



## **MARES**

# ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGO DE LOS SISTEMAS NATURALES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ESTUARIOS CANTÁBRICOS



Con el apoyo de:







# **INFORME TÉCNICO**

"Subida del nivel del mar en futuros escenarios de cambio Climático en estuarios cantábricos"



Informe técnico: Subida del nivel del mar en futuros escenarios de cambio climático en estuarios cantábricos
Este proyecto cuenta con el apoyo del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente a través de la Fundación Biodiversidad.
Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto





ÍNDICE

## ÍNDICE





ÍNDICE

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	2
3.	DINÁMICAS GENERADORAS DE LA INUNDACIÓN	3
4.	EXPOSICIÓN	5
	4.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)	7
	MODELADO DE INUNDACIÓN	
	5.1. Modelo de inundación	. 13
	5.3. Calibración del modelo	
6.	ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO	. 21
7.	RESULTADOS	. 22
	7.1. Eo	. 22
	7.2. Villaviciosa	
	7.3. Santoña	
	7.4. Bidasoa	
8.	CONCLUSIONES	. 34
RF	FERENCIAS	. 36





MEMORIA

**MEMORIA** 





### 1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son áreas de gran riqueza en las que tienen lugar procesos físicos, químicos y biológicos gobernados por complejas interacciones de flujos de agua. Como consecuencia, estas áreas son sumamente dinámicas y presentan una alta fragilidad y vulnerabilidad frente a cualquier tipo de presión externa, ya sea de origen natural o humano (Wong et al., 2014). El cambio climático es una de ellas, y el calentamiento global está dando lugar a cambios en el sistema climático que conllevará, entre otros efectos, la anegación y pérdida permanente de terrenos en zonas bajas. Así, hacer un pronóstico de cómo podría evolucionar la línea de costa en un futuro nos puede ayudar a afrontar, de forma planificada y con una base científico-técnica suficiente, la gestión del futuro de este preciado recurso.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es el de caracterizar los posibles cambios en la línea de pleamar (PM) en los estuarios del Eo, Villaviciosa, Santoña y Bidasoa por efecto del cambio climático, en particular, como consecuencia del aumento del nivel medio del mar (ANMM). Para ello, se han definido escenarios de cambio climático y se ha empleado un modelo de procesos que ha sido calibrado con datos históricos.

A continuación, se describe la metodología seguida, el análisis de la variabilidad de las dinámicas actuantes en el proceso de inundación, el preproceso requerido para una adecuada caracterización de la exposición, la descripción del modelo de impacto escogido para realizar las simulaciones y la definición de los escenarios considerados. Asimismo, se muestra un resumen de los resultados más representativos.





## 2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología seguida tiene como fin último la obtención de mapas de inundación máxima en los estuarios del Eo, Villaviciosa, Santoña y Bidasoa para una serie de escenarios de cambio climático. Para ello, es necesario definir las dinámicas generadoras de la inundación costera que, dada la naturaleza del análisis (*i.e.*, inundación permanente), corresponden a la marea astronómica (MA) y a las proyecciones de ANMM.

Por otro lado, es necesario disponer de datos de exposición. Esto es, un modelo digital de terreno (MDT) de alta resolución y la distribución de los usos del suelo. El MDT servirá para elaborar la malla de cómputo y, a través de la distribución de usos del suelo, se inferirán las rugosidades de Manning, a las que el modelo de inundación es sensible. Así, el modelo de inundación se alimentará de series temporales de dinámicas marinas de MA y ANMM, según proceda, y dará lugar a los mapas de inundación (Figura 1).

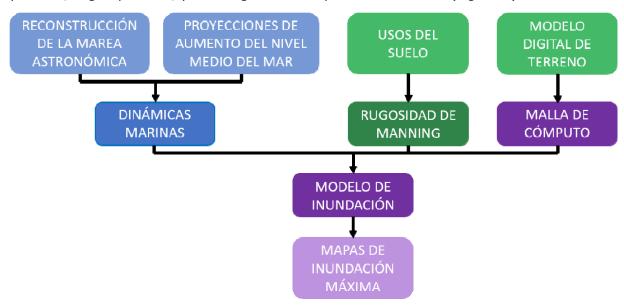


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.





## 3. DINÁMICAS GENERADORAS DE LA INUNDACIÓN

Una de las dinámicas más importantes en el Golfo de Vizcaya son las mareas, consideradas como el principal mecanismo modelador de los estuarios de esta zona. El continuo flujo y reflujo de las mareas en el interior de los estuarios genera corrientes rápidas en las desembocaduras de todos los estuarios e involucra volúmenes de agua muy superiores a los caudales fluviales. La marea astronómica del Golfo de Vizcaya es semidiurna, es decir, tiene un período de 12 horas y al día ocurren dos bajamares y dos pleamares cuya amplitud (carrera de marea) varía entre los 4 y los 5 m. La Tabla 1 (segunda columna) muestra la variabilidad de la pleamar viva equinoccial (PMVE) máxima histórica en los estuarios considerados. Este valor corresponde al valor máximo de la PM alcanzado durante los últimos 67 años, y se ha obtenido de la reconstrucción horaria de la MA de la base de datos GOT (del inglés, *Global Ocean Tides*), generada por IHCantabria a partir de las componentes armónicas del modelo TPXO7.2 (Egbert et al., 1994). En este estudio, no se ha tenido en cuenta la marea meteorológica (MM) por tener una amplitud muy pequeña (del orden de cm) con respecto a la MA.

Dado que el nivel medio del mar no está subiendo igual en todas las partes del mundo, en los estudios regionales y locales de riesgo, como es este caso, los valores necesarios de ANMM son los del nivel del mar local. Las proyecciones de incremento del nivel medio del mar global para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (van Vuuren et al., 2011) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), correspondientes a rutas de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) moderados y altos respectivamente, han sido regionalizadas para las cuencas de todo el mundo por Slangen et al. (2014). Esta regionalización se ha hecho combinando los procesos de cambios en la circulación oceánica y aumento de absorción de calor y presión atmosférica incluidos en los modelos climáticos de la fase 5 del proyecto WRCP Coupled Model Intercomparison Project CMIP5 (Taylor et al., 2012) con los resultados de modelos y observaciones regionales de contribución de hielo, disminución de aguas subterráneas y reajuste por isostasia glaciar, incluyendo efectos gravitacionales debidos a la redistribución de masa. Con una clara orientación a la gestión de los riesgos del cambio climático en la costa, este estudio ha tomado como referencia a fin de siglo los valores de ANMM correspondientes al RCP8.5. A mitad de siglo, dado que los valores de ANMM que arrojan los RCPs son muy similares, pues no es hasta pasado 2050 que las diferentes rutas de concentración de GEIs empiezan a divergir, se ha tomado como valor representativo la media del ensemble de todos los RCPs. La Tabla 1 (tercera y cuarta columna) muestra la variabilidad del cambio para los escenarios propuestas en los estuarios considerados. Como puede observarse, existe un gradiente creciente de este a oeste, muy pequeño a mitad de siglo y algo más acusado en 2100.

ESTUARIO	PMVE	Ensemble RCPs 2050	RCP8.5 2100
Eo	2.51 m	0.26 m	0.64 m
Villaviciosa	2.56 m	0.26 m	0.63 m
Santoña	2.64 m	0.24 m	0.59 m
Bidasoa	2.63 m	0.23 m	0.57 m

Tabla 1. Variabilidad de la MA y del ANMM correspondiente al RCP8.5 en los estuarios de estudio. Fuente : adaptado de Mills y Badcock (2011).





**M**EMORIA

Por otro lado, y aunque el caudal fluvial puede contribuir también a la inundación costera, en el caso de los estuarios objeto de estudio, éste es muy pequeño en comparación con la MA. En caso contrario, es decir, si los ríos fuesen caudalosos, sería necesario incluir tales caudales medios en el análisis.





