

**DEVELOPMENT OF A MARINE DYNAMICS DATABASE FOR THE
PANAMANIAN COASTS TO ASSESS VULNERABILITY AND CLIMATE
CHANGE IMPACTS TO SEA LEVEL RISE
UN RFP NUMBER: 3100004805**

Entregable 3.3

“EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA LÍNEA DE COSTA EN PANAMÁ”

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

ÍNDICE

ANTECEDENTES	1
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO METODOLÓGICO	2
3 Datos de entrada	4
3.1 Modelo Digital del Terreno (MDT)	4
3.2 Nivel del Agua Total (NAT)	4
<u>3.2.1</u> Puntos objetivo	4
<u>3.2.2</u> Componentes del Nivel del Agua Total	5
<u>3.2.3</u> Cálculo del Nivel del Agua Total	6
<u>3.2.4</u> Casos de Nivel del Agua Total considerados	8
4 MODELO DE INUNDACIÓN	9
5 RESULTADOS	10
5.1 Nivel de Agua Total.....	10
<u>5.1.1</u> NAT permanente	10
<u>5.1.2</u> NAT asociado a eventos extremos	11
5.2 Mapas de Inundación	13
<u>5.2.1</u> Inundación permanente	14
<u>5.2.2</u> Inundación por extremos	17
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
BIBLIOGRAFÍA	25

ANTECEDENTES

En agosto de 2021, Naciones Unidas publicó, a través del Centro y Red de Tecnología del Clima (CTCN, por sus siglas en inglés), 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”. Esta asistencia técnica está siendo desarrollada por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria, España), en colaboración con el Ministerio de Ambiente de Panamá.

El objetivo general de este 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.

Este documento se enmarca dentro del producto 3 “Desarrollo de datos numéricos de las dinámicas marinas a alta resolución” y, específicamente, corresponde a la actividad 3.3, que se basa en el análisis de la “evolución de la línea de costa en Panamá bajo varios escenarios de cambio climático”.

Para llevar a cabo este análisis se va a hacer uso de las bases de datos generadas en el marco de este proyecto y cuyo desarrollo se describe en el entregable 3.2 “Base de datos de dinámicas marinas en Panamá”. Por ello, recomendamos consultar este documento para obtener más información acerca de las características de las bases de datos de oleaje y nivel del mar generadas.

A continuación, se detalla la metodología, los datos utilizados y los resultados obtenidos del análisis de la inundación costera en Panamá. Además, se describen algunas recomendaciones y limitaciones de la metodología aplicada a fin de que pueda resultar de utilidad para futuros estudios similares.

1. INTRODUCCIÓN

La inundación costera es el resultado de la interacción de un conjunto de procesos geológicos e hidrodinámicos, con un cierto grado de interrelación entre ellos, a los que hay que agregar la intervención humana. El clima es un factor determinante en estas interrelaciones y, por tanto, obtener proyecciones fiables sobre la inundación futura es una de las bases esenciales para planificar la adaptación de la costa a los efectos derivados del cambio climático, reduciendo sus riesgos y aprovechando sus oportunidades. En este sentido, Panamá se considera un país especialmente vulnerable a los efectos del cambio climático y, más concretamente, al aumento del nivel medio del mar. Esto se debe, principalmente, a la gran extensión de su costa, a la baja topografía de ésta, al alto grado de asentamientos humanos en la zona costera y al elevado índice de pobreza de esta población. Además, de acuerdo con la herramienta de DesInventar Senai de la UNDRR (United Nations office for

Disaster Risk Reduction), las inundaciones se consideran el principal desastre en Panamá. Aunque éstas se deben, en la mayoría de los casos, a los efectos directos e indirectos derivados de las lluvias intensas, los fuertes oleajes y las mareas altas se consideran importantes amenazas.

Por estos motivos, una de las tareas previstas en este proyecto consiste en evaluar el alcance de la inundación costera a nivel nacional, tanto la inundación derivada del aumento del nivel medio del mar como consecuencia del cambio climático, como la asociada a condiciones extremas de las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar. Con este análisis es posible determinar cómo va a evolucionar la línea de costa ante varios escenarios de cambio climático y/o condiciones extremas de oleaje y nivel del mar. Además, permite dar respuesta a preguntas tales como: ¿cuál es el nivel de agua del mar actual asociado a periodos de retorno de 10, 50 y 100 años?, ¿cómo cambiará la magnitud del nivel de agua total de 10, 50 y 100 años de periodo de retorno en 2050?, ¿cuál es la incertidumbre asociada a estas estimaciones?, ¿cuál será la extensión de la inundación costera para un escenario de emisiones determinado en el horizonte 2050?, ¿cuál será la cota de la lámina de agua sobre el terreno asociada a esa inundación?

En base a estos resultados, es posible proponer una serie de estrategias de adaptación ante diferentes escenarios y evaluar la respuesta de la costa en caso de ser implementadas, con el objetivo principal de fomentar el aumento de la resiliencia presente y futura de las zonas costeras de Panamá frente a eventos extremos y al cambio climático. Aunque este estudio no incluye un análisis de los daños producidos por las inundaciones, se pueden deducir fácilmente a partir de la envolvente poligonal que representa la extensión de la inundación.

Estos resultados constituyen el punto de partida para llevar a cabo el análisis del riesgo de inundación costera a nivel nacional. De acuerdo al IPCC (Wong et al., 2014), el riesgo se define como la probabilidad de un evento y sus consecuencias negativas, como resultado de la combinación de peligrosidad (P), definida a través de las dinámicas marinas, exposición (E), asociada al medio físico, y vulnerabilidad (V), ligada a las características socioeconómicas de la zona ($R = P \cdot E \cdot V$). El presente documento se centra, específicamente, en el modelado del impacto, a partir de datos de exposición y peligrosidad de alta resolución.

2. MARCO METODOLÓGICO

Para el modelado del impacto de inundación costera es necesario, por un lado, definir el conjunto de posibles eventos susceptibles de generar inundación y, por el otro, calcular el alcance de la inundación asociada. El primero de estos factores constituye la peligrosidad, que se combina con la exposición para poder estimar la extensión de la inundación en tierra y, por consiguiente, el impacto de la misma. La peligrosidad se obtiene a partir de los datos de las dinámicas marinas, mediante un índice denominado nivel de agua total (NAT o TWL, de sus siglas en inglés Total Water Level). La exposición, por su parte, viene definida por el Modelo Digital del Terreno (MDT). Tal y como se explica más adelante, la inundación puede clasificarse como permanente o temporal, debido al aumento en el nivel medio del mar y a condiciones extremas de las dinámicas marinas, respectivamente. De la misma manera, se definen dos tipos de NAT: permanente y asociado a eventos extremos. Además, los niveles de agua total asociados a condiciones extremas de oleaje y nivel del mar se van a analizar para el clima

presente y para un horizonte futuro teniendo en cuenta las proyecciones de aumento en el nivel medio del mar. Por tanto, en este estudio se han definido un total de 52 situaciones susceptibles de causar inundación (tanto permanente como asociada a eventos extremos), que se describen con detalle en el apartado 3.2 de este documento.

Los escenarios climáticos y el MDT constituyen los datos de entrada del modelo de inundación. Como resultados de este modelo se obtienen los mapas con la extensión de la inundación y la cota de la lámina de agua a nivel nacional para cada uno de los casos analizados (es decir, 52). Además, se puede extraer la envolvente de la extensión de la inundación, que delimita la línea de costa asociada a cada situación analizada.

La Figura 1 muestra, de forma esquemática, la metodología aplicada para analizar la inundación costera en Panamá.

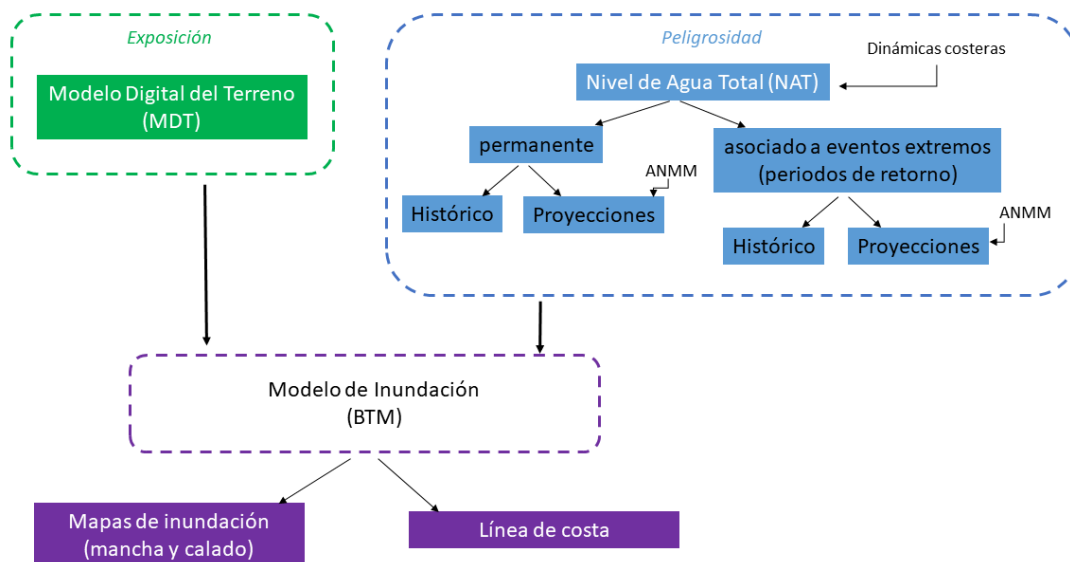


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología aplicada para analizar la inundación costera.

Las siguientes secciones describen tanto los datos de entrada como las características del modelo de inundación utilizado.

3 DATOS DE ENTRADA

Esta sección describe los datos de entrada utilizados en el modelo de inundación. Más concretamente, detalla las características del MDT empleado, así como el cálculo del NAT y los casos considerados.

3.1 MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)

El Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá del que se dispone ha sido facilitado por el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG) de Panamá. Tiene una resolución horizontal de 5 m, sin precisión decimal en los valores de elevación (valor Z). La referencia espacial utilizada es el Datum World Geodetic System de 1984 (WGS 84), utilizando la Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y en Zona 17 Norte. (Figura 2).

