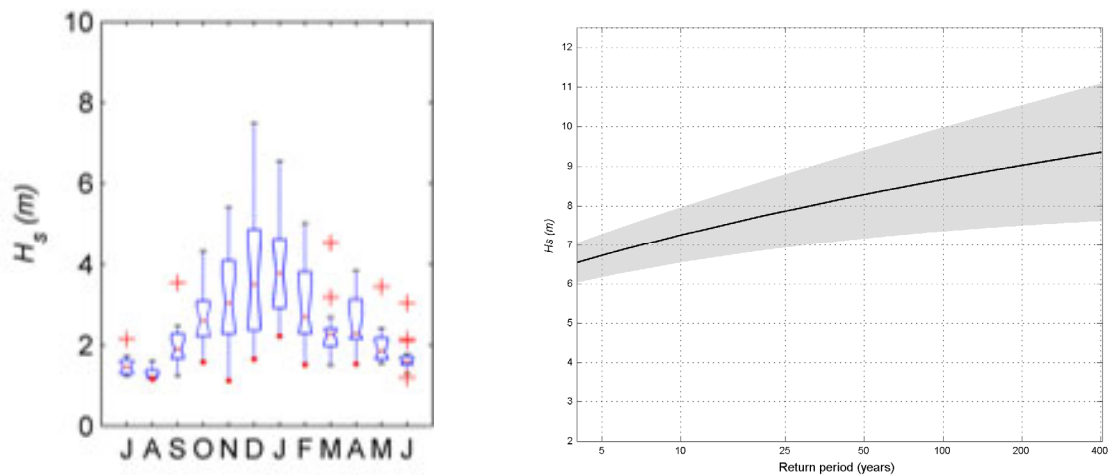


Figura 7. Ejemplos de caracterización de las condiciones de oleaje en un punto concreto: (izquierda) boxplot representando la variabilidad intra-anual de la altura de ola significativa y (derecha) ajuste de los máximos anuales de la altura de ola significativa a una función generalizada de extremos, donde las bandas de confianza del 90% se representan con una franja gris.

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 8). Estos datos se han almacenado en archivos geo-espaciales con formato vectorial tipo punto.

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

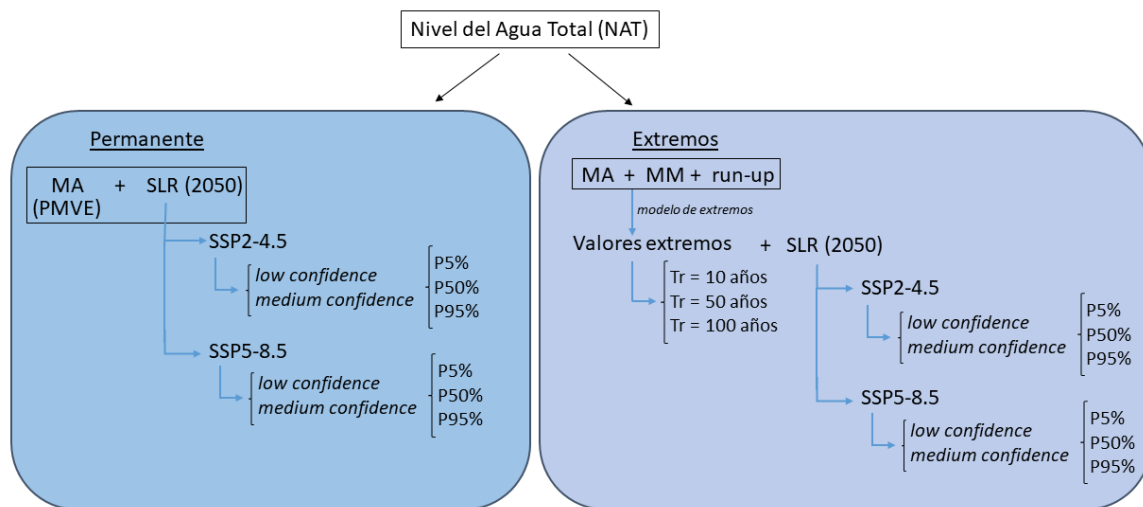


Figura 8. Esquema de los distintos casos de Nivel de Agua Total analizados, que se consideran potenciales de causar inundación costera.

4.2.2.2 Flujo del proceso

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 Aplicaciones

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la principal aplicación de este producto consiste en servir como dato de entrada (input) en los modelos de inundación. Además, permite caracterizar la peligrosidad en la costa (Figura 9).

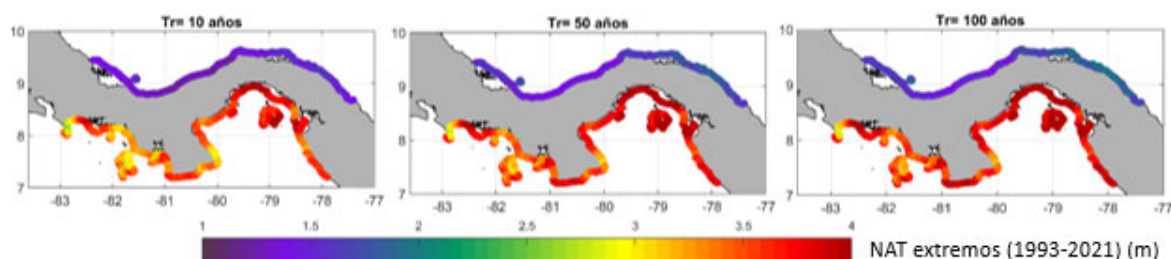


Figura 9. Variabilidad espacial del Nivel de Agua Total entre 1993-2021 asociado a los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años a lo largo de la costa de Panamá.