## 4. EXPOSICIÓN

La exposición es una parte fundamental de la metodología y está vinculada a las características físicas de la región. Así, es fundamental definir de forma adecuada todos los elementos que configuran el tramo de costa objeto de estudio: playas, acantilados, defensas y encauzamientos, así como zonas intermareales. Para la realización de este trabajo, ha sido necesario disponer de Modelos Digitales de Terreno (MDT) y de datos de los usos del suelo.

## 4.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)

Los MDTs utilizados en este estudio han sido elaborados con datos LIDAR. En los estuarios del Eo, Villaviciosa y Santoña se ha usado el MDT del Instituto Geográfico Nacional (IGN) del año 2011 de 5 m de resolución horizontal (Figura 2).

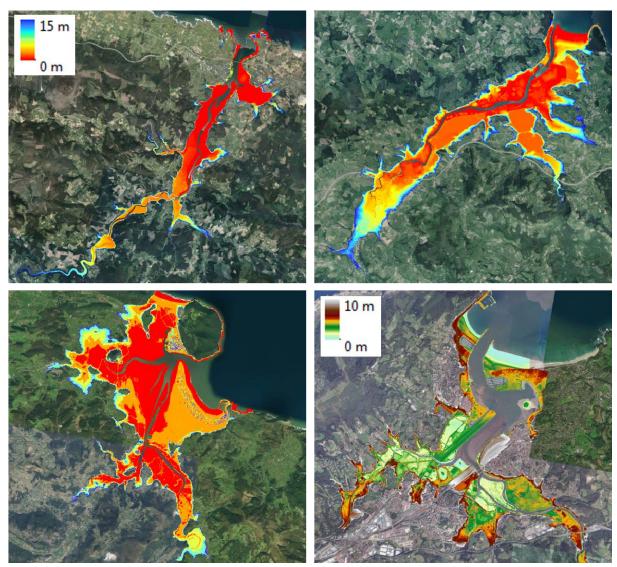


Figura 2. MDTs de los estuarios de estudio: Eo (arriba a la izquierda), Villaviciosa (arriba a la derecha), Santoña (abajo a la izquierda) y Bidasoa (abajo a la derecha).





Si bien se trata de un MDT de alta resolución, algunas indefiniciones han hecho necesario introducir las defensas de los puertos y rectificar algunos encauzamientos, entre otras mejoras. Por ejemplo, la Figura 3 (panel izquierdo) muestra el Puerto de Ribadeo, que se ha digitalizado a partir de los planos constructivos. En el caso de Villaviciosa (Figura 3, panel derecho), la zona intermareal se ha corregido empleando una batimetría que combina datos batimétricos del Servicio de Puertos e Infraestructuras del Transporte del Gobierno del Principado de Asturias, datos topográficos del Visor Cartográfico del Gobierno del Principado de Asturias (http://sitpa.cartografia.asturias.es) y medidas de campo efectuadas por IHCantabria en 2014 con el equipo *River Surveyor*. Dado que las playas de Santoña y Laredo son la antesala de núcleos urbanos frente a inundación, se han empleado los datos brutos del vuelo LIDAR para mejorar la resolución del frente marítimo, así como de las infraestructuras del Puerto de Laredo (Figura 4, panel izquierdo).

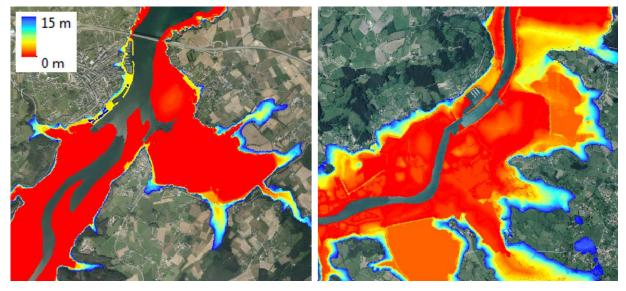


Figura 3. Detalle del MDT del Eo (izquierda) y Villaviciosa (derecha).

Para la caracterización física del estuario del Bidasoa, se ha usado el MDT del Gobierno del País Vasco de 1 m de resolución horizontal del año 2012 (http://www.geo.euskadi.eus) (Figura 2, panel inferior derecho). Dada la elevada resolución de los datos, el preproceso de los mismos ha sido mucho menor que en el resto de los casos, habiendo corregido ligeramente el encauzamiento del Canal de Amuteko en la zona más interior.





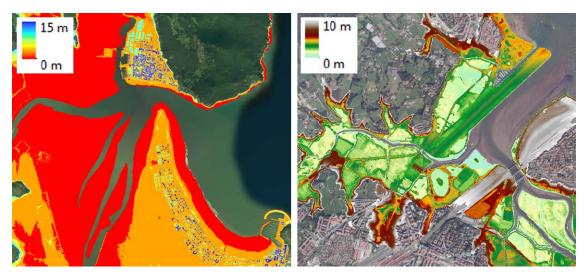


Figura 4. Detalle del MDT de Santoña (izquierda) y Bidasoa (derecha).

El límite de la interfaz agua-tierra de los MDTs corresponde a la línea de bajamar (BM), tomada del IGN y corregida en aquellas zonas en las que se ha dispuesto de datos batimétricos de detalle (Figura 2, Figura 3, Figura 4). Además, para una mayor eficiencia en la computación, se ha definido el área potencial de inundación como aquella por debajo de los 15 m para los MDTs de 5 m, y por debajo de los 10 m para el MDT de 1 m (Vafeidis et al., 2011).

La importancia de disponer de un MDT con la mejor definición posible radica en que las propias celdas de este MDT constituyen las subceldas de la malla de cómputo. De este modo, la calidad del MDT empleado condiciona la calidad de los resultados obtenidos.

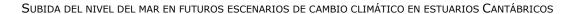
#### 4.2. Rugosidad de Manning

Dada la sensibilidad del modelo de inundación a la rugosidad de Manning, y teniendo en cuenta que la propia topografía ejerce de sub-elemento de la malla de cómputo, se ha asignado a cada una de las celdas del MDT un coeficiente de rugosidad de Manning. Este coeficiente, fundamental para el cálculo hidráulico, ha sido inferido a partir de los usos del suelo mayoritarios en cada celda (Tabla 2).

USO DEL SUELO	RUGOSIDAD DE MANNING
Área artificial	0.15
Área agrícola	0.07
Área boscosa y/o seminatural	0.09
Humedal	0.04
Cuerpo de agua	0.01

Tabla 2. Correspondencia entre los usos del suelo y el coeficiente de rugosidad de Manning.

La Figura 5 muestra la distribución espacial de los usos del suelo para cada uno de los estuarios de estudio. Para su caracterización se ha empleado la base de datos europea Corine Land Cover (2006). Esta base de datos proporciona información georreferenciada acerca de la cobertura y uso del territorio, tiene una resolución horizontal de 100 m y distingue, con tres niveles de detalle, entre superficies artificiales, agrarias, forestales y boscosas, humedales y masas de agua. Si bien en España existe desde 2005 el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) a escala 1:25000, estos







datos sobre los usos del territorio se encuentran en formato vectorial y no están

geolocalizados sino agregados con distintos porcentajes en una serie de polígonos, lo que no permite conocer la distribución de los distintos usos del territorio en el espacio.