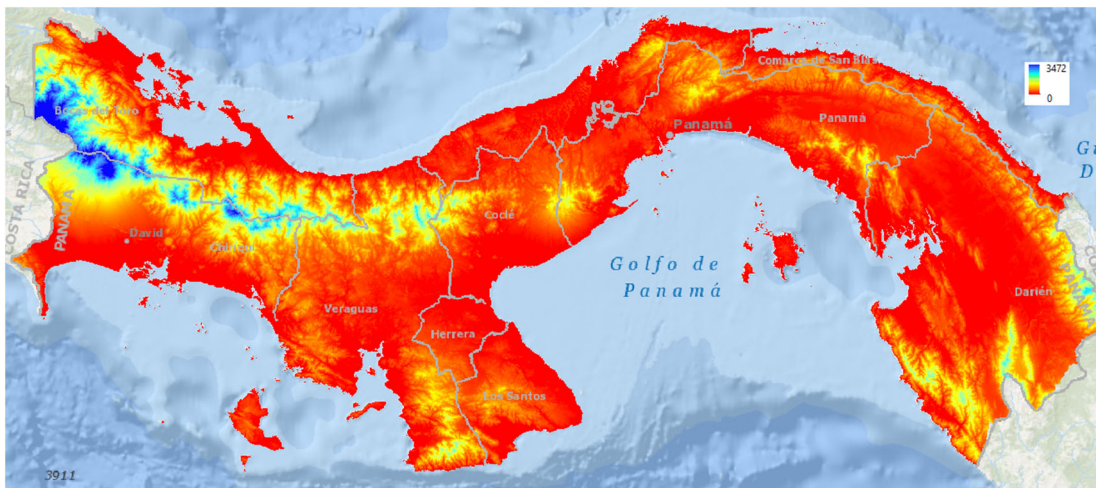


Figura 2. Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá facilitado por el IGNTG, y utilizado para el modelado de la inundación costera.

3.2 NIVEL DEL AGUA TOTAL (NAT)

Este apartado describe dónde y cómo se ha calculado el NAT que se utiliza como dato de entrada en el modelo de inundación. En concreto, se indican los puntos objetivo cerca de costa en los que se han extraídos los datos de las dinámicas marinas. Por otro lado, se presentan las formulaciones empleadas para el cálculo del NAT y se describen los casos considerados.

3.2.1 Puntos objetivo

El análisis del impacto de inundación costera se ha llevado a cabo utilizando como información de partida las condiciones de oleaje y nivel del mar en 1454 puntos localizados a lo largo del litoral panameño (Figura 3). Estos puntos tienen una resolución espacial aproximada de 2 km y cubren ambas costas, además de las principales islas del país. Tienen una profundidad entre 10-20 m, en su mayoría. Es importante destacar que, en zonas con una plataforma continental con una pendiente muy abrupta o con poca resolución batimétrica, estos puntos presentan profundidades más altas, como es el caso

de la región litoral pacífica limítrofe con Colombia o la zona de Limones, en la costa Pacífico occidental. Se han seleccionado puntos a estas profundidades a fin de caracterizar las condiciones próximas a costa, donde el oleaje ha experimentado los procesos de asomeramiento y refracción sin haber llegado a romper. Estas condiciones del oleaje son un requisito a la hora de calcular la contribución del oleaje al NAT (Stockdon et al., 2006).

En estos puntos se han extraído las series temporales de oleaje y nivel del mar generadas. Además, se ha utilizado la información regional de los valores de incremento del nivel medio del mar (ANMM) procedente del Sexto Informe del IPCC, el AR6 (Fox-Kemper et al., 2021). La resolución de esta base de datos de ANMM es de 1ºx1º.

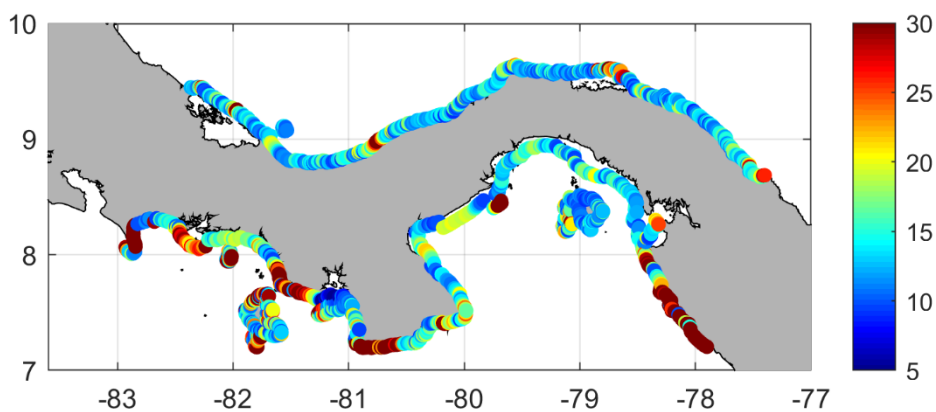


Figura 3. Profundidad (en metros) de los puntos costeros a partir de los cuales se ha analizado la evolución de la línea de costa en Panamá.

3.2.2 Componentes del Nivel del Agua Total

La inundación costera ocurre debido a la interacción de varios factores, tras los cuales el nivel de las aguas vuelve a su situación habitual. Sin embargo, la subida del nivel medio del mar implica la inundación permanente de terrenos. Debido a esta doble dimensión del problema, el impacto de inundación se va a estudiar considerando la inundación permanente, debida al aumento del nivel medio del mar, y la inundación potencial a causa de eventos extremos (Toimil et al., 2017).

La inundación costera depende del oleaje, la marea meteorológica (MM) y la marea astronómica (MA). Estas variables se combinan en el índice NAT. El NAT futuro incorpora, además, el ANMM. La contribución del oleaje al NAT puede adoptar la forma de set-up, set-up más swash infragravitatorio o run-up.

El run-up es la máxima cota de agua alcanzada en una playa o estructura por encima del nivel del mar (Figura 4). Este fenómeno se produce después de que la ola rompa sobre la playa, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por el talud. El run-up, a su vez, está compuesto por la suma del set-up, el swash infragravitatorio y el swash de onda corta.

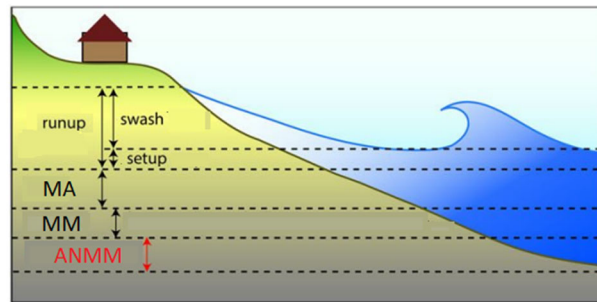


Figura 4. Esquema de las principales componentes del NAT.

- El set-up es la sobreelevación del nivel del mar debido a la rotura del oleaje.
- El swash infragravitatorio es la oscilación asociada a las ondas largas.
- El swash de onda corta es la salpicadura asociada a la turbulencia que se produce en la rotura del oleaje.

El set-up es la componente estática del run-up, principal responsable de las inundaciones persistentes, mientras que las componentes de swash corresponden con oscilaciones que dependen del tiempo y que pueden afectar o no a los niveles de inundación.

El objetivo de este estudio es determinar la línea de costa media y la asociada a eventos extremos. Para determinar cambios en la línea de costa media, se utiliza la ‘inundación permanente’, que es el efecto combinado de las pleamares y del aumento en el nivel medio del mar. Los cambios en la línea de costa por eventos extremos se estiman a partir de las condiciones extremas de oleaje y nivel del mar, caracterizadas por valores de NAT asociados a periodos de retorno. Para caracterizar la contribución del oleaje al NAT asociado a estos eventos extremos, este estudio ha utilizado la fórmula más conservadora, que corresponde con la formulación del run-up. Esta formulación, que se indica en el apartado siguiente, considera el máximo alcance del oleaje sobre el frente de playa.

3.2.3 Cálculo del Nivel del Agua Total

Las series temporales horarias durante los casi 30 años históricos reconstruidos (1993-2021) en la base de datos de nivel de agua total (tanto permanente como asociado a eventos extremos) se ha reconstruido en los 1454 puntos objetivo mostrados en la Figura 3.

El NAT permanente se ha calculado a partir de los datos de marea astronómica y del ANMM, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$NAT_{permanente} = PMVE + ANMM \quad (1)$$

Donde PMVE es la pleamar máxima viva equinoccial, calculada como el valor medio de las pleamares máximas mensuales obtenidas a partir de las series horarias de marea astronómica en el periodo 1993-2021. Estas series se han reconstruido usando las componentes armónicas del modelo global de marea TPX09 (Egbert et al., 1994).

Se ha analizado el ANMM en el año horizonte 2050 bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 con los niveles de confianza media y baja (*medium* y *low confidence*, respectivamente). Además, a fin de considerar el rango de incertidumbre, se han tenido en cuenta los valores de 3 percentiles del ensemble multi-modelo (es decir, del conjunto de modelos climáticos considerados): el del 5%, del 50

y del 95%. Esta información se ha extraído de la base de datos de ANMM regional publicada en el AR6 (IPCC, 2021). Estos valores de aumento en el nivel medio del mar se expresan respecto al periodo de referencia 1995-2014.

Para la reconstrucción del NAT asociado a eventos extremos, se han utilizado las bases de datos generadas en este proyecto de oleaje y nivel del mar. Para ello, se han utilizado las series temporales horarias desde 1993 a 2021 de nivel del mar compuesto (NMC, que incluye las contribuciones debidas a la marea astronómica y meteorológica) y de oleaje. A partir de los parámetros de estado de mar del oleaje, el run-up se ha calculado de acuerdo a la formulación de Stockdon et al. (2006):

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

Donde H_0 es la altura de ola significativa en los puntos costeros mostrados en la Figura 3. La longitud de onda asociada al periodo de pico (T_p) se ha calculado en base a:

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

Donde g es la aceleración de la gravedad.

Por último, β_f es la pendiente de la zona intermareal, estimada utilizando la formulación de Melet et al. (2020). La ecuación empleada para calcular este parámetro procede de Sunamura (1984), que se caracteriza por permitir al valor de dicha pendiente variar en función de las condiciones del oleaje:

$$\beta_f = 0.12 \cdot \left[\frac{\sqrt{2\pi D_{50} L_p}}{H_s} \right]^{1/2}$$

Donde H_s es la altura de ola significativa, L_p es la longitud de onda calculada a partir del periodo de pico. D_{50} es el diámetro medio del grano de arena de la playa, que se ha asumido igual a 250 μm (entre grano fino y medio) (Rueda et al., 2017). Siguiendo lo propuesto por Melet et al. (2020), la serie temporal de β_f se ha capado a 0.2 y se ha normalizado para asegurar un valor medio de la pendiente de la playa cercano a 0.04.

Una vez obtenidas las series de run-up, se ha reconstruido el NAT_{extremos} utilizando la siguiente fórmula:

$$NAT_{\text{extremos}} = NMC + R_{2\%} \quad (3)$$

Donde NMC corresponde al nivel del mar compuesto (Still Water Level en inglés) obtenido como salida del modelo numérico hidrodinámico utilizado en el marco de este proyecto.