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. 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

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 han almacenado en archivos geo-espaciales con formato vectorial tipo punto. 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 10.

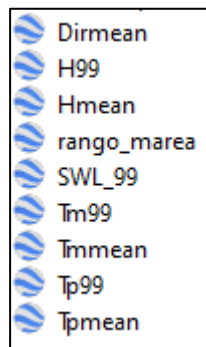


Figura 10. Capas de Google Earth correspondientes a las climatologías en los puntos costeros

4.2.3.4 Aplicaciones

Este producto está pensado para usuarios con un nivel técnico básico, ya que no se requiere de habilidades técnicas de programación ni de análisis estadístico. Este producto permite visualizar, de forma rápida y sencilla, las variaciones en las principales variables de oleaje y nivel del mar a lo largo de la costa. Un ejemplo se muestra en la Figura 11.

Entre sus principales aplicaciones destaca la caracterización de las condiciones medias y de temporal en un punto costero. Esto puede resultar especialmente útil para el desarrollo de informes técnicos.

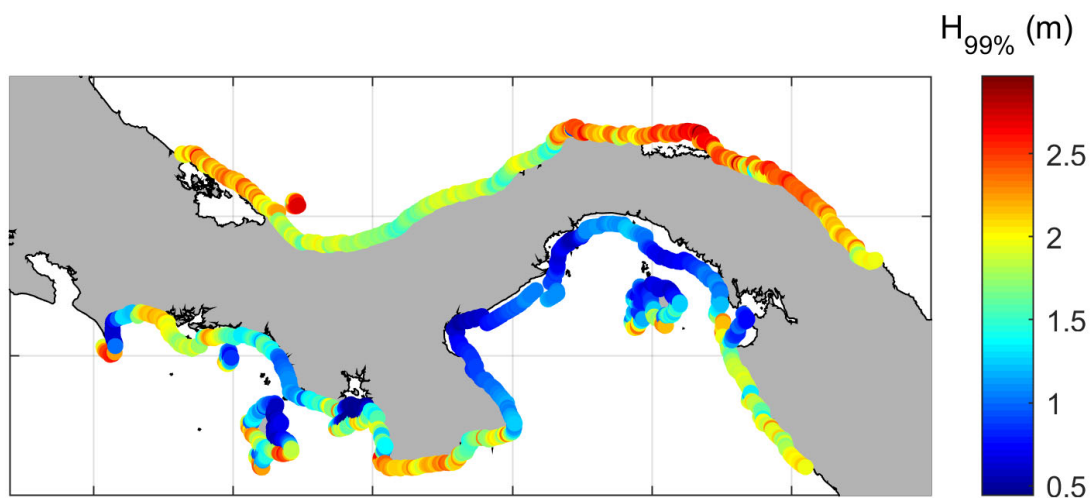


Figura 11. Patrones espaciales y rangos de variación de las condiciones de temporal (es decir, del percentil del 99%) de la altura de ola significativa a lo largo del litoral panameño.

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). La información sobre la extensión de la inundación y su calado se almacena en formato ráster, mientras que la información sobre la línea de costa se almacena en una capa vectorial con entidad geométrica de polígono.

4.3.2 Flujo del proceso

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 Aplicaciones

Disponer de información sobre el alcance de la inundación bajo diferentes escenarios de cambio climático es de especial relevancia a la hora de llevar a cabo análisis de riesgos y vulnerabilidad (Figura 12), de proponer medidas de adaptación o en la toma de decisiones sobre la gestión y ordenación del territorio en las zonas costeras. Además, tienen una aplicación directa para las compañías de seguros.