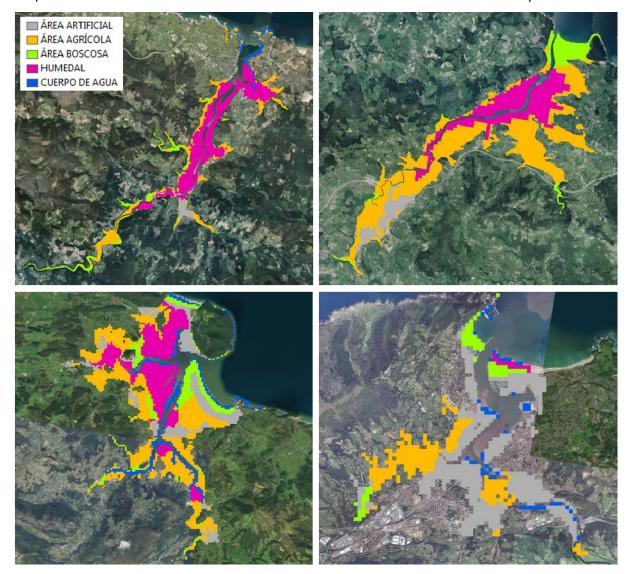


Figura 5. Distribución espacial de los usos del suelo en los estuarios de estudio: Eo (arriba a la izquierda), Villaviciosa (arriba a la derecha), Santoña (abajo a la izquierda) y Bidasoa (abajo a la derecha).

Como puede observarse en la Figura 5, Eo, Villaviciosa y Santoña tienen una amplia zona intermareal. La presencia de zonas agrícolas y boscosas es común en los cuatro estuarios, y Bidasoa es el más rigidizado, seguido de Santoña, que concentra dos núcleos urbanos importantes tras las playas de Santoña y Laredo.





## 5. MODELADO DE INUNDACIÓN

A continuación, se presenta una descripción técnica del modelo de inundación empleado para realizar la simulación hidráulica, el detalle de las mallas de cómputo elaboradas para dicha simulación y los resultados de los ejercicios de calibración realizados.

#### 5.1. Modelo de inundación

El modelo elegido para generar los mapas de inundación es RFSM-EDA (del inglés, *Rapid Flood Spreading Method - Explicit Diffusion wave with Acceleration term*), un modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado inicialmente en HR Wallingford que tiene la capacidad de ser eficiente a todas las escalas proporcionando profundidades de agua sobre el terreno y velocidades con tiempos de ejecución pequeños. Su algoritmo permite tener en cuenta rasgos característicos de la topografía, como crestas y puntos bajos, derivados de un MDT de alta resolución utilizando elementos computacionales relativamente grandes.

Las hipótesis de partida en las que se basa el modelo son las siguientes:

- El dominio puede ser dividido en depresiones topográficas discretas e hidráulicamente consistentes llamadas IZs (del inglés, *Impact Zones*)
- La cota de la superficie de agua en cada IZ es constante.
- La relación entre la cota de la superficie de agua y el volumen en una IZ puede ser definido por una relación no-histerética.
- El flujo entre dos IZs adyacentes se calcula linealmente a lo largo de la interfaz entre ellas, independientemente del resto de vecindades.
- La interfaz puede ser caracterizada mediante una relación nivel-anchura, donde se asume que la anchura aumenta cuando lo hace el nivel.

El modelo está basado en el método de almacenamiento de celdas y responde a una aproximación difusiva de las SWE (del inglés, *Shallow Water Equations*). Difiere del resto de modelos difusivos por incorporar un término adicional: la aceleración local (o inercia local), que proporciona mayor estabilidad y menores tiempos de ejecución (Bates et al., 2010).

La malla computacional que utiliza RFSM-EDA tiene como base la topografía subyacente y está formada por IZs, una serie de polígonos irregulares. Cada una de las IZs está compuesta por celdas (llamadas *Impact Cells*) que drenan al mismo punto bajo, conocido como Punto de Acumulación. Las interfaces entre IZs son crestas topográficas o puntos altos. La cota más baja de cada interfaz entre IZs corresponde al punto a través del cual el agua fluye entre celdas y se conoce como Punto de Comunicación (Figura 6 y Figura 7).





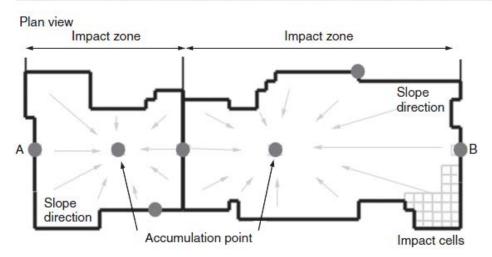
Profile view
Impact zone

Impact zone

Impact cells

Communication
point

Communication
point



Accumulation point

Figura 6. Representación conceptual de los Puntos de Acumulación y Comunicación en una IZ (Gouldby et al., 2008).

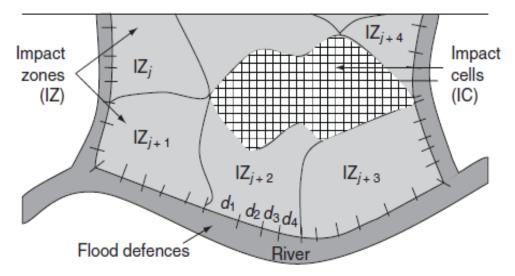


Figura 7. Representación conceptual de las IZs (Gouldby et al., 2008).





Durante la simulación hidráulica, el modelo recibe volúmenes de descarga en la llanura de inundación a través de cada IZ costera (Figura 8). Esos volúmenes de inundación se computan como la diferencia entre el nivel del mar del punto más cercano del conjunto de puntos en los que se ha reconstruido la serie de nivel y el correspondiente contorno.

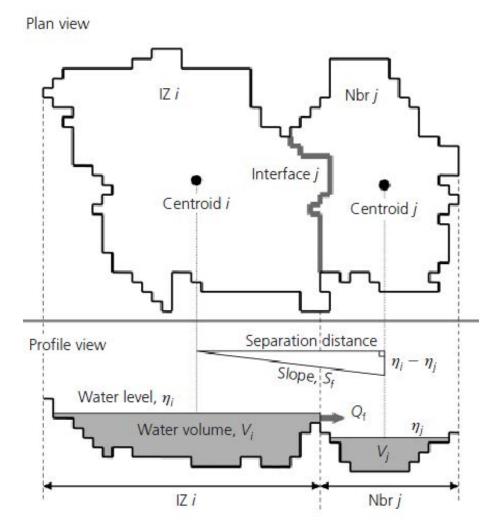


Figura 8. Representación conceptual de dos IZs adyacentes (Jamieson et al., 2012).

El flujo entre dos IZs (Figura 9) se calcula mediante la ecuación de momento:

$$Q_f^{t+\Delta t} = \sum_{p} \frac{\left(Q_p^t - g \cdot \Delta t \cdot A_p^t \cdot S_f^t\right)}{1 + g \cdot \Delta t \cdot n^2 \cdot \left|Q_p^t\right| / A_p^t \cdot \left(R_p^t\right)^{\frac{4}{3}}}$$
 Eq. 1

Donde  $Q_f$  es el flujo que pasa a través de la interfaz (m³/s),  $Q_\rho$  es el flujo en cada subelemento celda (m³/s),  $\Delta t$  es el paso de tiempo (s), g es la aceleración de la gravedad (m/s²),  $A_\rho$  es el área de la celda (m²),  $R_\rho$  es el radio hidráulico, que incluye fricción vertical y horizontal (m), n es el coeficiente de rugosidad de Manning y  $S_f$  es la pendiente de la superficie del agua, calculada como la diferencia entre niveles de IZs adyacentes dividida entre la distancia que separa sus centroides.





 $Q_{f} = \sum Q_{p}$   $Q_{1} \dots Q_{p} \dots Q_{n}$   $Z_{p-1}$   $Z_{p-1}$   $Z_{p}$   $Z_{p+1}$   $Q_{1} \dots Q_{p} \dots Q_{n}$   $R_{p} = A_{p}/P_{p}$   $P_{p} = \zeta_{p} + \Delta x$   $A_{p} = \Delta x(\eta_{f} - Z_{p})$ 

Figura 9. Representación conceptual de la sección transversal de una interfaz entre dos IZs adyacentes (Jamieson et al., 2012).