Para analizar la inundación costera asociada a eventos extremos de periodo de retorno elevado, es decir, de baja probabilidad de ocurrencia pero de alto impacto, es necesario aplicar un análisis estadístico de valores extremos. Para ello, se parte de las series temporales de NAT en el periodo 1993-2021 en los 1454 puntos costeros objetivo. Se han determinado los valores máximos anuales de las series de NAT y se han ajustado a una función generalizada de extremos (GEV, de sus siglas en inglés *Generalised Extreme Value*) de tipo I o familia generalizada de Gumbel (parámetro de forma igual a 0). De este ajuste, se han obtenido los valores de NAT asociados a los 10, 50 y 100 años de periodo de retorno para el clima presente (o periodo histórico).

A fin de considerar, además, el aumento en el nivel medio del mar debido al cambio climático, a estos valores extremos (periodos de retorno) se les ha sumado el valor del ANMM en el año horizonte 2050. Se han considerado los valores de ANMM para los dos escenarios, niveles de confianza y percentiles descritos anteriormente.

Al tratarse el ANMM de una variable con tendencia significativa, y para no condicionar el ajuste de extremos, se ha sumado su correspondiente valor en el año 2050 a los cuantiles de NAT obtenidos en el clima presente.

3.2.4 Casos de Nivel del Agua Total considerados

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, se ha calculado el NAT permanente y el asociado a eventos extremos, tanto para el periodo histórico (o clima presente) como para el año horizonte 2050. Para este último caso, se ha considerado el ANMM bajo dos escenarios climáticos, dos niveles de confianza y tres percentiles del ensemble multi-modelo. Esto conlleva un total de 52 casos de NAT analizados. De estos, 13 corresponden a NAT permanente (es decir, debido al efecto combinado de las mareas y del aumento en el nivel medio del mar) y 39, a NAT asociado a eventos extremos de las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar. La Figura 5 muestra, de forma esquemática, los distintos casos de NAT considerados en este estudio para analizar la inundación costera a nivel nacional en Panamá.

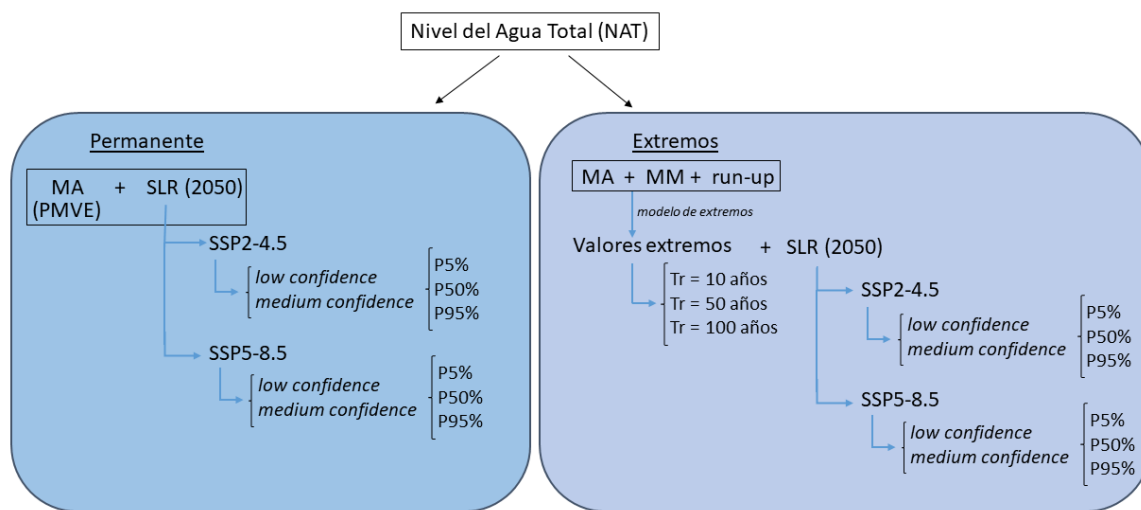


Figura 5. Esquema de los distintos casos de Nivel de Agua Total analizados, que se consideran potenciales de causar inundación costera.

4 MODELO DE INUNDACIÓN

Existe una gama amplia de modelos que resuelven el fenómeno de inundación en tierra con diferente grado de aproximación y, por tanto, de esfuerzo computacional. La inundación costera comúnmente se estudia mediante técnicas espaciales basadas en Sistemas de Información Geográfica (GIS), entre los que destaca el modelo “bathtub”, BTM (o método bañera). Éste es un modelo sencillo y muy eficiente desde el punto de vista computacional. En este modelo, la inundación se obtiene mediante la intersección de la cota que alcanza el nivel del mar (originado por diferentes dinámicas) con el MDT. Con este método, el volumen de agua que entra en el dominio es infinito y todo el terreno por debajo de un determinado nivel, físicamente conectado entre sí y con el mar, queda inundado. Por tanto, como datos de entrada, este modelo sólo requiere información sobre (1) el MDT y sobre (2) el nivel del agua total cerca de costa a lo largo de todo el litoral.

Como resultados de este modelo, se obtienen la altura de la lámina de agua (o el calado), y la extensión de la zona inundada. Además, se puede extraer la línea de costa a partir de la envolvente poligonal que representa el máximo alcance de la inundación.

Es importante mencionar que este modelo no tiene en cuenta la rugosidad de la superficie o la pendiente de la playa o del frente costero.

Para este estudio, se ha aplicado el BTM para los 52 casos de NAT descritos que se consideran susceptibles de inundar el frente costero. De cada una de estas simulaciones, se ha obtenido la extensión de la inundación (con su calado) y el polígono que delimita la línea de costa resultante.

5 RESULTADOS

5.1 NIVEL DE AGUA TOTAL

Este apartado describe los resultados más relevantes de los 52 casos de NAT analizados. De estos, 13 casos corresponden con NAT permanente y 39, con NAT asociado a eventos extremos.

5.1.1 NAT permanente

El NAT permanente se ha calculado para el periodo histórico (o clima presente) 1993-2021 y para el horizonte futuro 2050, bajo los niveles de confianza baja y media y los escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) considerados en este estudio. Tal y como se ha explicado anteriormente, sus valores en el periodo histórico equivalen a la pleamar máxima viva equinoccial (PMVE). Su valor oscila entre 0.24-0.29 m en la costa Caribe, y entre 1.69-2.69 m en la costa Pacífico. Los valores máximos se observan en el interior del Golfo de Panamá (Figura 6).

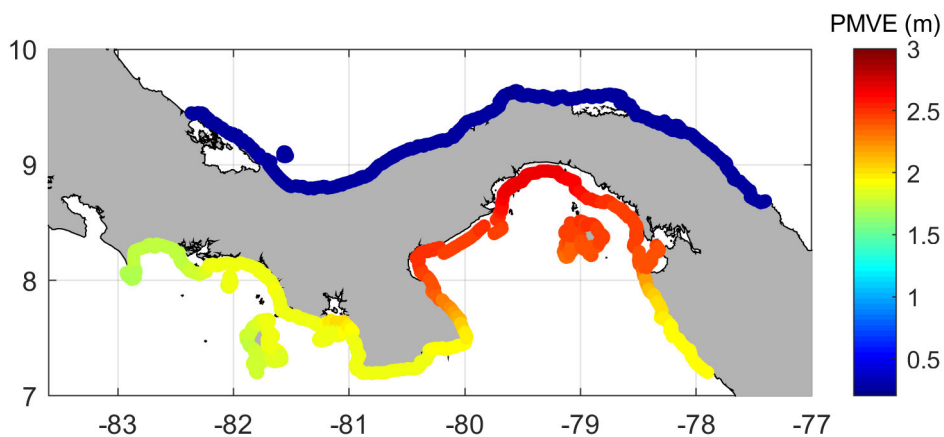


Figura 6. Distribución espacial del NAT permanente a lo largo de la costa de Panamá en el periodo 1993-2021.

Para el año 2050, se observa el mismo patrón espacial, con los valores más altos obtenidos en el Golfo de Panamá y los más bajos, en la costa Caribe (Figura 7). El rango de valores obtenido para los percentiles del 5%, 50% y 95% del ANMM se especifica en la Tabla 1.

	Confianza media			Confianza baja		
	P5% (m)	P50% (m)	P95% (m)	P5% (m)	P50% (m)	P95% (m)
SSP2-4.5	0.37- 2.85	0.49- 2.94	0.64- 3.08	0.37-2.85	0.5- 2.94	0.72- 3.17
SSP5-8.5	0.39- 2.87	0.52- 2.96	0.67- 3.12	0.39- 2.87	0.53- 2.97	0.86- 3.3

Tabla 1. Rangos de variación del NAT permanente (en metros) en el año horizonte 2050, considerando los valores de ANMM con unos niveles de confianza medio y bajo, para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

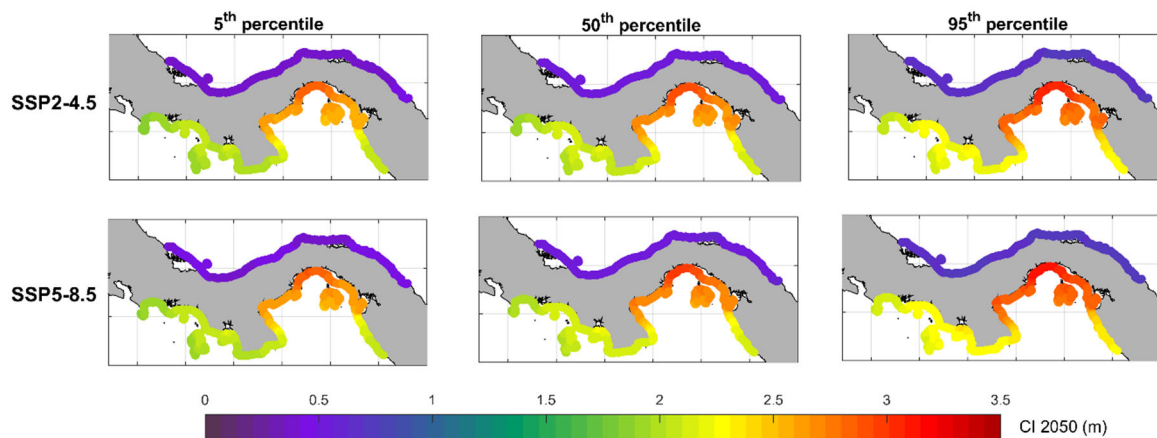


Figura 7. Distribución espacial del NAT permanente a lo largo de la costa panameña en el año 2050 bajo los dos escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) considerados y para un nivel de confianza medio. Se han representado los valores de los percentiles del 5%, 50% y 95% del ANMM.

5.1.2 NAT asociado a eventos extremos

En este apartado se proporcionan los valores de NAT de 10, 50 y 100 años de periodo de retorno para el periodo histórico o clima presente (1993-2021), así como para el horizonte 2050 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y los niveles de confianza medio y bajo. Es importante mencionar que los valores extremos del NAT en el 2050 sólo tienen en cuenta el ANMM, sin considerar los cambios que puedan sufrir las demás variables, como son el oleaje y la marea meteorológica.