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

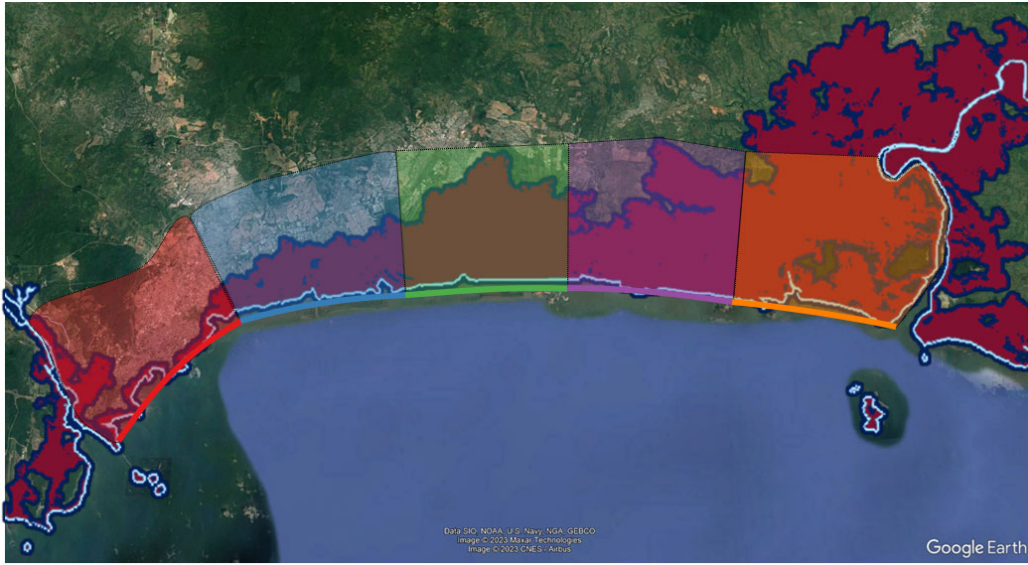


Figura 12. Análisis de riesgos y adaptación en un tramo de la costa pacífico panameña.

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 13 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.

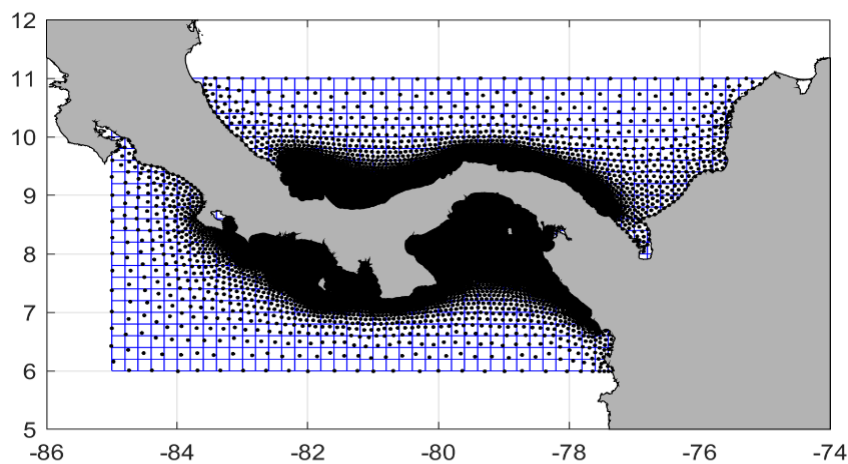


Figura 13. Área rectangular definida a resolución $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ para caracterizar la dinámica marina próxima a Panamá.

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. La Tabla 4 resume los estadísticos calculados para cada una de las variables.

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

4.4.1.2 Flujo del proceso

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°x0.2°.
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 13).
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 Aplicaciones

De forma análoga a las aplicaciones de los datos de climatologías en los puntos costeros, este producto permite caracterizar los patrones espaciales y los rangos de variación de las dinámicas marinas en la zona marino-costera próxima a Panamá. Esta información puede resultar de especial utilidad en el desarrollo de informes técnicos y está orientada a usuarios con nivel técnico básico.

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. Estos datos se almacenan en formato ráster.

4.4.2.2 Flujo del proceso

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°x0.2°.

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 Aplicaciones

Del mismo modo que las climatologías en la región marina, este producto permite caracterizar los patrones espaciales y los rangos de variación de las proyecciones de aumento en el nivel medio del mar del IPCC-AR6 en la zona marino-costera próxima a Panamá (Figura 14). Esta información puede resultar de especial utilidad en el desarrollo de informes técnicos y está orientada a usuarios con nivel técnico básico.

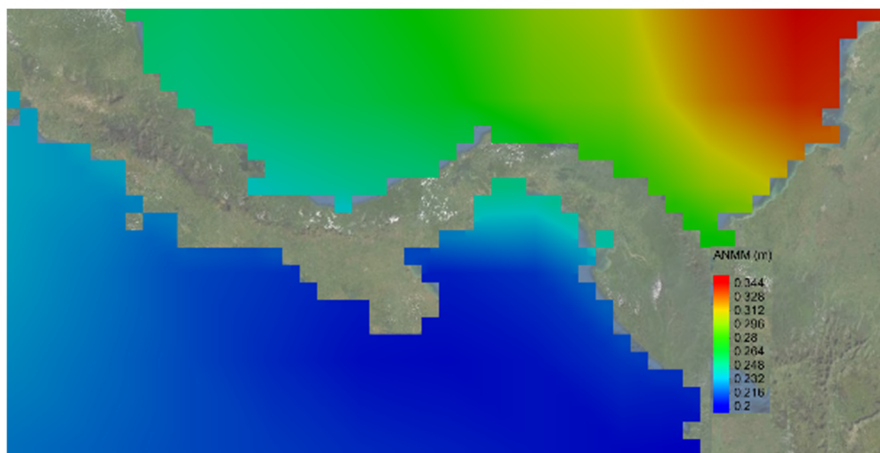


Figura 14. Valores de Aumento en el Nivel Medio del Mar (en metros) en el horizonte 2050 en la región marina próxima a Panamá, para el escenario SSP2-4.5, confianza media y percentil del 50%.