Una vez iniciada la simulación, ésta progresa mediante la aplicación de la ecuación de continuidad (ley de conservación de la masa) para cada IZ:

$$V_i^{t+\Delta t} = V_i^t + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^n Q_f^{t+\Delta t}$$
 Eq. 2

Donde  $V_i$  es el volumen de la  $IZ_i$  (m³) y n es el conjunto de IZs adyacentes. La estabilidad del modelo y, por tanto, su paso de tiempo adaptativo, están sujetos a la condición de Courant-Freidrichs-Lewy (CFL), que se satisface asegurando que el dominio de dependencia de las interfaces de una IZ no excede el área de la IZ. El máximo paso de tiempo admisible viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_{\max} = \alpha_{\min} \frac{A_i^t}{\sum_{j} w_f \cdot \max(||u_i^t|| + c_i^t, ||u_j^t|| + c_j^t)}$$
 Eq. 3

Donde a es el parámetro utilizado para escalar el paso de tiempo,  $A_i$  es el área de la  $IZ_i$  ( $m^2$ ),  $w_f$  es la anchura de la interfaz (m),  $u_i$  es la magnitud del vector velocidad de la  $IZ_i$  (m/s) y  $c_i$  es la celeridad de la onda (m/s). El hecho de que RFSM-EDA tenga como subelemento de la malla computacional la propia topografía es una ventaja y a la vez una limitación pues la resolución del MDT restringe la calidad y fiabilidad de los resultados del modelo.





## 5.2. Mallas de cómputo

Tras realizar diversos test y ajustar los parámetros de calibración pertinentes, se ha logrado obtener, para cada estuario de estudio, una malla de cómputo cuyas IZs se adaptan perfectamente a los accidentes topográficos relevantes y con un tamaño que permite el equilibrio entre el coste computacional y la estabilidad en la simulación. La Tabla 3 resume las características de las IZs de cada una de las mallas generadas.

ESTUARIO	TAMAÑO MÍNIMO	TAMAÑO MEDIO	TAMAÑO MÁXIMO
Ео	100 m <sup>2</sup>	2999 m²	7225 m <sup>2</sup>
Villaviciosa	100 m <sup>2</sup>	4500 m <sup>2</sup>	11225 m <sup>2</sup>
Santoña	75 m²	3014 m <sup>2</sup>	8200 m <sup>2</sup>
Bidasoa	75 m²	4512 m <sup>2</sup>	12700 m <sup>2</sup>

Tabla 3. Características de los elementos de las mallas de cómputo de los estuarios de estudio.

Las Figura 10 a Figura 17 muestran las mallas de cómputo generadas para simular la inundación en los estuarios de estudio.



Figura 10. Malla de cómputo para la simulación en el Eo.





Figura 11. Detalles de la malla de cómputo para la simulación en el Eo.

Dado que las mallas de cómputo tienen como sub-elemento la propia topografía, cada una de ellas abarca exactamente el área definida por cada uno de los MDTs, quedando delimitadas, por tanto, por la línea de BM y la cota 15 m, para los casos del Eo, Villaviciosa y Santoña, y 10 m en el Bidasoa. Las celdas visibles son las anteriormente denominadas IZs.



Figura 12. Malla de cómputo para la simulación en Villaviciosa.





Figura 13. Detalles de la malla de cómputo para la simulación en Villaviciosa.

Como puede observarse en los detalles de las mallas (Figura 11, Figura 13, Figura 15 y Figura 17), la naturaleza desestructurada de las mallas de cómputo permite que el contorno de las IZs se ajuste a cualquier cresta topográfica, pudiendo así representar de forma adecuada cauces, carreteras, infraestructuras y otros elementos característicos que puedan condicionar la propagación de la inundación en tierra.



Figura 14. Malla de cómputo para la simulación en Santoña.





Figura 15. Detalles de la malla de cómputo para la simulación en Santoña.

Otro aspecto importante que remarcar es que, dado que los MDTs están delimitados por la BM, las mallas de cómputo deben recoger cualquier elemento intermareal que esté emergido en BM (e.g., Figura 17, panel derecho). Esta tarea ha sido especialmente complicada en el Bidasoa, pues se trata de una bahía que ha sufrido notorias transformaciones (dragados y rellenos para acomodar las vías de comunicación).



Figura 16. Malla de cómputo para la simulación en el Bidasoa.







Figura 17. Detalles de la malla de cómputo para la simulación en el Bidasoa.

#### 5.3. Calibración del modelo

Con el fin de reducir la incertidumbre asociada al modelo de inundación, se ha realizado una calibración del mismo mediante la comparación de los resultados numéricos obtenidos y datos históricos. Se ha comparado la línea de pleamar (PM) generada por el modelo en el escenario base (PMVE) con la línea de PM del IGN, de la que se ha supuesto que corresponde también con la PMVE máxima histórica. Esto ha sido posible mediante la simulación de la PMVE sobre los MDTs cortados por la línea de BM, dando lugar a un área inundada cuyo contorno se ha relacionado con la línea de PM.

La línea de PM del IGN aparece solamente en la zona de aguas costeras, por lo que a partir del límite exterior de las aguas de transición se encuentra delimitada físicamente. En aquellos casos en que la línea de PM no recoge la totalidad del estuario, ha sido necesario analizar imágenes de satélite para prolongar la misma en las zonas intermareales del estuario.

En la Figura 18 se muestra la calibración de la PMVE en el Eo, donde se observa cómo la línea de PM (línea roja) aparece cortada a partir de la mitad del estuario. Como puede observarse, la inundación generada (mancha azul) se ajusta perfectamente al contorno de la PM, y se ha comprobado que la mancha de inundación de la parte inferior encaja con zonas de vegetación intermareal y apariencia "mojada" de imágenes de satélite.





MEMORIA

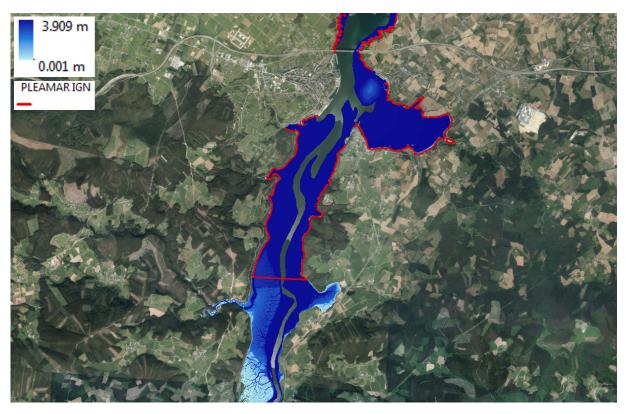


Figura 18. Calibración de la PMVE en el Eo.

La Figura 19 muestra la calibración de la PMVE en Villaviciosa. En este caso, la línea de PM del IGN recoge todo el estuario, lo que permite validar la extensión de la inundación por completo. Si bien en algunos puntos la inundación simulada sobrepasa levemente la línea de PM, se ha considerado un error asumible, pues se ha simulado la PMVE máxima histórica y el hecho de que la línea de PM del IGN corresponda de igual modo a la PMVE máxima histórica es sólo un supuesto.