La Figura 8 muestra la distribución espacial del NAT de 10, 50 y 100 años de periodo de retorno en el periodo 1993-2021. En la costa Caribe, los valores máximos se localizan en la comarca de Guna Yala, mientras que en la Pacífico se sitúan en el interior del Golfo de Panamá, así como en la zona costera entre las desembocaduras de los ríos Chiriquí Viejo y Nuevo. Los rangos de valores para cada costa se muestran en la Tabla 2.

	PR = 10 años	PR = 50 años	PR = 100 años
NAT (m) Caribe	0.98- 1.73	1.12 - 2.03	1.18 - 2.15
NAT (m) Pacífico	2.48 - 4.39	2.61- 4.63	2.66 - 4.73

Tabla 2. Rango de valores que toma el NAT asociado a eventos extremos de 10, 50 y 100 de periodo de retorno a lo largo de la costa Caribe y Pacífico de Panamá en el periodo 1993-2021.

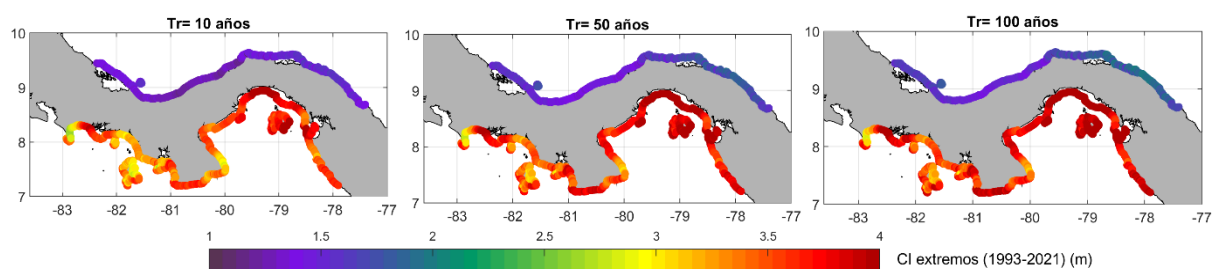


Figura 8. Distribución espacial del NAT de 10, 50 y 100 de periodo de retorno en el periodo 1993-2021.

Las Figura 9 y Figura 10 muestran la distribución espacial del NAT de 10 y de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050, para un nivel de confianza medio y los dos escenarios climáticos considerados. Se muestran los valores para los 3 percentiles de ANMM. En general, los mayores valores de NAT se encuentran en el interior del Golfo de Panamá, así como en la franja costera pacífica situada entre las desembocaduras de los ríos de Chiriquí Viejo y Nuevo. En el año 2050, para un nivel de confianza medio, los valores máximos obtenidos para el NAT de 100 años de periodo de retorno (y considerando el percentil del 50% del ANMM) son de 4.96 y 4.99 m para los SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente.

	Confianza media			Confianza baja		
	PR = 10 años	PR = 50 años	PR = 100 años	PR = 10 años	PR = 50 años	PR = 100 años
SSP2-4.5	1.05- 1.9	1.12 - 2.02	1.18 - 2.15	1.25- 4.63	1.39-4.87	1.45- 4.97
SSP5-8.5	2.55 - 4.53	2.61- 4.63	2.66 - 4.73	1.27- 4.65	1.42- 4.9	1.48- 5

Tabla 3. Rango de valores que toma el NAT asociado a eventos extremos de 10, 50 y 100 de periodo de retorno en el año 2050, para unos niveles de confianza medio y bajo y para los escenarios climáticos considerados. Los valores corresponden al percentil del 50% de ANMM (en metros) en Panamá.

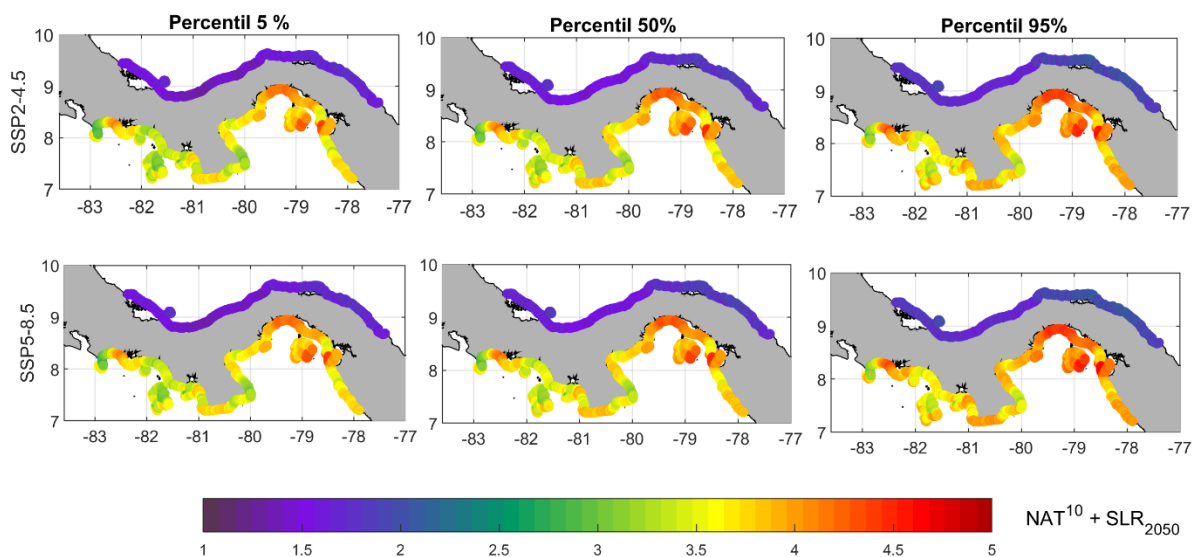


Figura 9. Distribución espacial del NAT de 10 años de periodo de retorno considerando los percentiles del (izquierda) 5%, (centro) 50% y (derecha) 95% del ANMM en el año 2050, para un nivel de confianza medio y bajo los dos escenarios climáticos considerados.

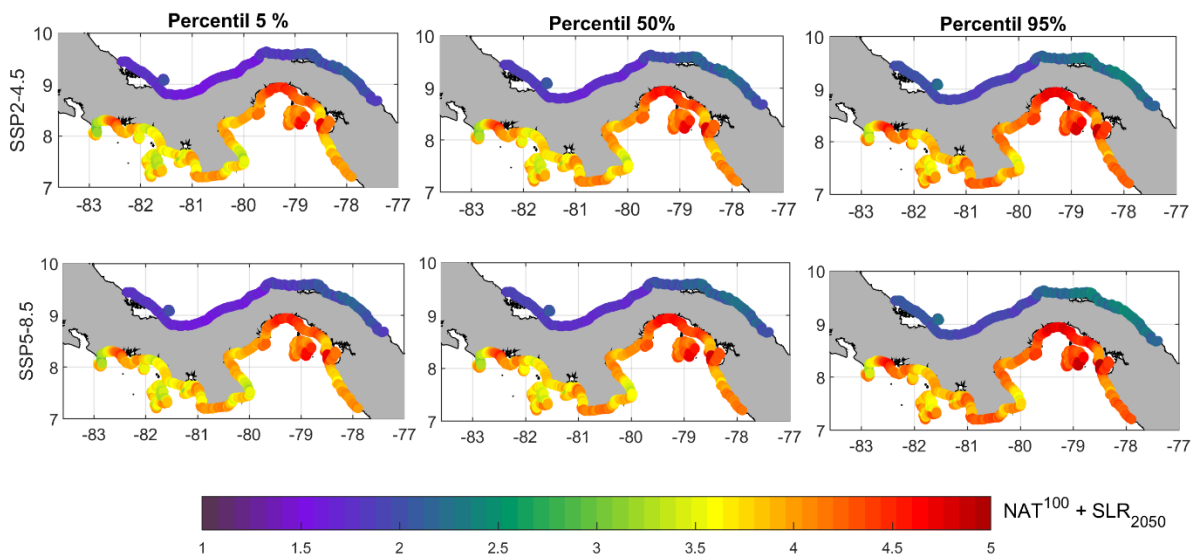


Figura 10. Distribución espacial del NAT de 100 años de periodo de retorno considerando los percentiles del (izquierda) 5%, (centro) 50% y (derecha) 95% del ANMM en el año 2050, para un nivel de confianza medio y bajo los dos escenarios climáticos considerados.

5.2 MAPAS DE INUNDACIÓN

En este apartado se describen los resultados más relevantes de inundación costera obtenidos de aplicar el BTM a los 52 casos de NAT considerados en Panamá. Es muy importante mencionar que estos resultados están condicionados por la resolución tanto horizontal como vertical del MDT, el cual cuenta únicamente con valores enteros sin precisión decimal en su valor Z (de elevación).

Los resultados obtenidos se comparan con el mapa facilitado por Sinaproc, de zonas vulnerables a ser inundadas por ascenso del nivel del mar debido a su baja elevación (Figura 11).

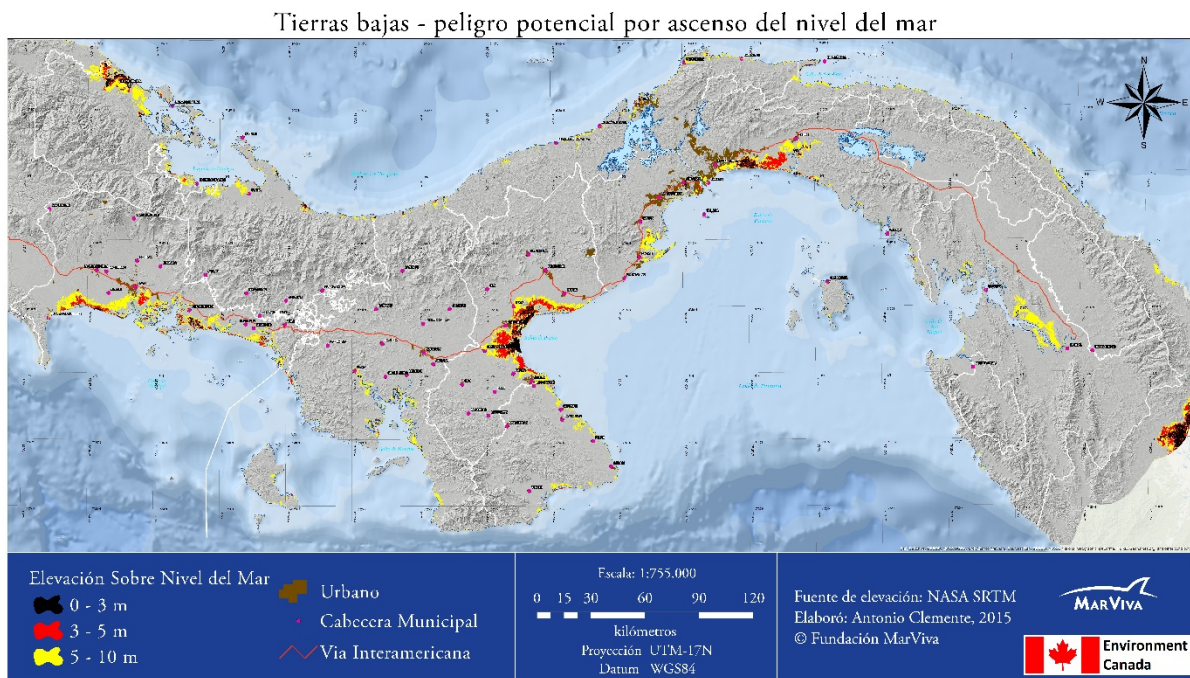


Figura 11. Mapa que muestra las zonas más vulnerables al ascenso del nivel del mar debido a su baja elevación en Panamá. La escala de colores muestra dicha elevación. Fuente: Sinaproc.

5.2.1 Inundación permanente

En la costa Caribe panameña apenas se observa inundación como consecuencia del ANMM en el horizonte 2050 bajo ninguno de los escenarios ni percentiles analizados. Tan sólo la zona costera del archipiélago de Bocas del Toro queda parcialmente inundada, incluyendo la zona de manglares situada tanto al norte como al sur de dicho archipiélago. Estos resultados se deben a que, en este litoral, los valores del NAT permanente son inferiores a 1 m debido a la amplitud micromareal en esta zona. Dado que la elevación en el MDT utilizado no tienen precisión decimal y, por tanto, sus valores pasan de 0 a 1 m, prácticamente, ninguna zona se inunda (Figura 12-arriba).

Respecto a la costa Pacífico, el escenario más optimista analizado para el horizonte 2050 (es decir, el escenario SSP2-4.5, nivel de confianza medio y percentiles del 5% y 50%), sólo presenta inundación en las zonas colindantes a las desembocaduras de los ríos Fonseca, San Juan y Santiago, en la provincia de Chiriquí (Figura 12-arriba). El percentil del 95% de este caso analizado muestra, además, inundación y retroceso de la línea de costa en la zona de manglares comprendida entre Río Chepo y Río Chico (distrito de Panamá) y entre el río Colorado y río Garibaldi (en el corregimiento de Baco, distrito de Barú, provincia de Chiriquí). Para este mismo percentil, en la provincia de Panamá (distritos de Panamá y Chepo), hay un retroceso de la línea de costa significativo en la región comprendida entre Ciudad de Panamá y el río Pacora. Para los datos del SSP2-4.5 con un nivel de confianza bajo se observa, además, inundación en la zona de manglares localizada al oeste de la desembocadura del río La Maestra (distrito de Chimán, provincia de Panamá) para el percentil del 95%.

La mayor extensión de la inundación obtenida (para el escenario SSP5-8.5, nivel de confianza bajo y percentil del 95%) abarca, además de los lugares descritos anteriormente, la zona costera de las provincias de Panamá, de Darién (más concretamente, en el Golfo de San Miguel), del distrito de Chame (Panamá Oeste) y de Coclé (en los distritos costeros entre Chitré y Antón) (Figura 12-abajo).

Estos resultados se pueden observar en la Figura 17, donde se muestra la evolución de la línea de costa ante las situaciones de inundación permanente analizadas.

Las zonas inundadas bajo el escenario SSP5-8.5 coinciden, en su mayoría, con las zonas vulnerables debido a su baja elevación mostradas en la Figura 11, principalmente para la costa Pacífico.

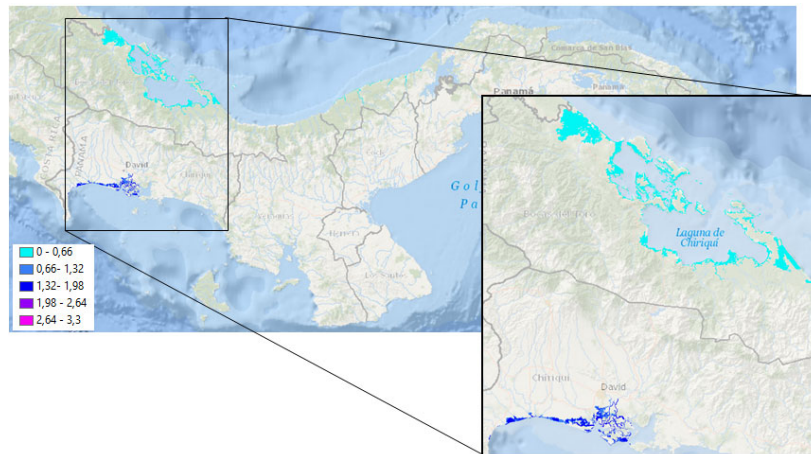


Figura 12. Extensión de la inundación, con la paleta de colores indicando la altura de la lámina de agua (en metros) en el año horizonte 2050 en Panamá para el caso más optimista analizado: escenario SSP2-4.5, nivel de confianza medio y percentil del 5%. Se muestra imagen ampliada de las principales zonas inundadas.

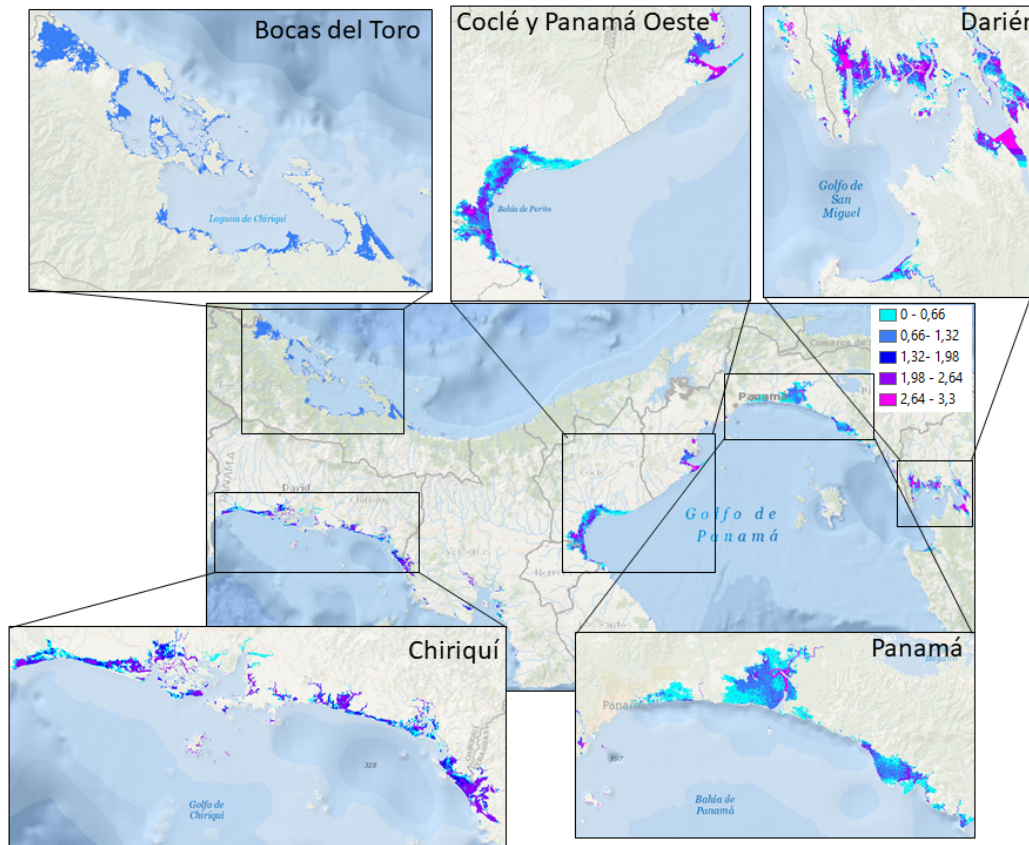


Figura 13. Extensión de la inundación, con la paleta de colores indicando la altura de la lámina de agua (en metros) en el año horizonte 2050 en Panamá para el caso más pesimista analizado: escenario SSP5-8.5, nivel de confianza bajo y percentil del 95%. Se muestra imagen ampliada de las principales zonas inundadas.

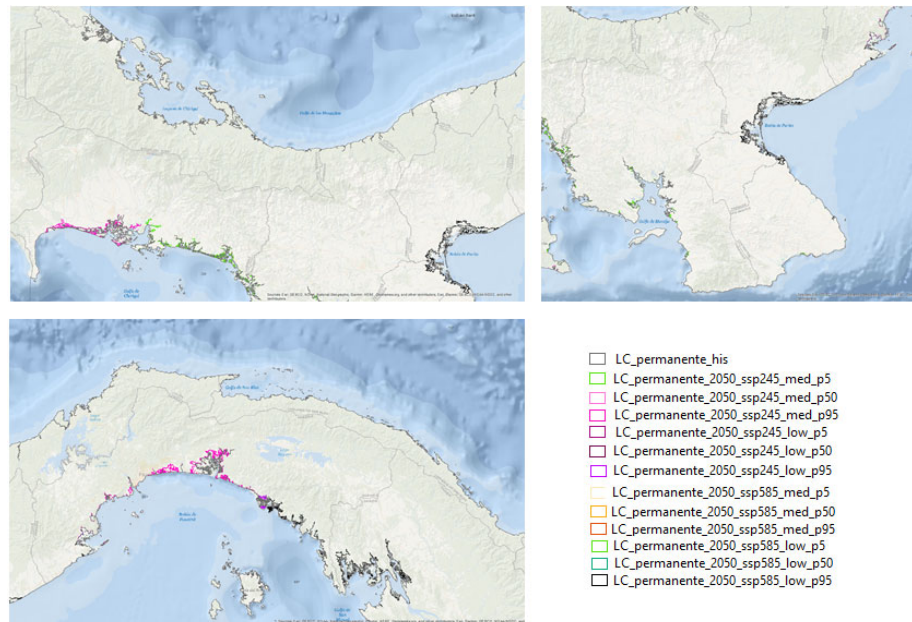


Figura 14. Posición de la línea de costa en el horizonte 2050 como consecuencia de la inundación permanente para los distintos escenarios y percentiles analizados en Panamá.

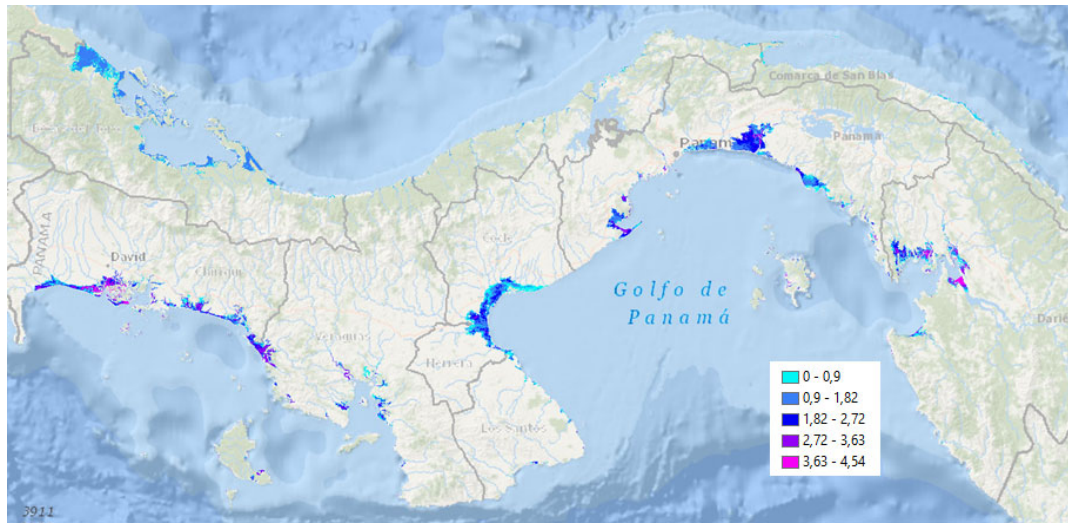
5.2.2 Inundación por extremos

Se ha analizado la inundación provocada por eventos extremos (de más de 10 años de periodo de retorno) en las dinámicas marinas de oleaje y nivel del mar en Panamá. Para las condiciones extremas consideradas, se observa inundación, principalmente, en las siguientes regiones (Figura 15):

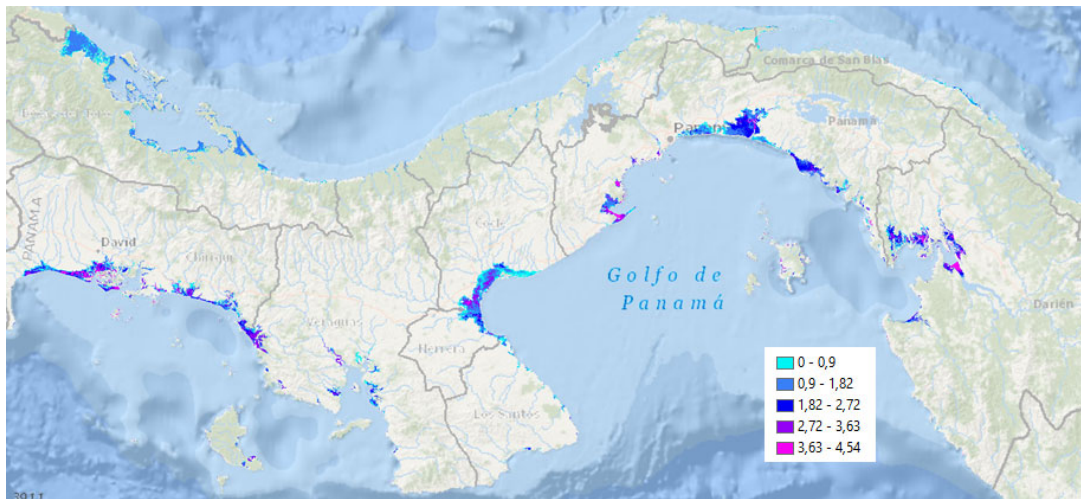
- Provincia de Darién: región en torno a la ciudad de La Palma y a la desembocadura del río Sambú (entre Garachiné y Taimati).
- Provincia de Panamá: zona de manglares en el distrito de Chimán, región al este de Ciudad de Panamá y entre río Chico y río Chepo.
- Provincia de Panamá Oeste: inundación del área en torno a la bahía de Chame.
- Provincia de Coclé: inundación del área en torno a la bahía de Parita (distrito de Aguadulce).
- Provincia de Veraguas: zona de manglares en torno al río Vidal.
- Provincia de Chiriquí: prácticamente toda la zona costera a excepción del distrito de Barú.
- Costa Caribe: se observa inundación principalmente en la costa de Bocas del Toro (incluyendo la zona de manglares situada tanto al norte como al sur de este archipiélago) y en El Porvenir (Guna Yala). Además, se observa ligera inundación en algunas regiones costeras situadas al norte de la ciudad de Colón (provincia de Colón).

Las zonas inundadas coinciden para los tres periodos de retorno analizados. Sin embargo, la extensión de la inundación y la altura de la lámina de agua son mayores para los periodos de retorno de 50 y 100 años en las zonas inundadas de la provincia de Darién y de Panamá (Figura 15). La Figura 16 muestra el mapa de inundación de 100 años de periodo de retorno ampliado para las zonas más vulnerables.

Tr = 10 años



Tr = 50 años



Tr = 100 años

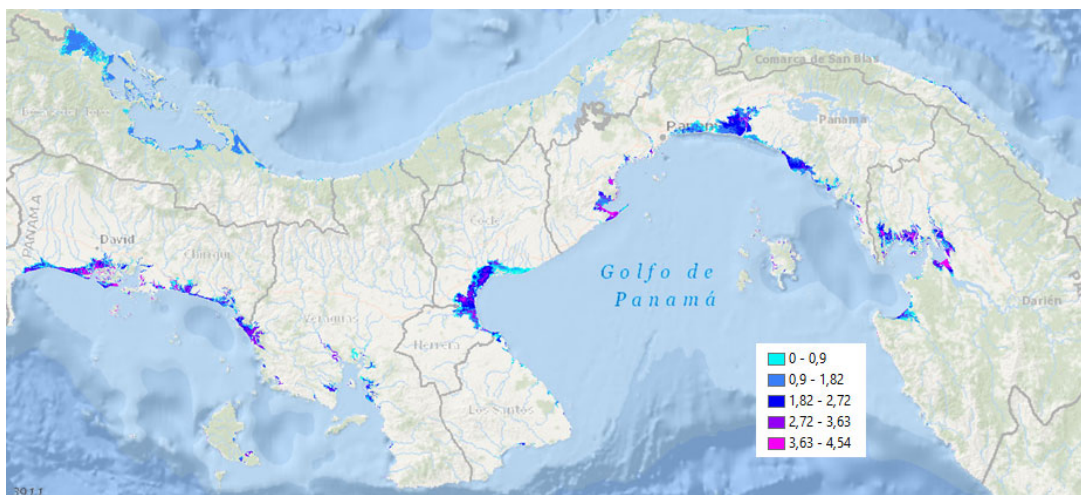


Figura 15. Extensión de la inundación ante eventos extremos de las dinámicas marinas en el clima presente en Panamá. Los eventos extremos analizados corresponden con los NAT de (arriba) 10, (centro) 50 y (abajo) 100 años de periodo de retorno. La paleta de colores indica la altura de la lámina de agua (en metros).

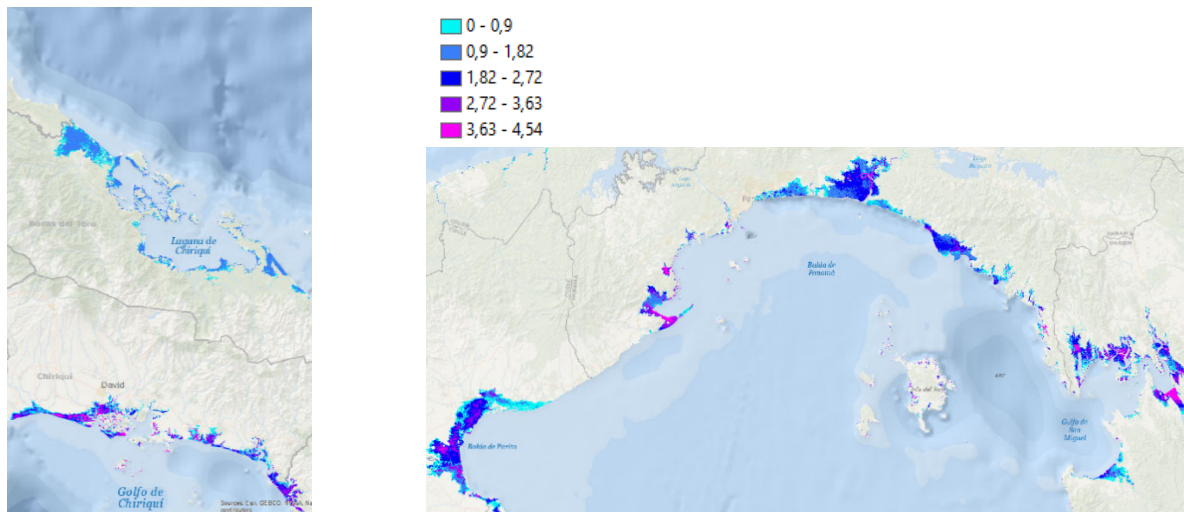


Figura 16. Zoom sobre las principales zonas inundadas para el caso de NAT de 100 años de periodo de retorno en el clima presente.

Para poder observar con mayor claridad las diferencias obtenidas para cada periodo de retorno, la Figura 17 muestra la posición de línea de costa obtenida para los tres casos analizados en el clima presente. Así, destacan en color verde y rojo las zonas que quedan inundadas para periodos de retorno más elevados, como son 50 y 100 años, respectivamente.

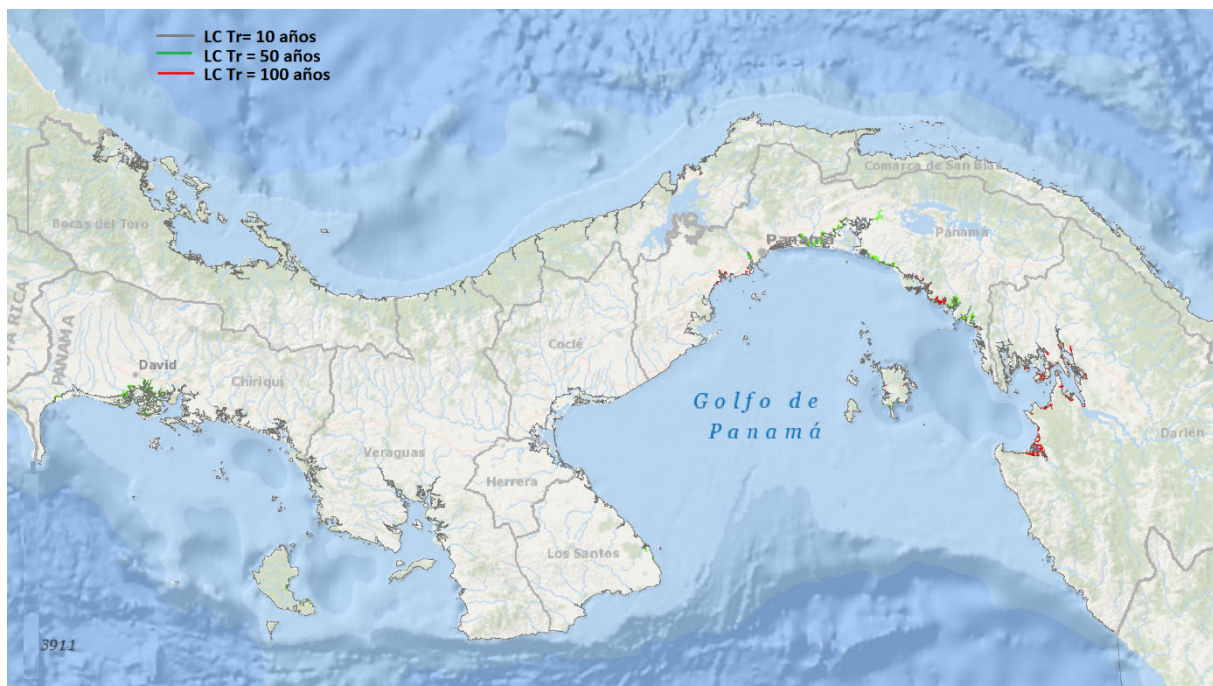


Figura 17. Posición de la línea de costa como consecuencia de la inundación ante eventos extremos de las dinámicas marinas de (gris) 10, (verde) 50 y (rojo) 100 años de periodo de retorno en Panamá.

Además, los eventos de inundación ante situaciones extremas de oleaje y nivel del mar se han analizado para el año horizonte 2050, teniendo en cuenta el ANMM. La Figura 18 y Figura 19 muestran los mapas de inundación para los eventos de 10 y 100 años de periodo de retorno, respectivamente, utilizando los valores de ANMM bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, nivel de confianza bajo y percentil del 50%.

En estos casos, para la costa Caribe, la inundación aumenta, principalmente en: el archipiélago de Bocas del Toro; en algunas zonas del distrito de Portobelo y de Santa Isabel (provincia de Colón) y en el Golfo de San Blas (comarca de Guna Yala).

Respecto a la costa Pacífico, las zonas inundadas son las mismas que las observadas para el clima presente, pero aumenta su extensión y calado.

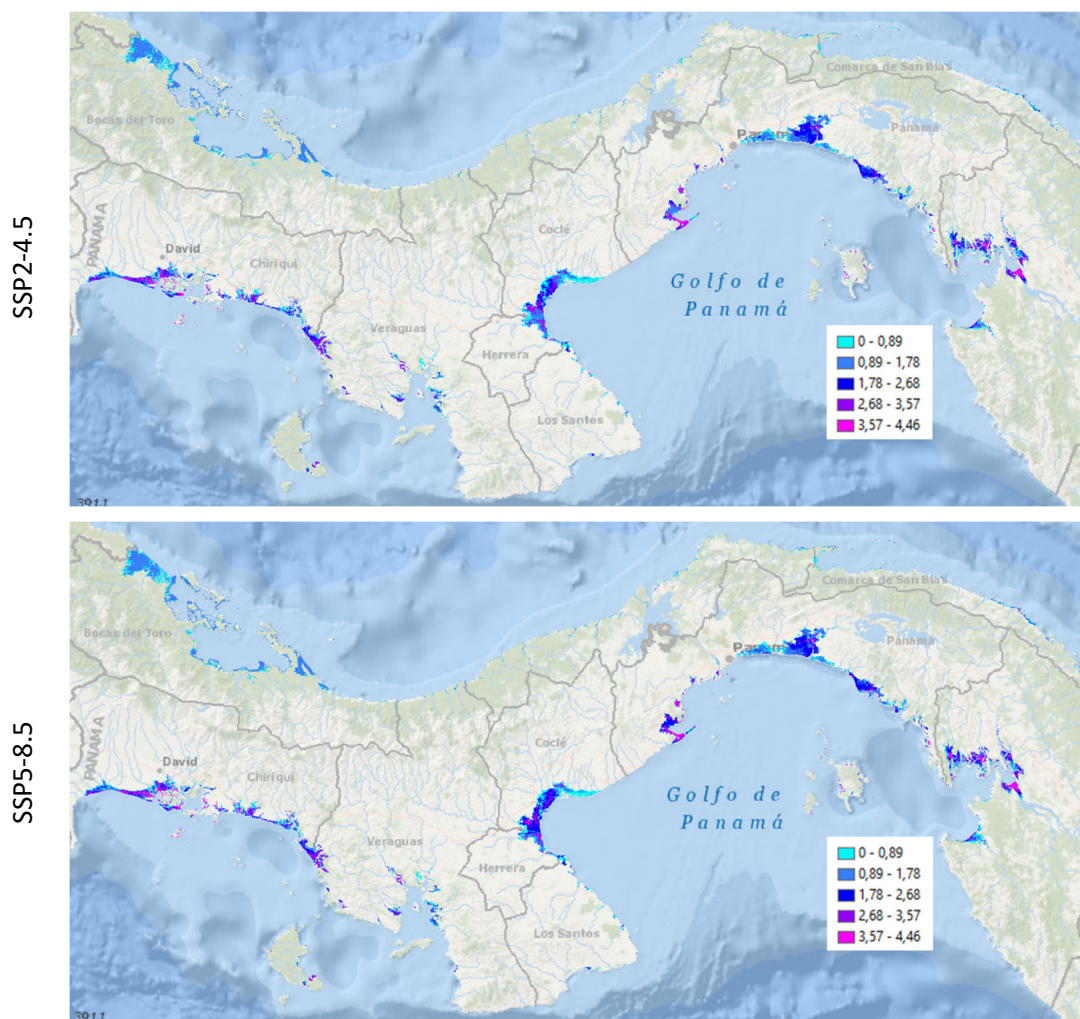


Figura 18. Extensión de la inundación de 10 años de periodo de retorno, en el año horizonte 2050, con valores de ANMM de confianza baja y percentil del 50% del ensemble multi-modelo bajo los escenarios (arriba) escenario SSP2-4.5 y (abajo) SSP5-8.5, en Panamá. La paleta de colores indica la altura de la lámina de agua (en metros).

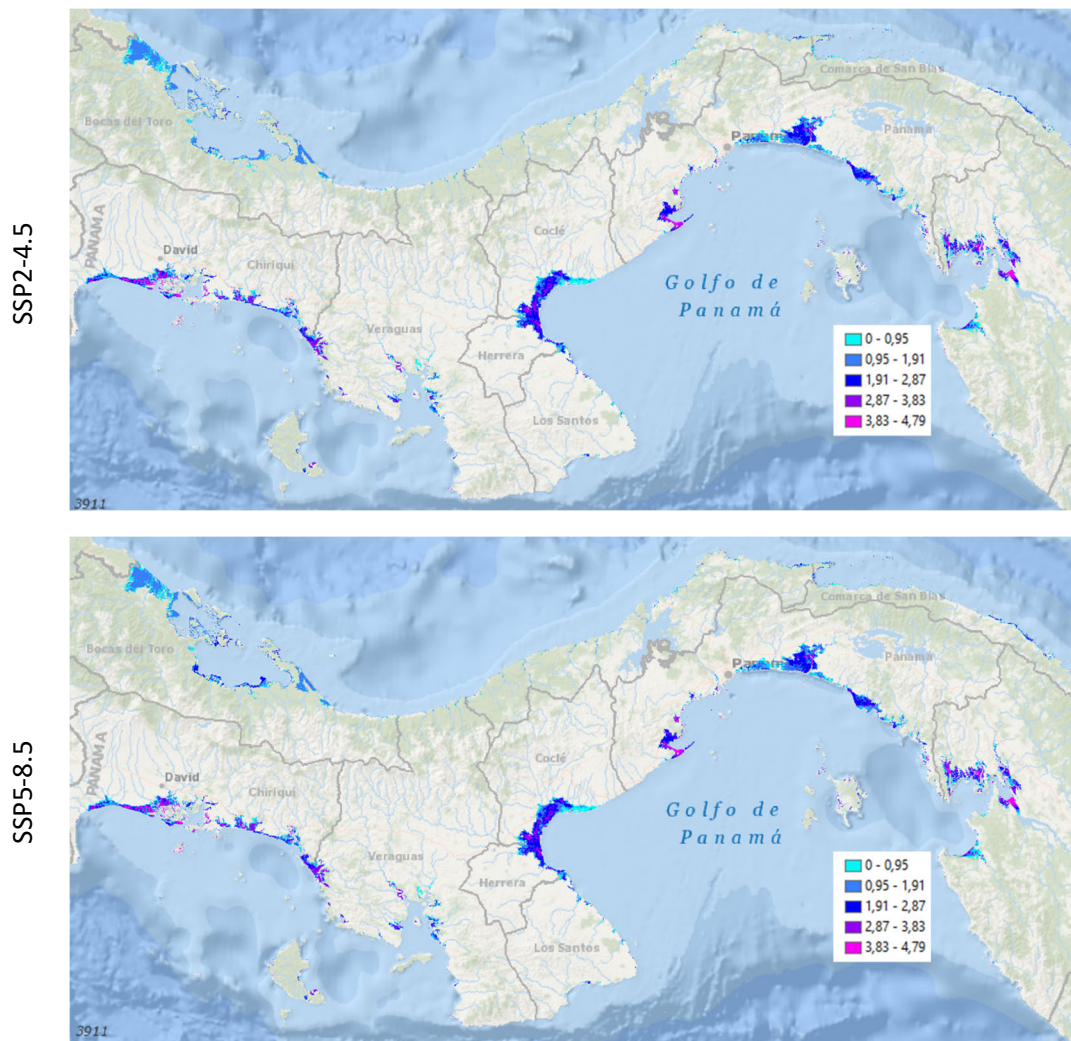


Figura 19. Extensión de la inundación de 100 años de periodo de retorno, en el año horizonte 2050, con valores de ANMM de confianza baja y percentil del 50% del ensemble multi-modelo bajo los escenarios (arriba) escenario SSP2-4.5 y (abajo) SSP5-8.5, en Panamá. La paleta de colores indica la altura de la lámina de agua (en metros).

Por último, se han extraído una serie de imágenes de los mapas de inundación para zonas específicas donde se observa un alcance y calado de la inundación significativas. Es el caso de la costa de la provincia de Chiriquí (Figura 20), la región de Aguadulce (provincia de Coclé), en torno a la bahía de Chame (Panamá Oeste), Ciudad de Panamá y en torno al Golfo de Guna Yala (en la costa Caribe) (Figura 21). Estos mapas corresponden con la inundación obtenida ante eventos extremos de 100 años de periodo de retorno, con los valores del percentil del 50% de ANMM, confianza baja y escenario SSP5-8.5 en el año 2050.

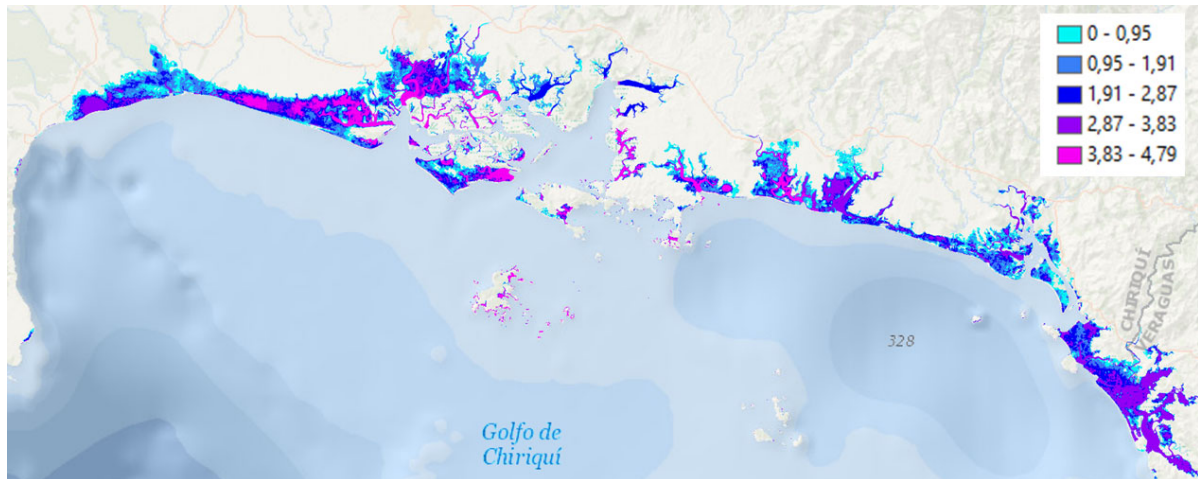


Figura 20. Zoom sobre la costa de la provincia de Chiriquí (costa Pacífico de Panamá). Extensión de la inundación ante eventos extremos de las dinámicas marinas de 100 años de periodo de retorno, para el horizonte 2050, escenario SSP5-8.5, nivel de confianza medio y percentil del 50%. La paleta de colores indica la altura de la lámina de agua (en metros).

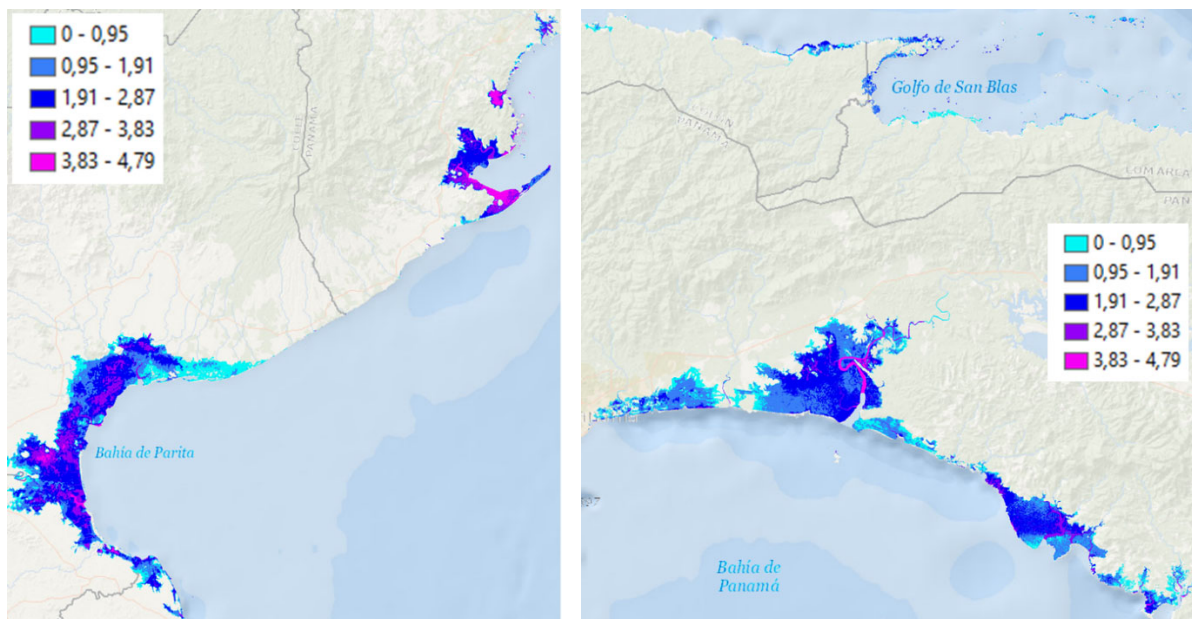


Figura 21. (izquierda) Zoom sobre la zona de Aguadulce (provincia de Coclé) y de la bahía de Chame (Panamá Oeste) y (derecha) sobre la provincia de Panamá y de Guna Yala (costa Caribe). Extensión de la inundación ante eventos extremos de las dinámicas marinas de 100 años de periodo de retorno, para el horizonte 2050, escenario SSP5-8.5, nivel de confianza medio y percentil del 50%. La paleta de colores indica la altura de la lámina de agua (en metros).

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han analizado los procesos de inundación costera en Panamá para 52 casos susceptibles de causar impactos, incluyendo situaciones tanto en el clima presente como en el año horizonte 2050 ante escenarios de evolución de cambio climático. Para ello, la peligrosidad se ha analizado para dos situaciones que provocan eventos de inundación diferentes:

1. El ANMM como consecuencia del cambio climático, lo que provoca la inundación permanente de terrenos. La peligrosidad en el clima presente corresponde con las condiciones de pleamar (pleamar máxima viva equinoccial), mientras que en el futuro se le suma los valores de ANMM.
2. La inundación temporal provocada por condiciones extremas de oleaje y nivel del mar, tanto en el clima presente como en el año horizonte 2050.

Como resultado de aplicar el modelo de inundación a los 52 casos considerados, se han obtenido mapas con la extensión de la inundación y la altura de la lámina de agua, así como la línea de costa asociada a cada caso.

En la costa Pacífico, se ha identificado las siguientes regiones como zonas más vulnerables, tanto al cambio climático como a las condiciones extremas de las dinámicas marinas:

- La costa de la provincia de Chiriquí, con la excepción del distrito de Barú.
- La provincia de Coclé: en torno a la bahía de Parita, región de Aguadulce.
- La provincia de Panamá Oeste: en torno a la bahía de Chame.
- La provincia de Panamá: en la zona de manglares al este de Ciudad de Panamá y hasta la desembocadura del río Chepo.
- La provincia de Darién: en torno a la ciudad de La Palma.

En la costa Caribe, apenas se observa inundación debido, exclusivamente, al ascenso en el nivel medio del mar, lo que se puede justificar debido a la falta de precisión decimal en los valores de elevación del MDT utilizado. Tan sólo la región adyacente al archipiélago de Bocas del Toro queda inundada en el año horizonte 2050. Sin embargo, los eventos extremos analizados en el horizonte 2050 provocan, además, inundación en algunas zonas del distrito de Portobelo y de Santa Isabel (provincia de Colón) y en el Golfo de San Blas (comarca de Guna Yala), principalmente.

La principal limitación de la metodología aplicada radica en la falta de precisión decimal del MDT utilizado, es decir, carece de valores decimales. Esto justifica que apenas se observe inundación en la costa Caribe panameña, cuyo régimen de marea es micromareal y, por tanto, los valores de NAT utilizados son inferiores a 1 m en la mayoría de los puntos costeros/casos analizados. Esto conlleva a que, al cruzar estos datos con los valores de elevación del MDT (que pasan de 0 a 1 m), prácticamente ninguna región queda inundada. Por ello, como principal mejora para futuros trabajos, recomendamos analizar la inundación utilizando un MDT con una precisión en su valor z más definida.

Por otro lado, el modelado de la inundación costera en tierra se ha abordado mediante el BTM, 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. Por ello, la precisión de los resultados aumentaría si se aplicara un modelo de inundación más sofisticado. Un ejemplo de este tipo de modelos es el RFSM-EDA (Jamieson et al., 2012). Es un modelo hidráulico bidimensional eficiente que proporciona profundidades de agua sobre el terreno. Su algoritmo permite tener en cuenta rasgos característicos de la topografía, como crestas y puntos bajos, derivados de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta resolución y es sensible a la rugosidad del terreno (es decir, al coeficiente de Manning).

Además, un análisis más preciso de la propagación de la inundación en tierra a nivel nacional implicaría:

- Determinar la contribución del oleaje al nivel de agua total (es decir, calcular el run-up del oleaje) mediante simulación hidrodinámica en vez de con formulaciones empíricas. Para ello, se podría utilizar el modelo hidrodinámico XBeach (Roelvink et al., 2009) ejecutado en perfiles utilizando, como datos de entrada, la base de datos de hindcast de oleaje cerca de costa. Este modelo permite obtener la sobreelevación del oleaje por rotura con mucha precisión, componente esencial del NAT.
- Incluir las variables de precipitación y de caudal de los ríos en el modelado de la inundación.
- Para analizar la inundación en un horizonte futuro, se debería de tener en cuenta no sólo las proyecciones de ANMM, sino también las de oleaje y marea meteorológica (o marea de tormenta).

BIBLIOGRAFÍA

- Egbert, G. D., Bennett A. F. , and Foreman M. G. G. , 1994: TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res*, 99 , 24821–24852.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B., R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jamieson, S., Lhomme, J., Wright, G. & Gouldby, Ben. (2012). A highly efficient 2D flood model with sub-element topography. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*. 165. 581-595. [10.1680/wama.12.00021](https://doi.org/10.1680/wama.12.00021).
- Melet, A., Almar, R., Hemer, M., Le Cozannet, G., Meyssignac, B., and Ruggiero, P. (2020). Contribution of wave setup to projected coastal sea level changes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2020JC016078. <https://doi.org/10.1029/2020JC016078>.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Rueda, A., Vitousek, S., Camus, P., Tomas, A., Espejo, A., Losada, I. J., et al. (2017). Global classification of coastal flooding climates. *Scientific Reports*, 7(1), 5038. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05090-w>.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger Jr., A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53 (7), pp. 573-588.
- Sunamura, T. (1984). Quantitative predictions of beach-face slopes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(2), 242–245. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<242:QPOBS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<242:QPOBS>2.0.CO;2)
- Toimil, A., Losada, I.J., Camus, P., and Diaz-Simal, P. (2017). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coastal Engineering* 128, pp. 106-122.
- Wong PP, Losada IJ, Gattuso J-P, Hinkel J, Khattabi A, McInnes KL, et al. Coastal systems and low-lying areas. En: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, et al., editores. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014. p. 361–409.