**M**EMORIA

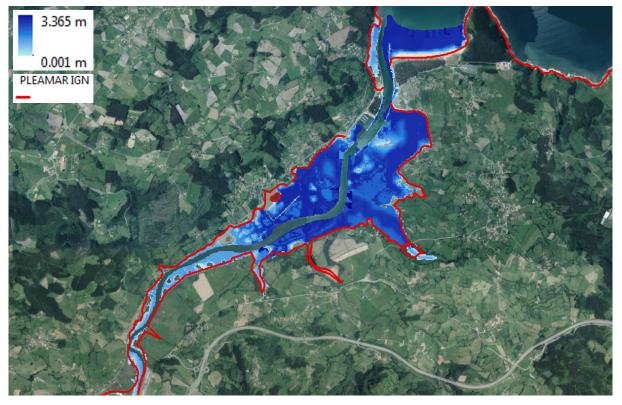


Figura 19. Calibración de la PMVE en Villaviciosa.

En la Figura 20 se muestra la calibración de la PMVE en Santoña. Si bien la línea del IGN se encuentra cortada en la parte izquierda del estuario, se observa cómo el área inundada está dentro de los límites de la PM. Nuevamente se han analizado imágenes de satélite para verificar que estas zonas inundadas se correspondan con zonas potencialmente inundables por la marea astronómica.



2.688 m



**M**EMORIA

0.001 m PLEAMAR IGN

Figura 20. Calibración de la PMVE en Santoña.

En el caso del estuario del Bidasoa no se disponía de la línea de PM del IGN, por lo que la validación se ha realizado únicamente con imágenes de satélite (Figura 21). No obstante, al ser un estuario fuertemente rigidizado, la extensión de zonas inundables por la marea astronómica es mucho menor que en el resto de los estuarios, como se puede observar en la Figura 21. La inundación de la Figura 21 (panel izquierdo) aparece solamente en playas y en zonas de naturaleza intermareal.



Figura 21. Calibración de la PMVE en el Bidasoa.





## 6. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para estudiar adecuadamente el impacto de la inundación como consecuencia del cambio climático es necesario definir escenarios que recojan posibles aumentos del nivel medio del mar. En este caso, como simplificación, se ha asumido que la MA es determinista.

Si bien los escenarios con los que habitualmente trabaja la comunidad científica son los propuestos por el IPCC, estos buscan acotar la incertidumbre y son poco conservadores. Es por ello por lo que, de cara a analizar los impactos y riesgos del cambio climático, es necesario tener también en cuenta los valores de aumento del nivel medio del mar que arrojan los modelos semi-empíricos, que son mucho más elevados, variando entre 1.5 y 2.5 m de aumento de nivel dependiendo del modelo considerado (Rahmstorf, 2007).

Con el fin de evaluar los cambios en la línea de PM por efecto del ANMM a medio y largo plazo (inundación permanente), se han considerado los horizontes temporales 2050 y 2100, respectivamente. Así, los escenarios propuestos son los siguientes (Tabla 4):

- <u>Escenario base</u>. Clima presente: inundación máxima correspondiente a la PMVE. Es el escenario que se ha empleado para la calibración del modelo.
- Escenario 1. Horizonte 2050: inundación máxima debida a un aumento del nivel medio del mar correspondiente al valor medio de un ensemble de RCPs a mitad de siglo (véase la Tabla 1) sobre la PMVE. El hecho de utilizar el valor medio de un ensemble de RCPs como valor representativo en 2050 se debe a que, hasta mitad de siglo, todos los RCPs arrojan estimaciones de ANMM muy similares.
- Escenario 2. Horizonte 2100: inundación máxima debida a un aumento del nivel medio del mar correspondiente al RCP8.5 a fin de siglo (véase la Tabla 1) sobre la PMVE.
- <u>Escenario 3</u>. Horizonte 2100: inundación máxima debida a un aumento del nivel medio del mar correspondiente a 1 m a fin de siglo sobre la PMVE.
- <u>Escenario 4</u>. Horizonte 2100: inundación máxima debida a un aumento del nivel medio del mar correspondiente a 1.5 m a fin de siglo sobre la PMVE.
- <u>Escenario 5</u>. Horizonte 2100: inundación máxima debida a un aumento del nivel medio del mar correspondiente a 2 m a fin de siglo sobre la PMVE.

HORIZONTE TEMPORAL	ESCENARIO	DESCRIPCIÓN	NIVEL DEL MAR
PRESENTE	BASE	MA	Máxima PMVE
2050	E1		Ensemble RCPs
	E2	MA + ANMM	RCP8.5
2100	E3		+1m
2100	E4		+1.5m
	E5		+2.5m

Tabla 4. Resumen de los escenarios de cambio climático considerados.





#### 7. RESULTADOS

A continuación, se presentan las imágenes de los resultados obtenidos. En cualquiera de los casos, se trata de inundaciones máximas (envolventes) sobre el nivel de PMVE máxima histórica. Así, para cada uno de los estuarios considerados, se muestran tres comparativas:

- 1) La inundación correspondiente a los escenarios base (PMVE) y RCP8.5 en 2050 (E1). Se muestra en las Figura 22, Figura 25, Figura 28 y Figura 31.
- 2) La inundación correspondiente a todos los escenarios cuyo horizonte es 2100: RCP8.5 2100 (E2), +1m (E3), +1.5m (E4) y +2m (E5). Se presenta en las Figura 23, Figura 26, Figura 29 y Figura 32.
- 3) El área inundada para los escenarios E1, E2, E3, E4 y E5 sobre la PMVE. Se corresponde con los mapas de las Figura 24, Figura 27, Figura 30 y Figura 33.

Con el fin de facilitar el análisis comparativo entre escenarios, para cada estuario, los mapas de inundación correspondientes a 1) y 2) se han representado con la misma leyenda.

#### 7.1. Eo

La Figura 22 muestra, en el panel izquierdo, la inundación máxima en el Eo para el escenario base (PMVE) y, en el panel derecho, la inundación máxima del escenario E1 (horizonte 2050). Como puede observarse, los cambios que va a sufrir el estuario a mitad de siglo serán pequeños. Aunque las diferencias en cuanto a extensión son prácticamente despreciables, la cota de inundación es, de media, del orden de 25 cm superior.



Figura 22. Inundación máxima en el Eo para los escenarios climáticos base (izquierda) y E1 (derecha).

En la Figura 23 se muestran las inundaciones en el Eo para los escenarios E2 (arriba a la izquierda), E3 (arriba a la derecha), E4 (abajo a la izquierda) y E5 (abajo a la derecha), que corresponden a fin de siglo. La inundación se va extendiendo hacia el interior del





estuario, en la zona aguas abajo del río Eo, y la cota de inundación se va incrementando conforme aumenta el nivel del mar.

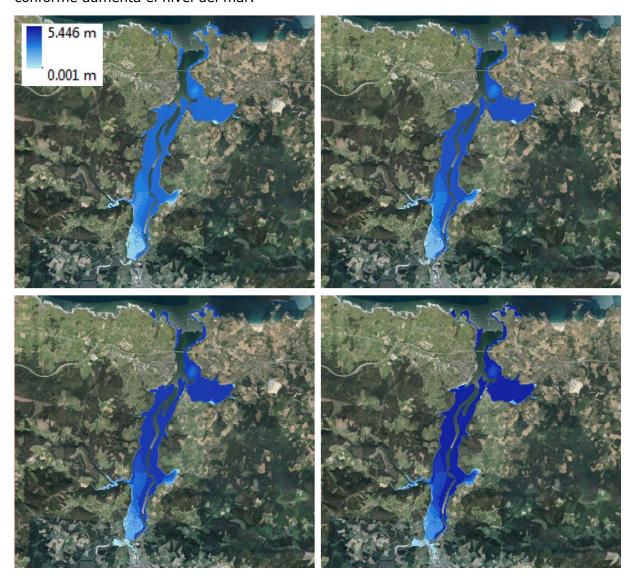
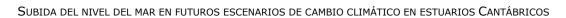


Figura 23. Inundación máxima en el Eo para los escenarios climáticos E2 (panel superior izquierdo), E3 (panel superior derecho), E4 (panel inferior izquierdo) y E5 (panel inferior derecho).

La Figura 24 muestra los cambios en la superficie máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en el Eo. Dado el confinamiento de este estuario, no se observan cambios sustanciales en el área inundada para ninguno de los escenarios. La extensión de la inundación para el escenario E1 (horizonte 2050) es muy similar a la producida por la PMVE máxima histórica, y sólo se incrementa en 12.53 ha, en su mayoría localizadas en la desembocadura del río Eo en el estuario, a la altura de Porto de Abaixo. El aumento de superficie inundada a fin de siglo con respecto a la PMVE máxima histórica oscila entre 3.61% para el E3 y 9.61% para el E5, lo que se traduce en 28.91 y 76.98 ha, respectivamente. En los dos escenarios más pesimistas (E4 y E5), la inundación se extiende hasta el núcleo de Vegadeo, en la zona más interior de la ría.







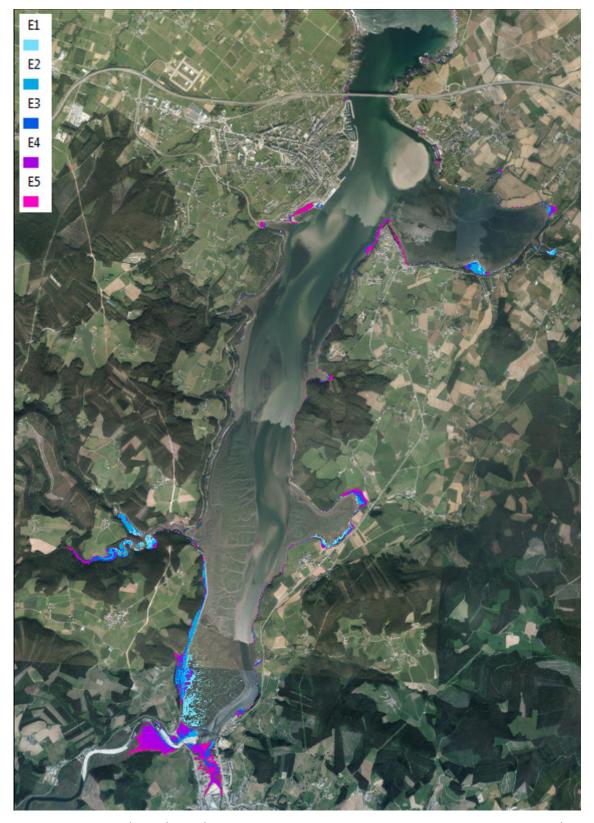


Figura 24. Comparación del área máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en el Eo.





#### 7.2. Villaviciosa

La Figura 25 muestra, en el panel izquierdo, la inundación máxima en Villaviciosa para el escenario base (PMVE) y, en el panel derecho, la inundación máxima del escenario E1 (horizonte 2050). Para una extensión de la inundación similar en el presente y a mitad de siglo, se observa una cota ligeramente mayor a mitad de siglo.



Figura 25. Inundación máxima en Villaviciosa para los escenarios climáticos base (izquierda) y 1 (derecha).

En la Figura 26 se muestran las inundaciones en Villaviciosa para los escenarios E2 (arriba a la izquierda), E3 (arriba a la derecha), E4 (abajo a la izquierda) y E5 (abajo a la derecha), que corresponden a fin de siglo. El principal cambio en los escenarios E2 y E3, respecto de los escenarios base y E1 (Figura 25), radica en la zona inundada que aparece aguas abajo del río Nabla. En los escenarios E4 y E5 esta mancha se va extendiendo hacia el interior.

También son importantes las inundaciones generadas en la zona interior del estuario, a la altura de la localidad de Villaviciosa, en los escenarios E4 y E5. Si se comparan los escenarios E2, E3, E4 y E5, se puede observar cómo las inundaciones incrementan su extensión desde la zona de Villaviciosa hasta el arroyo de Onón.





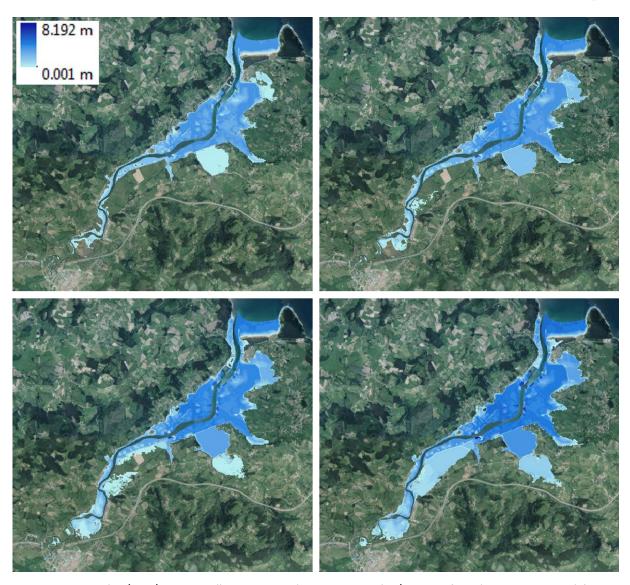


Figura 26. Inundación máxima en Villaviciosa para los escenarios climáticos E2 (panel superior izquierdo), E3 (panel superior derecho), E4 (panel inferior izquierdo) y E5 (panel inferior derecho).

La Figura 27 muestra los cambios en la superficie máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en Villaviciosa. El incremento de área inundada para el escenario de mitad de siglo (E1) con respecto a la PMVE máxima histórica es del 4.72% (13.86 ha). Para los escenarios cuyo horizonte temporal es 2100, y a medida que aumenta el nivel medio del mar, la inundación va extendiéndose por la margen derecha del estuario. La diferencia de área inundada entre los escenarios E2 y E3 difiere en 35.61 ha, lo que se traduce en aumentos del 3.47% y del 42.60% con respecto a la inundación de la PMVE máxima histórica, respectivamente. El escenario más pesimista arroja un incremento de 289.64 ha inundadas con respecto al escenario base, lo que supone un 98.68% más de superficie inundada, que en su mayoría corresponde a terrenos de uso agrícola.





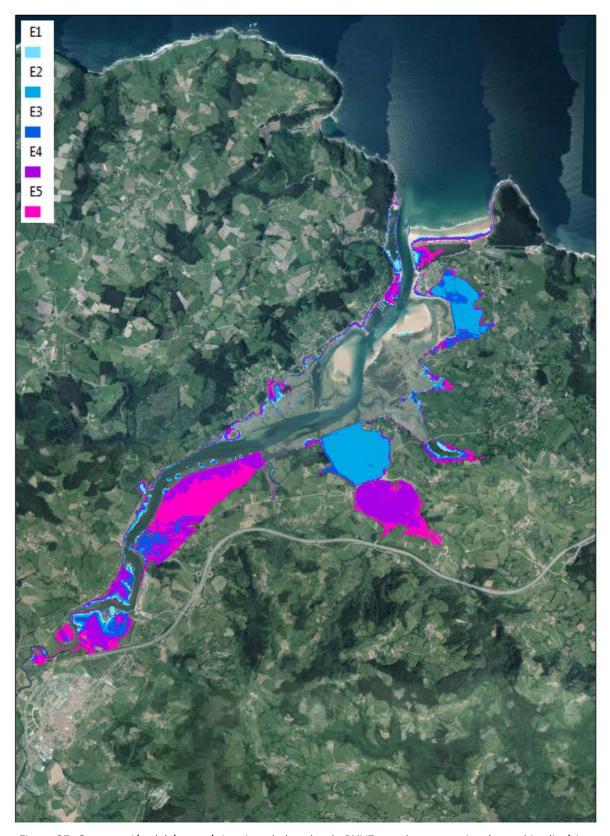


Figura 27. Comparación del área máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en Villaviciosa.





# 7.3. Santoña

La Figura 28 muestra, en el panel izquierdo, la inundación máxima en Santoña para el escenario base (PMVE) y, en el panel derecho, la inundación máxima del escenario E1 (horizonte 2050). Al igual que en el estuario de Villaviciosa, el perímetro de inundación del presente es similar al obtenido para mitad de siglo, pero la cota de inundación es, de media, del orden de 20 cm superior.



Figura 28. Inundación máxima en Santoña para los escenarios climáticos base (izquierda) y E1 (derecha).

En la Figura 29 se muestran las inundaciones en Santoña para los escenarios E2 (arriba a la izquierda), E3 (arriba a la derecha), E4 (abajo a la izquierda) y E5 (abajo a la derecha), que corresponden a fin de siglo. La inundación generada para el escenario E2 se va extendiendo hacia el interior, cubriendo la totalidad del parque natural de las marismas de Santoña. Esta inundación alcanza por el norte la localidad de Berria, por el oeste las localidades de Escalante y Bárcena de Cicero, entre otras, y por el sur y este las localidades de Limpias y Colindres, respectivamente. Además, como en el caso del resto de estuarios, a medida que se incrementa el aumento de nivel medio del mar de los escenarios, la cota de inundación aumenta también.





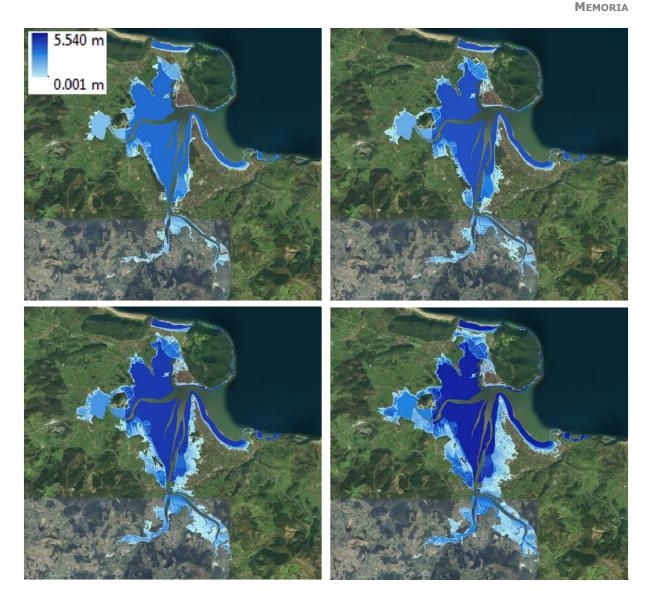
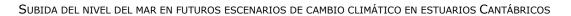


Figura 29. Inundación máxima en Santoña para los escenarios climáticos E2 (panel superior izquierdo), E3 (panel superior derecho), E4 (panel inferior izquierdo) y E5 (panel inferior derecho).

La Figura 30 muestra los cambios en la superficie máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en Santoña. El incremento de superficie inundada en el escenario E1 (horizonte 2050) con respecto al escenario base es muy pequeño, siendo inferior al 4%. A fin de siglo, los cambios son más significativos, llegándose a inundar entre 194.48 y 1211.35 ha más de las que se inundan en el escenario base, lo que se traduce en un porcentaje de aumento de entre el 12.49% y el 77.77%, para los escenarios E2 y E5, respectivamente. Como puede observarse, el incremento de área inundada se produce para los escenarios E2 y E3 de forma más o menos homogénea en las márgenes del estuario. Para los escenarios más pesimistas (E4 y E5), este aumento del área inundada es especialmente acusado al norte, en la Playa de Berria, y en la parte de Laredo más cercana a la desembocadura, además de zonas de uso agrícola localizadas en la región más interior del estuario.





MARE:

**M**EMORIA

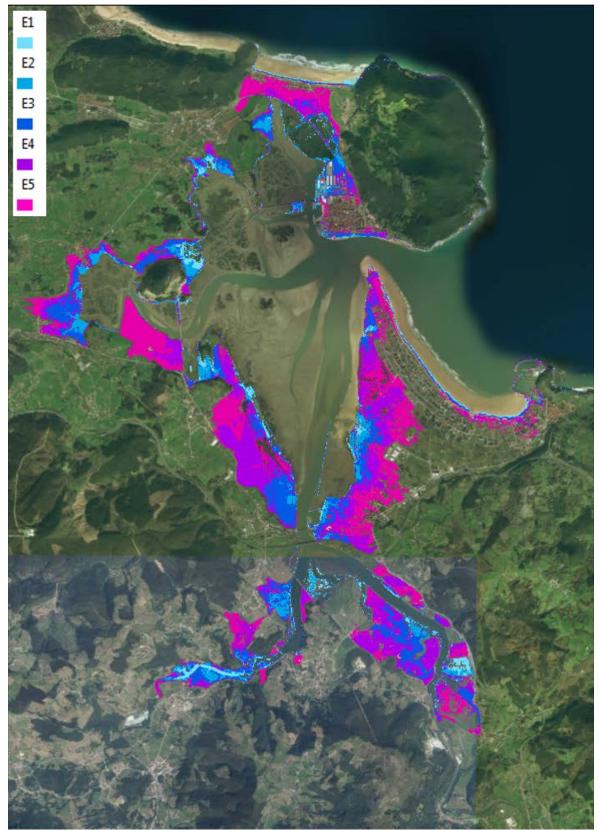


Figura 30. Comparación del área máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en Santoña.





# 7.4. Bidasoa

La Figura 31 muestra, en el panel izquierdo, la inundación máxima en el Bidasoa para el escenario base (PMVE) y, en el panel derecho, la inundación máxima del escenario E1 (horizonte 2050). Se observa una inundación de extensión similar en los dos escenarios, aunque con mayor cota en el escenario E1.



Figura 31. Inundación máxima en el Bidasoa para los escenarios climáticos base (izquierda) y E1 (derecha).

En la Figura 32 se muestran las inundaciones en el estuario del Bidasoa para los escenarios E2 (arriba a la izquierda), E3 (arriba a la derecha), E4 (abajo a la izquierda) y E5 (abajo a la derecha), que corresponden a fin de siglo. La gran urbanización de las zonas adyacentes al estuario hace que la inundación correspondiente a los escenarios más pesimistas (E4 y E5) alcance núcleos urbanos importantes. Por ejemplo, la inundación que se extiende hacia el este afecta especialmente a la localidad de Aldapa (Francia), mientras que la que se extiende hacia el oeste alcanza el municipio de Mendelu. Cabe destacar también la inundación del aeropuerto de San Sebastián para todos los escenarios a fin de siglo, siendo más acusada en los más pesimistas (E4 y E5).

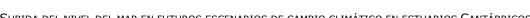




4.879 m
0.001 m

Figura 32. Inundación máxima en el Bidasoa para los escenarios climáticos E2 (panel superior izquierdo), E3 (panel superior derecho), E4 (panel inferior izquierdo) y E5 (panel inferior derecho).

La Figura 33 muestra los cambios en la superficie máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en el estuario del Bidasoa. Como ha ocurrido con el resto de los estuarios, los cambios en términos de superficie inundada que arroja el escenario a mitad de siglo (E1) son muy pequeños, situándose en el Bidasoa en torno al 8% de aumento (8.72 ha). Si bien la mayor parte del estuario está rigidizado y esto impide que el nivel del mar actual llegue a producir inundaciones, una vez superada la cota de la defensa actual por que el nivel medio del mar ha aumentado lo suficiente, el agua se propaga tierra adentro. Esto es lo que ocurre para los escenarios cuyo horizonte temporal es 2100. Para el escenario de +1 m de aumento del nivel medio del mar (E3) conlleva 110.06 ha inundadas por encima de la PMVE máxima histórica, lo que supone, en porcentaje, el doble del área correspondiente a la inundación de ese escenario base. La situación se agrava aún más para los escenarios de +1.5 m y de +2 m, en los que la superficie de inundación aumenta en un 171.78% y en un 258.62%, respectivamente.





SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR EN FUTUROS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ESTUARIOS CANTÁBRICOS

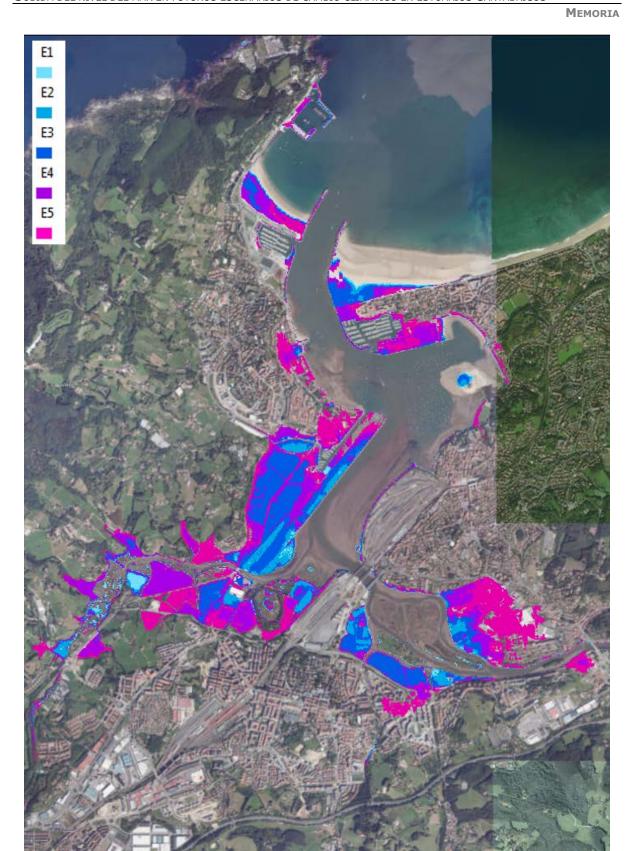


Figura 33. Comparación del área máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados en el Bidasoa.





### 8. CONCLUSIONES

La extensión de la mancha de inundación en los estuarios depende, además del escenario simulado, de los rasgos topográficos de cada región. En el caso del Eo, cuya ría tiene un cauce muy marcado, la inundación se mantiene dentro de los límites de la PMVE hasta que el nivel medio del mar aumenta de forma considerable (a partir de E2). En las zonas rigidizadas del estuario del Bidasoa, la lámina de agua sólo sobrepasa las defensas para los escenarios de fin de siglo, alcanzando, para estos mismos escenarios, algunos núcleos urbanos relevantes. A este respecto, el diseño e implementación de medidas de adaptación que garanticen la adecuación de la bahía a los niveles del mar futuros jugarán un papel especialmente relevante para evitar que aumenten los niveles de riesgo actuales. Por otro lado, los estuarios de Villaviciosa y Santoña disponen de amplias zonas intermareales, donde la inundación aumenta a falta de terrenos más altos o de estructuras que puedan frenar su expansión. A fin de siglo en Santoña, la inundación podría alcanzar los núcleos urbanos de Berria, Santoña y Laredo.

Con respecto a los cambios en la superficie máxima inundada sobre la PMVE para los escenarios de cambio climático considerados, y para cada uno de los estuarios de estudio, las Tabla 5 y Tabla 6 muestran un resumen de los resultados obtenidos. En términos de área afectada, y dado su elevado confinamiento, Eo es el estuario menos sensible a los aumentos del nivel medio del mar. Por otro lado, si bien Santoña es el estuario con mayor incremento de superficie inundada en todos los escenarios considerados, es el Bidasoa el que sufre un mayor porcentaje de aumento con respecto al área inundada en el escenario base, llegando a duplicarla con +1 m de subida del nivel medio del mar, y a triplicarla para el escenario más pesimista (+2 m). En el caso de Villaviciosa, aunque los cambios son apenas perceptibles a mitad de siglo, los cambios esperables en 2100 arrojan incrementos del área inundada de entre 30.97% y 98.68%.

ESTUARIO	E1	E2	E3	E4	E5
Ео	12.53 ha	28.91 ha	40.21 ha	61.17 ha	76.98 ha
Villaviciosa	13.86 ha	89.44 ha	125.04 ha	214.70 ha	289.64 ha
Santoña	59.86 ha	194.48 ha	444.68 ha	809.93 ha	1211.35 ha
Bidasoa	8.72 ha	36.56 ha	110.06 ha	186.53 ha	280.81 ha

Tabla 5. Hectáreas inundadas sobre la PMVE máxima histórica para cada uno de los escenarios considerados.

ESTUARIO	E1	E2	E3	E4	E5
Ео	1.56%	3.61%	5.02%	7.64%	9.61%
Villaviciosa	4.72%	30.47%	42.60%	73.15%	98.68%
Santoña	3.84%	12.49%	28.55%	52.00%	77.77%
Bidasoa	8.03%	33.67%	101.36%	171.78%	258.62%

Tabla 6. Porcentaje de área inundada con respecto a la PMVE máxima histórica para cada uno de los escenarios considerados.





#### SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR EN FUTUROS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ESTUARIOS CANTÁBRICOS

**M**EMORIA

Estos cambios en la extensión y en la cota de inundación permanente provocarán no sólo la perdida de zonas bajas, que quedarán completamente anegadas, sino que también tendrán incidencia sobre variables relevantes para los ecosistemas, como pueden ser la radiación solar, el pH o la salinidad. Además, el cambio climático afectará a los procesos físicos que tienen lugar en los estuarios, como es el llenado y el vaciado, la morfodinámica o incluso en la fricción.

Finalmente cabe puntualizar que, aunque este estudio se centra en evaluar la inundación permanente, existe otro tipo de inundación que es de carácter episódico y se debe a eventos extremos de cota de inundación (CI). Esta CI combina no sólo la MA y el ANMM sino también la MM y el run-up del oleaje, y puede verse exacerbada por avenidas extremas de caudal fluvial.





# **REFERENCIAS**

- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. Journal of Hydrology, 387(1–2), 33–45.
- Egbert, G. D., Bennett, A. F., & Foreman, M. G. G. (1994). TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. J. Geophys. Res., 99(C12), 24821–24852.
- Gouldby, B., Sayers, P., Mulet-Marti, J., Hassan, M., & Benwell, D. (2008). A methodology for regional-scale flood risk assessment. Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Water Management, 161(3), 169–182.
- Jamieson, S., Lhomme, J., Wright, G., & Gouldby, B. (2012). Highly efficient 2D inundation modelling with enhanced diffusion-wave and sub-element topography. Proc. Inst. Wat. Man., 165(10), 581–595.
- Mills, P., & Badcock, A. (2011). Preliminary Flood Risk Assessment Fluvial Flood Hazard Mapping Normal Depth Method (project).
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science, 315, 368–370.
- Slangen, A. B. A., Carson, M., Katsman, C. A., Wal, R. S. W. van de, Kohl, A., Vermeersen, L. L. A., & Stammer, D. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. Climatic Change, 124, 317–332.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(4), 485–498.
- Vafeidis, A., Neumann, B., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2011). Analysis of Land Area and Population in the Low-Elevation Coastal Zone (LECZ). UK's Government's Foresight Project, Migration and Global Environmental Change, Government Office for Science, London, UK.
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 109, 5–31.
- Wong, P. P., Losada, I. J., Gattuso, J. P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K. L., Saito, Y., & Sallenger, A. (2014). Coastal systems and low-lying areas. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), 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 (pp. 361–409). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



Un proyecto de:

**IH** cantabria

Con el apoyo de:







