KLIMA 2050 BASQUE COUNTRY
ekintzak - acciones

Convocatoria Klimatek 2020-21

Modelización piloto de los efectos del cambio climático en el estuario del Oka, Bizkaia, para la determinación de las medidas de adaptación a tomar en los estuarios vascos (OKAKLIMA)

Resumen ejecutivo



KLIMA 2050 BASQUE COUNTRY
ekintzak - acciones

Proyecto Klimatek 2020-21

Modelización piloto de los efectos del cambio climático en el estuario del Oka, Bizkaia, para la determinación de las medidas de adaptación a tomar en los estuarios vascos (OKAKLIMA)

Resumen ejecutivo

ihobe
ingurumen hobekuntza
mejora ambiental

Herri-baltzua
Sociedad Pública del
EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO
EKONOMIAREN GARAPEN, JASANGARRITASUN ETA INGURUMEN SAILA
DEPARTAMENTO DE DESARROLLO ECONÓMICO, SOSTENIBILIDAD Y MEDIO AMBIENTE

©
Ihobe, Ingurumen Jarduketarako Sozietate Publikoa
Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental

EDITA:
Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental
Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente
Gobierno Vasco

Alda. de Urquijo n.º 36-6.ª (Plaza Bizkaia)
48011 Bilbao

info@ihobe.eus
www.ihobe.eus

EDICIÓN:
Mayo 2023

CONTENIDO:
Este documento ha sido elaborado por AZTI, gracias a la financiación recibida en el marco de la convocatoria 2020-21 de Ayudas Klimatek I+B+G para la realización de proyectos I+D, Innovación y demostración en adaptación al cambio climático.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración prestada en la realización de este trabajo

— a la Diputación Foral de Gipuzkoa por la ayuda Fellows Gipuzkoa,
— al Área de Conocimiento de Medio Físico de Puertos del Estado por los datos de clima marítimo,
— a la Agencia Vasca del Agua (URA) por los datos de caudales, y
— al Servicio de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, por la coordinación científica y por los datos aportados al proyecto.

Índice

Antecedentes **07**

Resumen ejecutivo **08**

01. Introducción y contexto **10**

02. Objetivos y metodología **11**

03. Situación actual y escenario de referencia basado en un análisis histórico **13**

3.1. Clima marítimo 13
3.2. Análisis de los procesos hidro-sedimentarios 14
3.3. Análisis de la evolución morfológica macro-escala 16

04. Escenarios futuros basados en proyecciones climática **20**

4.1. Escenarios de cambio climático 20
4.2. Evolución del estuario 22

05. Modelo de funcionamiento y resultados clave **24**

06. Líneas a seguir para definir las medidas de adaptación en los estuarios vascos **26**

6.1. Programa de seguimiento: datos de observación y herramientas numéricas 26
6.2. Hacia las medidas de adaptación 27
6.3. Aplicabilidad del estudio a otros estuarios en el País Vasco 28

07. Referencias **29**

Antecedentes

En el marco de la Estrategia KLIMA 2050 y del Plan de Transición Energética y Cambio Climático 2021-2024, desde la Administración Pública Vasca se impulsan proyectos que contribuyan a la innovación y demostración en materia de adaptación al cambio climático. El desarrollo de una gobernanza climática efectiva debe basarse en el conocimiento que derive de la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación.

El Plan de Transición Energética y Cambio Climático 2021-202 en su línea de actuación 7 incluye fomentar la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación. De acuerdo con lo recogido en esta línea de actuación, se pretende aprovechar las oportunidades del cambio climático y estimular una industria orientada a la generación de nuevos productos, nuevos procesos productivos y servicios ligados a la adaptación, así como impulsar la generación y transferencia de conocimiento científico.

La iniciativa "KLIMATEK: Proyectos I+D, Innovación y Demostración en Adaptación al Cambio Climático en Euskadi" se puso en marcha en 2016 con el objeto de desarrollar un proceso de carácter innovador de gobernanza e implementación de políticas ambientales en el ámbito de la adaptación al cambio climático.

Los estuarios constituyen enclaves ecológicos de gran importancia para el territorio al que pertenecen. En ellos podemos encontrar una gran diversidad de elementos relevantes de la biodiversidad. Los hábitats de los estuarios son algunos de los hábitats más frágiles y amenazados del País Vasco debido a diversos usos, que en algunos casos provocan cambios profundos, en detrimiento de su calidad ecológica.

El valle y estuario de la ría de Urdaibai constituye un espacio natural muy valioso por la diversidad y originalidad de los recursos naturales que contiene. Este espacio de gran valor ecosistémico fue declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO en el año 1984, a propuesta del Gobierno Vasco. Este hito puso de manifiesto el interés de la comunidad científica en la relevancia de la protección de esta área.

La cuenca de Urdaibai se halla sometida a una importante presión por parte de las actividades humanas y la profunda transformación del entorno del estuario agravado por los impactos de cambio climático. Dada su vital relevancia, resulta necesario armonizar el desarrollo de esta zona con la conservación del patrimonio y los recursos naturales en un contexto del cambio climático.

El estudio "Modelización piloto de los efectos del cambio climático en el estuario del Oka, Bizkaia, para la determinación de las medidas de adaptación a tomar en los estuarios vascos" – proyecto OKAKLIMA – correspondiente a la convocatoria Klimatek 20-21 presenta una evaluación de los efectos inducidos por el cambio climático en la dinámica de los estuarios del País Vasco, centrándose en el estuario del Oka como zona piloto. Este estudio sirve como punto de partida a la hora de determinar las medidas de adaptación a tomar para incrementar la resiliencia de los estuarios ante el cambio climático.

Resumen ejecutivo

El objetivo general del estudio de "**Modelización piloto de los efectos del cambio climático en el estuario del Oka, Bizkaia, para la determinación de las medidas de adaptación a tomar en los estuarios vascos**" - proyecto **OKAKLIMA** - es hacer una evaluación de los efectos inducidos por el cambio climático en la dinámica de los estuarios del País Vasco, centrándose en el estuario del Oka como zona piloto. Esta primera etapa resulta fundamental para determinar las medidas de adaptación a tomar para incrementar la resiliencia de los estuarios ante el cambio climático.

Se ha definido una metodología de análisis novedosa que combina el uso de dos tipos de modelos numéricos (Figura 1): un modelo numérico basado en procesos hidro-sedimentarios, que permite parametrizar el transporte litoral y mareal, y analizar la inundación del estuario para distintos escenarios, y un modelo numérico morfológico de macro-escala, para determinar la evolución del volumen de los elementos morfológicos del estuario a largo plazo. El forzamiento principal de los modelos proviene de series históricas de oleaje, marea, y caudales, y de tasas de aumento de nivel del mar (ANM) basadas en reconstrucciones geológicas e históricas, y en proyecciones climáticas del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Esta metodología, se ha utilizado para simular la respuesta del estuario ante el ANM en el pasado, validando los resultados con sondeos existentes y para estudiar distintos escenarios climáticos futuros. Se han obtenido los siguientes resultados clave.

Los análisis sedimentológicos evidencian un relleno transgresivo del estuario. Las simulaciones numéricas realizadas confirman este resultado (Figura 7). En particular, se obtiene que, con una tasa de ANM representativa del aumento medio observado durante el siglo XX (1.7 mm/año), todos los elementos del estuario, incluyendo las marismas naturales, presentan acreción y ajustan su cota al ANM.

Considerando un ANM exponencial como es el caso de las últimas proyecciones climáticas del IPCC, los resultados del modelo indican que las tasas de sedimentación no serían suficientes para compensar el ANM, en ninguno de los escenarios estudiados (Figura 11). Se han considerado los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Dichos escenarios representan un nivel intermedio y alto de emisiones, respectivamente, y las tasas medias de ANM asociadas, para los años 2080-2100, son de 7.7 y 12.1 mm/año. El déficit de sedimento en el estuario podría provocar la reducción de la protección natural del sistema frente a la erosión y la inundación costera, siendo mayor en los escenarios de emisiones altas.

En el caso de las marismas, estos resultados basados en las tasas de ANM que reflejan las proyecciones climáticas indican que su hidroperiodo, tiempo en que permanecen inundadas, se incrementaría (Figura 12). Este desequilibrio en las marismas puede tener una implicación severa sobre la evolución y extensión de las especies presentes en las marismas del futuro. Además, el efecto de los muros que constriñen el estuario y frenan el desarrollo horizontal de las marismas y otros factores externos como el aumento de temperatura, amplificarían el desequilibrio.

Se ha demostrado asimismo de acuerdo con los resultados del proyecto el papel de unas marismas en buen estado para el equilibrio del estuario (Figura 8). El modelo de marismas implementado tiene en cuenta los procesos de retención de sedimento, la bio-producción y las interacciones entre especies, y se ha calibrado con datos de distribución de especies y de sondeos cortos. Asumiendo un escenario de marismas inactivas (degradación de las marismas por causas externas), la sedimentación en el estuario se reduciría; aumentando, por lo tanto, el desequilibrio y reduciéndose la protección natural del sistema frente a la inundación costera.

La reapertura y restauración de las marismas que han sido ocupadas o cerradas en el pasado, además de liberar espacio permitiendo la transgresión natural del estuario, contribuyen a una mayor sedimentación en el estuario, aumentando su resiliencia al cambio climático (Figura 9). Se ha simulado un episodio de reapertura de marismas similar al ocurrido tras la desocupación del estuario de la segunda mitad del siglo XX. Las tasas de sedimentación obtenidas en las marismas en regeneración son hasta un orden de magnitud mayor que en las marismas naturales, lo cual guarda correspondencia con los datos obtenidos del análisis de los datos obtenidos en los sondeos.

Los resultados sugieren que las herramientas de modelización desarrolladas son adecuadas para determinar la respuesta del estuario ante el ANM y el efecto de actuaciones humanas de adaptación como la reapertura de marismas (Figura 14) y que, por lo tanto, se pueden utilizar para diseñar estrategias de adaptación al cambio climático.

Dichas acciones se tienen que enmarcar en un programa de seguimiento de los estuarios del País Vasco (Sección 6.1). Formaría parte de las líneas a seguir para definir y monitorizar las medidas de adaptación al cambio climático y para evaluar y mejorar la resiliencia de los estuarios del País Vasco.

Las medidas de adaptación al cambio climático son diversas (Tabla 5) y deben actuar de manera combinada a través de un plan específico para el área de interés, en este caso el estuario del Oka.

Las herramientas desarrolladas se pueden aplicar también en otros estuarios del País Vasco (Sección 6.3). Sin embargo, será necesario realizar un análisis específico para identificar con mayor precisión la información disponible en todos los estuarios vascos y las carencias que cubrir en cada caso.

01

Introducción y contexto

El estuario del río Oka está situado en Bizkaia, en el sureste del Golfo de Vizcaya, en el ámbito de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, declarada por la UNESCO en 1984. Los procesos que gobiernan el estuario del Oka han sido estudiados durante los últimos veinte años por el Servicio de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, el grupo de Geología litoral de la UPV/EHU y por AZTI principalmente.

Debido a los estudios realizados hasta ahora, existe una gran cantidad de información científica disponible. Sin embargo, esta información debe ser integrada y ordenada de una manera coherente utilizando para ello la modelización del funcionamiento de sus procesos. Una vez establecido el modelo de funcionamiento general del estuario del Oka se podrá estar en disposición de predecir su evolución inducida por el cambio climático en curso y así, poder establecer las medidas de adaptación al mismo necesarias. Estas medidas basadas en reducir la vulnerabilidad ante estos impactos se plantean con el objetivo de prevenir los impactos del cambio climático y aumentar su resiliencia.

La toma de medidas de acción para la adaptación al cambio climático es un objetivo alineado con la Estrategia Vasca frente al Cambio Climático con el horizonte puesto en 2050. Se pretende impulsar un modelo socioeconómico que minimice la vulnerabilidad frente al cambio climático y que nos permita avanzar hacia una economía sostenible. La Estrategia está alineada con la Estrategia Europea de Adaptación y los impactos del cambio climático previsibles en Euskadi y tiene como objetivo asegurar la resiliencia del territorio vasco al cambio climático.

Asimismo, el Programa Marco Ambiental (PMA) marca el rumbo y coordina las actuaciones en materia de medio ambiente del Gobierno Vasco. De la misma manera el PMA analiza y traslada las políticas europeas a nuestro territorio y, armoniza, orienta y se corresponsabiliza con la administración local en la coordinación y priorización de las políticas a implantar en los próximos años. Entre las novedades del programa se encuentra la implantación de una política ambiental preventiva que sustituya a la política reactiva tradicional y la búsqueda de la rentabilidad económica de la inversión realizada en medio ambiente durante los últimos 30 años.

02

Objetivos y metodología

El objetivo general del estudio de "**Modelización piloto de los efectos del cambio climático en el estuario del Oka, Bizkaia, para la determinación de las medidas de adaptación a tomar en los estuarios vascos**" - proyecto **OKAKLIMA** - es hacer una evaluación de los efectos inducidos por el cambio climático en la dinámica de los estuarios del País Vasco, centrándose en el estuario del Oka como zona piloto. Esta primera etapa resulta fundamental para determinar las medidas de adaptación a tomar para incrementar la resiliencia de los estuarios ante el cambio climático.

Se ha definido una metodología de análisis novedosa que consiste en el uso combinado de **un modelo numérico basado en procesos hidro-sedimentarios**, que permite parametrizar el transporte litoral y mareal y analizar la inundación del estuario para distintos escenarios, y **un modelo numérico morfológico de macro-escala** para determinar la evolución del volumen de los elementos morfológicos del estuario a largo plazo (Figura 1). El forzamiento principal de los modelos proviene de series históricas de oleaje, marea y caudales, y de tasas de aumento de nivel del mar (ANM) basadas en reconstrucciones geológicas e históricas y en proyecciones climáticas del IPCC. Esta metodología, se ha utilizado para simular la respuesta del estuario ante el ANM en el pasado, validando los resultados con sondeos existentes y para estudiar distintos escenarios climáticos futuros (Garnier et al., 2022).

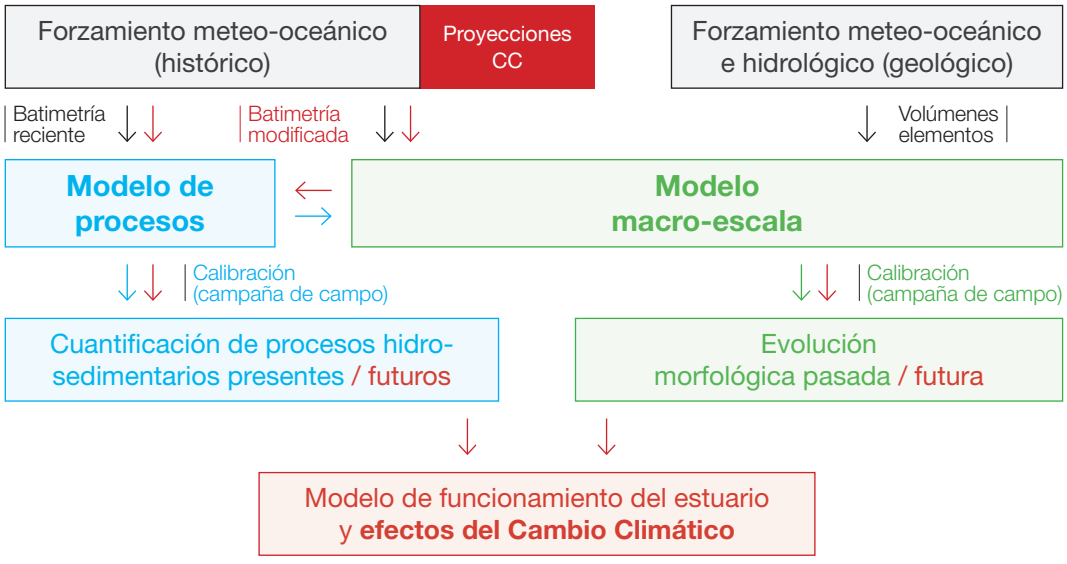

Figura 1. Esquema del marco conceptual del proyecto OKAKLIMA.

A continuación, se presentan los resultados principales del proyecto de la siguiente manera:

— **Situación actual y escenario de referencia basado en el análisis histórico.** A partir de condiciones climáticas actuales, y de análisis históricos de datos climáticos y geomorfológicos, se estudian los procesos que gobiernan la dinámica del estuario y su respuesta al aumento del nivel del mar estimado con las observaciones del siglo XX.

— **Escenarios futuros basados en proyecciones climáticas.** Se analiza la respuesta del estuario al cambio climático para distintos escenarios climáticos basados en las últimas proyecciones del IPCC (AR6, Fox-Kemper et al., 2021).

— **Modelo de funcionamiento y resultados claves.** Se presenta el modelo de funcionamiento del estuario y se destacan los resultados claves.

— **Líneas a seguir para definir las medidas de adaptación en los estuarios vascos.** Se plantea la necesidad de un programa de seguimiento de los estuarios, se propone un catálogo provisional de medidas de adaptación y se muestra la aplicabilidad del estudio a otros estuarios del País Vasco.

03

Situación actual y escenario de referencia basado en un análisis histórico

3.1. Clima marítimo

Se ha realizado un análisis de los datos de clima marítimo que son relevantes para el uso y la calibración de los modelos numéricos. A continuación, se presenta la caracterización del oleaje y del nivel del mar (suma de la marea astronómica y meteorológica) en la zona de estudio.

Se han analizado los 30 años de datos de oleaje de la Boya de Bilbao - Vizcaya de Puertos del Estado localizada a la posición (43.63°N, 3.04°O) en profundidades indefinidas para llevar a cabo la caracterización estadística del oleaje, junto al análisis del régimen medio y del régimen extremal del mismo.

Como resumen del estudio de la caracterización del oleaje en la boya de Bilbao-Vizcaya, se considerarán las siguientes condiciones de contorno para los modelos numéricos (Tabla 1):

- Periodo de calmas, sin oleaje, para poder caracterizar el efecto de la marea sobre la morfodinámica del estuario (Hs=0).
- Oleaje en condiciones medias, obtenido a partir de un régimen medio ($Hs=Hs_{50}$).
- Oleaje en condiciones de temporal (el temporal del año, $Hs=Hs_{12}$).
- Oleaje en condiciones extremales, como, por ejemplo, el oleaje correspondiente a un periodo de retorno de 100 años ($Hs=Hs^{100}$).

Evento	Hs	Tp	Dir
Periodo de calmas	0		
Oleaje medio, $Hs=Hs_{50}$	1.60 m	10 s	300º
Temporal del año, $Hs=Hs_{12}$	8.10 m	13 s	300º
Oleaje extremal, $Hs=Hs^{100}$	13.60 m	16 s	300º

Tabla 1. Características principales de las condiciones de oleaje estudiadas.

Se entiende por nivel del mar la posición media de la superficie libre del mar una vez filtradas las oscilaciones de onda corta y onda larga asociadas al oleaje de viento y grupos de ondas. Una vez filtradas dichas oscilaciones, las oscilaciones resultantes son causadas por movimientos de largo periodo asociados a la meteorología y a los movimientos astronómicos:

— La oscilación del nivel medio del mar, asociada a la evolución de los sistemas meteorológicos, tiene carácter aleatorio y se denomina marea meteorológica (MM).

— La oscilación del nivel asociada a los movimientos astronómicos tiene carácter determinista y se le denomina marea astronómica (MA).

La combinación estadística de ambas mareas es lo que se denomina régimen del nivel del mar. Se realizó un estudio de nivel del mar incluyendo un análisis armónico de la marea astronómica y un análisis de régimen extremal de la marea meteorológica, con los 30 años de datos del mareógrafo de Bilbao.

Como resumen del estudio de la caracterización del nivel del mar en el mareógrafo de Bilbao, se considerarán las condiciones siguientes como condiciones de entrada para los modelos numéricos (Tabla 2):

— Marea astronómica correspondiendo a las mareas muertas medias (MA=MA_{PMMM}=3.13 m), sin marea meteorológica (MM=0).

— Marea astronómica correspondiendo a las mareas vivas medias (MA=MA_{PMVM}=4.27 m), sin marea meteorológica (MM=0).

— Nivel del mar extremo, con un nivel máximo (cota de inundación, CI) correspondiendo a un periodo de retorno de 100 años (CI=CI_{100}). Se considera que coincide con una marea meteorológica extremal (MM=MM_{100}).

3.2. Análisis de los procesos hidro-sedimentarios

Uno de los objetivos del proyecto es analizar los procesos hidro-sedimentarios que controlan la evolución reciente del estuario del Oka. La modelización numérica llevada a cabo mediante modelos numéricos orientados a procesos permite determinar los procesos físicos que gobiernan la dinámica de las distintas zonas del estuario. En particular, se puede determinar en qué zona domina la acción del oleaje o de la marea.

Se utiliza el modelo numérico de procesos DELFT3D (Roelvink y Van Banning, 1995) que permite analizar los flujos, corrientes, transportes sedimentarios y cambios morfológicos inducidos por la acción combinada de la marea y del oleaje. El modelo se compone de dos módulos: un modelo hidro-morfodinámico (FLOW) y el modelo de oleaje (WAVE) que proviene del modelo espectral SWAN (Booij et al., 1997).

Las condiciones de entrada consisten esencialmente en datos de forzamiento con variables meteo-oceánicas (oleaje/marea) a partir de los datos de la boya y del mareógrafo analizados anteriormente y de datos topo-batimétricos de alta resolución. La configuración del modelo es similar a la configuración utilizada por Monge-Ganuzas et al., 2018, donde se usaron dos mallas de cálculo para el oleaje, y una malla curvilínea de una resolución de hasta 10 m para el modelo hidro-morfodinámico. El modelo se ha calibrado y validado con las dos últimas campañas de campo: la campaña de mareógrafos del 2011, y la campaña de campo del 2015 para el seguimiento de las actuaciones en la playa de Laida.

Los resultados muestran una zona de concentración del oleaje entre el puerto de Bermeo y la isla de Ízaro, en cualquier momento de la marea. Es un resultado típico para todas las direcciones de oleaje dominante en la zona (WNW y NW); pero también, para todos los oleajes provenientes del cuadrante W-N. Los resultados indican que toda la energía del oleaje se disipa en el estuario inferior,

Evento	MA	MM	CI
Mareas muertas, sin marea meteorológica	3.13 m	0	3.13 m
Mareas vivas, sin marea meteorológicas	4.27 m	0	4.27 m
Nivel del mar extremo	4.40 m	0.47 m	4.87 m

Tabla 2. Características principales de las condiciones de mareas estudiadas. Nivel del mar total máximo (cota de inundación, CI), contribución de la marea astronómica (MA), y de la marea meteorológica (MM).

en la barra de Mundaka y en la playa de Laida, tanto para condiciones medias como para condiciones extremas (Figura 2).

El modelado de procesos hidro-sedimentarios calcula el nivel del mar en cada instante, y, por lo tanto, las celdas secas e inundadas de la malla de cálculo. Estos resultados permiten determinar el nivel del mar máximo alcanzado durante un ciclo de marea y la zona del estuario que ha sido inundada.

Se han calculado las superficies inundadas en condiciones extremas, considerando niveles extremos de marea (con una cota de inundación correspondiendo a un nivel de 100 años de periodo de retorno) coincidiendo con oleaje de temporal (Figura 3). Los estudios previos realizados en el estuario del Oka, como la mayoría de los estudios de inundación en estuarios, no tienen en cuenta los efectos del oleaje. En este proyecto, se muestra que el oleaje genera una sobreelevación considerable, del orden de 5% de la altura de ola significante, lo que representa cerca de 0.8 m para un oleaje extremal. La superficie inundada obtenida en condiciones extremas es de 663 ha, valor que servirá de referencia para el análisis de cambio climático.

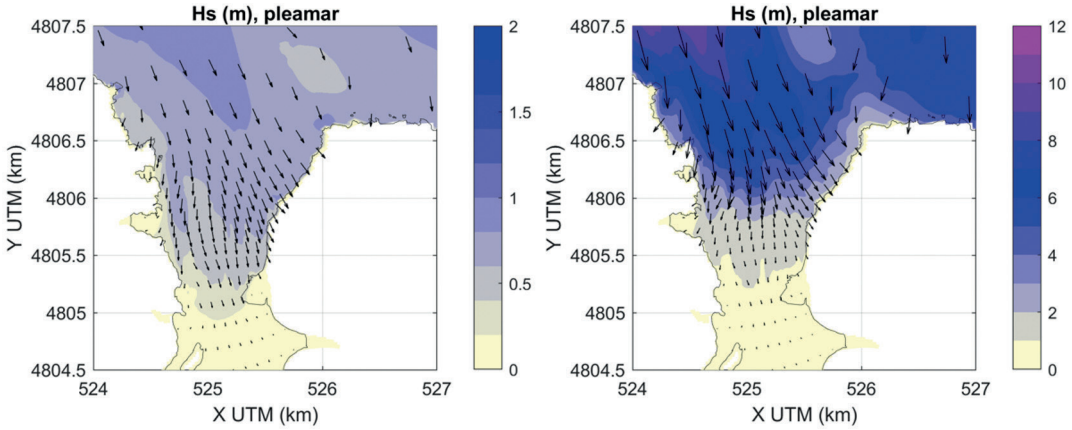

Figura 2. Propagación del oleaje en el estuario inferior. Condiciones medias de oleaje (Hs=Hs_{50}=1.6 m, Tp=10 s, Dir=300º) y condiciones de oleaje extremal (Hs=Hs^{100}=13.60 m, Tp=16 s, Dir=300º), en pleamar de marea vivas medias. Los colores indican la altura de ola significante Hs. Los vectores indican la dirección de propagación del oleaje.

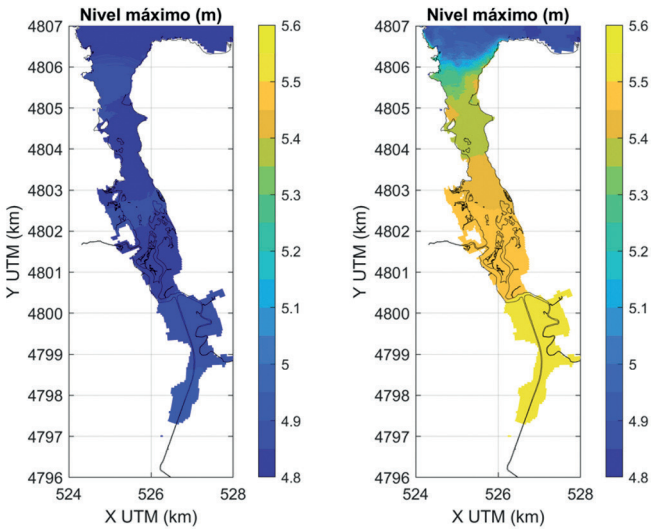

Figura 3. Resultados de nivel del mar en condiciones de nivel del mar extremo (CI=CI_{100}=4.87 m). El panel de la izquierda muestra un caso hipotético sin oleaje, el panel de la derecha muestra un caso de condiciones de oleaje extremal (Hs=Hs^{100}=13.60 m, Tp=16 s, Dir=300º). Los colores indican el nivel del mar máximo obtenido durante un ciclo de marea, la misma escala de color se ha utilizado en los dos paneles.

Se han calculado las velocidades de corriente máximas representativas para cada elemento del estuario en condiciones medias de oleaje durante mareas vivas, con valores máximos obtenidos en el canal principal (velocidades de 1.4 m/s, Figura 4). Además, se obtuvieron los valores de transporte sedimentario medio anual entre los elementos, caracterizados por un transporte del orden de 10^5 m^3/año entre la barra de Mundaka y la playa de Laida. Estos resultados se han utilizado como condiciones de entrada para el modelado morfológico.

3.3. Análisis de la evolución morfológica macro-escala

Para entender la evolución morfológica del estuario del Oka a largo-plazo y tener una herramienta que pueda predecir los cambios futuros en el equilibrio del estuario, se realizó un análisis de la evolución actual y pasada del estuario del Oka a macro-escala, mediante un modelo de equilibrio semi-empírico. Se utilizó el modelo de código abierto ASMITA (Interacción morfológica a escala agregada entre los estuarios y la costa adyacente). ASMITA es un modelo de tipo conductual que se ha utilizado ampliamente en entornos mareales y describe el comportamiento neto del sistema utilizando descripciones simplificadas y relaciones derivadas de un modelo detallado basado en procesos. Incluye una parametrización del transporte litoral desarrollada específicamente en el marco del proyecto OKAKLIMA.

Se discretiza el estuario en distintos tramos (Figura 5), cada uno de estos tramos contienen uno o varios elementos geomorfológicos (canales, bajos, llanuras, marismas). Se calculan las curvas hipsométricas en cada tramo a partir del modelo de terreno para determinar las características de los elementos (volumen y superficie). Los estudios previos sobre la dinámica del estuario (Liria et al., 2009; Monge-Ganuzas et al. 2015; 2017), han permitido diseñar un modelo preliminar de funcionamiento del estuario y definir las interconexiones hidro-sedimentarias entre los elementos.

El aumento de nivel del mar considerado es una tasa constante de 1.7 mm/año, valor representativo de los cambios observados durante el siglo XX (García-Artola et al., 2015). Los resultados se extrapolan al periodo 2000 - 2100 para poder compararse con los resultados de las proyecciones, teniendo en cuenta que los resultados presentados en esta parte se han obtenido con unas tasas de aumento mucho menores que las tasas previstas (Fox-Kemper et al., 2021).

Se obtiene que las tasas de sedimentación en todo el estuario corresponden con las tasas de aumento de nivel medio del mar, considerando el aumento lineal de 1.7 mm/año (Figura 6). En otras palabras, los resultados sugieren que, en el pasado, los elementos del estuario, incluyendo las marismas naturales, han acrecido y han ajustado su cota a la velocidad de ascenso del nivel del mar.

Se analiza la influencia de las oscilaciones de muy largo plazo en la señal de marea astronómica, en particular, los efectos de la marea nodal, en los cambios morfológicos del estuario, y en las marismas en particular (Figura 7).

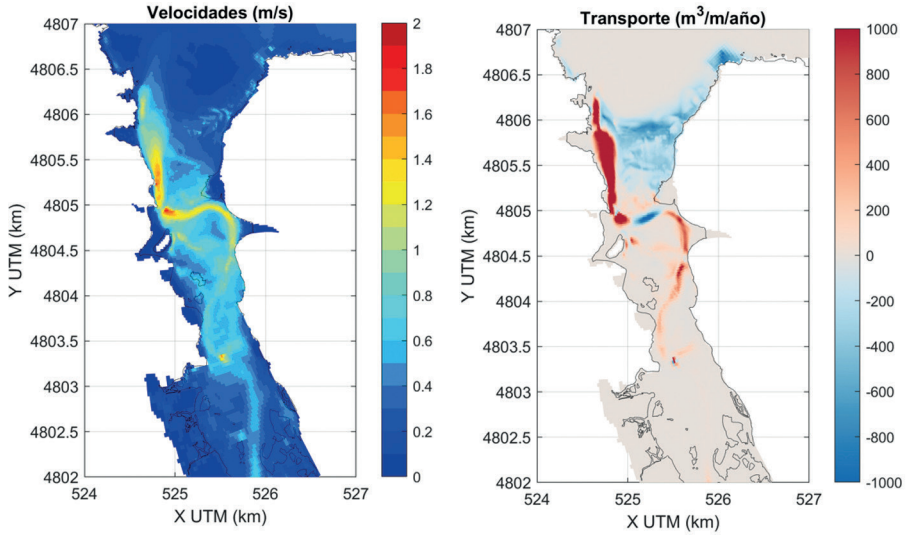

Figura 4. Velocidades de corrientes máximas y transporte sedimentario medio anual obtenidos durante un ciclo de mareas vivas medias con condiciones medias de oleaje ($Hs=Hs_{50}$=1.6 m, Tp=10 s, Dir=300º). Los valores positivos (rojos) del transporte indican transporte hacia el mar y los valores negativos (azules) indican transporte hacía el interior del estuario.

Se considera un aumento del nivel del mar de 1.7 mm/año (similar al caso anterior) y se añade la contribución de la marea nodal de amplitud de 9 cm y de periodo de 18.6 año (amplitud calculada con los datos del mareógrafo de Bilbao).

Considerando los efectos de la marea nodal, se observa una variación de las tasas de sedimentación con aceleración y deceleración asociados a la señal de marea nodal. Las tasas pueden ser incluso negativas, en este caso indica que la profundidad en las marismas aumenta. Los valores máximos de sedimentación son de 5 mm/año, y

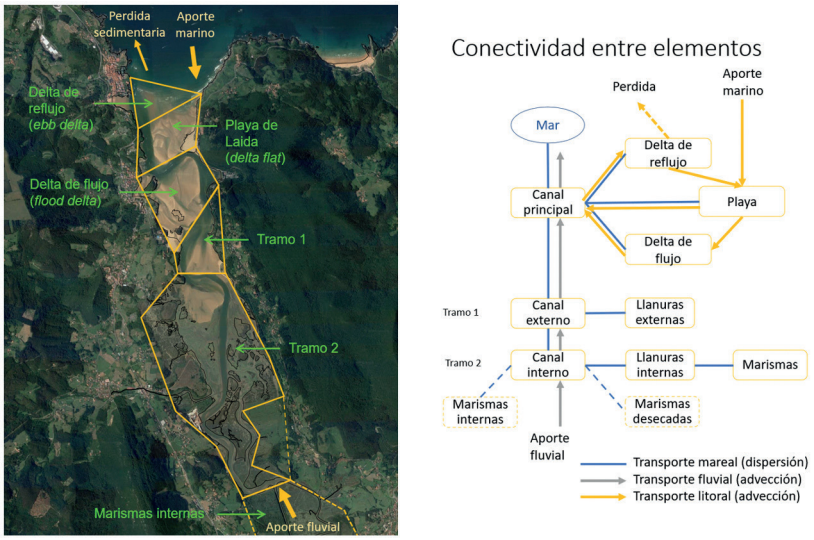

Figura 5. Definición de los distintos tramos del estuario del Oka implementados en el modelo ASMITA y esquema de las interconexiones entre los elementos. Las líneas azules representan el transporte de sedimento dispersivo entre los elementos por marea, las líneas amarillas representan el transporte sedimentario por oleaje, las líneas grises representan el transporte advectivo fluvial.

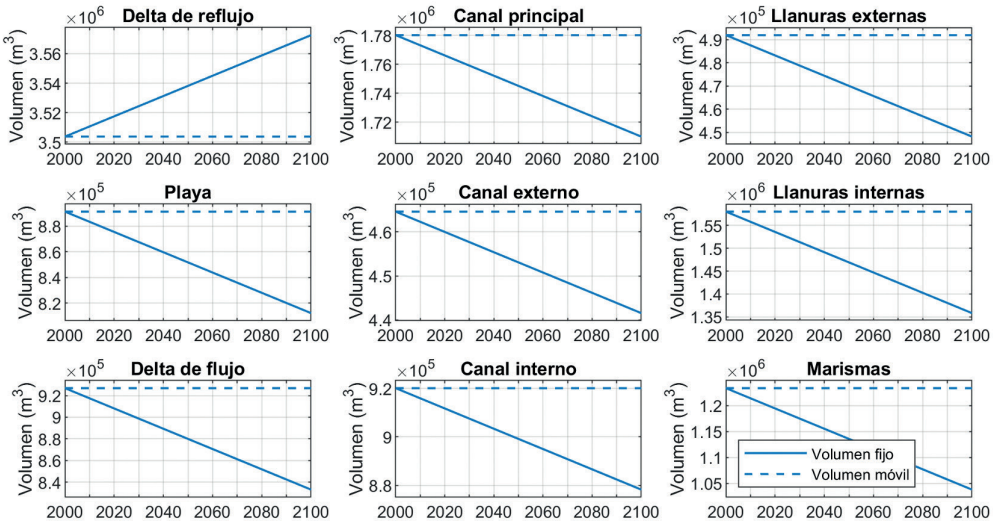

Figura 6. Respuesta del estuario del Oka a una tasa de aumento de nivel del mar de 1.7 mm/año. Evolución del volumen de los elementos geomorfológicos durante 100 años. Los elementos representados son: el delta de reflujo (la barra de Mundaka, *ebb delta*), la playa de Laida (*delta flats*), el canal principal (*delta channel*), el canal externo (*outer channel*), el canal interno (*inner channel*), las llanuras externas (*outer flats*), las llanuras internas (*inner flats*) y las marismas (*marshes*). Las líneas continuas indican el volumen fijo (excluyendo el cambio debido a los cambios de nivel del mar), las líneas discontinuas indican el volumen móvil (incluyendo los cambios de nivel del mar). El volumen del delta de reflujo representa un volumen de sedimento, los otros volúmenes representan volúmenes de agua. Modificado de Garnier et al. (2022).

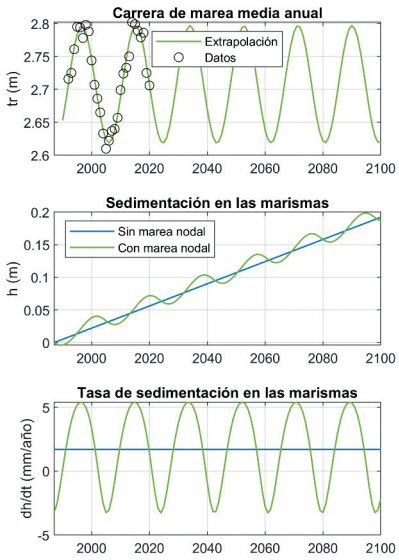

Figura 7. Carrera de marea media anual (tr, en metros) calculada a partir de los datos del mareógrafo de Bilbao (círculos negros) y respuesta de las marismas del Oka a un aumento de nivel del mar de 1.7 mm/año excluyendo (línea azul) e incluyendo (línea verde) la contribución de la marea nodal. Evolución del nivel del lecho (h, en metros) y de la tasa de sedimentación (dh/dt, en mm/año) durante 100 años. Modificado de Garnier et al. (2022).

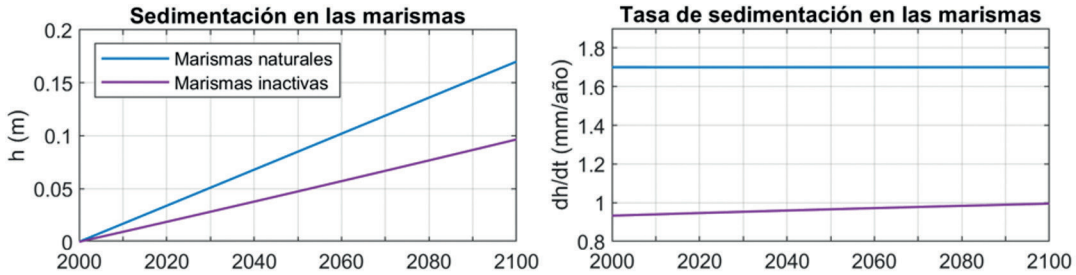

Figura 8. Respuesta de las marismas del estuario del Oka a un aumento de nivel del mar de 1.7 mm/año incluyendo (línea azul) e excluyendo (línea morada) los procesos bio-morfodinámicos. Evolución del nivel del lecho (h, en metros) y de la tasa de sedimentación (dh/dt, en mm/año) durante 100 años. Modificado de Garnier et al. (2022).

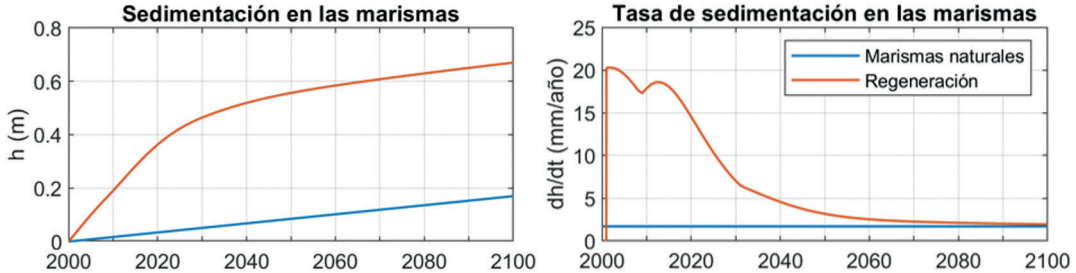

Figura 9. Respuesta de marismas naturales (línea azul) y de marismas en regeneración (línea naranja) en el Oka a un aumento de nivel del mar de 1.7 mm/año. Evolución del nivel del lecho (h, en metros) y de la tasa de sedimentación (dh/dt, en mm/año) durante 100 años. Modificado de Garnier et al. (2022).

coinciden, aproximativamente, con los máximos del nivel de pleamar medio anual. Los valores mínimos de sedimentación/erosión son de -3 mm/año. Estos valores coinciden con los mínimos del nivel de pleamar medio anual.

El modelo de marismas implementado tiene en cuenta los procesos de retención de sedimento, la bio-producción, y las interacciones entre especies, y se ha calibrado con datos de distribución de especies y de sondeos cortos. Asumiendo un escenario de marismas inactivas (degradación de las marismas por causas externas), la sedimentación en el estuario se reduciría aumentando, por lo tanto, el riesgo de inundación (Figura 8).

Se ha simulado un episodio de reapertura de marismas similar al de la desocupación del estuario en la segunda mitad del siglo XX (Figura 9). Las tasas de sedimentación obtenidas en las marismas en regeneración son hasta un orden de magnitud mayor que en las marismas naturales, y, a pesar de representar un caso simplificado, guarda correspondencia con los datos obtenidos del análisis de foraminíferos procedentes de sondeos cortos (García-Artola, 2013; García-Artola et al., 2015).

04

Escenarios futuros basados en proyecciones climáticas

4.1. Escenarios de cambio climático

Los escenarios considerados para analizar la respuesta del estuario al cambio climático se obtienen de los escenarios climáticos del sexto informe del IPCC (AR6, Fox-Kemper et al., 2021). El estudio se centra en dos horizontes temporales, horizonte 2050, y horizonte 2100, para cubrir el medio y largo plazo.

Se considera un escenario con un nivel intermedio de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), SSP2-4.5, y un escenario con un nivel alto de emisiones de GEI, SSP5-8.5, que corresponden con los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 considerados en el quinto informe del IPCC (AR5, Pachauri et al., 2014). Los SSPs son una extensión de los RCPs que tienen en cuenta las proyecciones de los cambios socioeconómicos globales hasta 2100, se utilizan para derivar escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero según diferentes políticas climáticas. Siguiendo las recomendaciones del IPCC, se considera el escenario SSP2-4.5, una combinación del RCP4.5 (estabilización de las emisiones) asociado con una política climática relativamente sostenible (SSP2), y, el escenario SSP5-8.5, una combinación del RCP8.5 (gran aumento de emisiones) asociado a una política de desarrollo impulsado por combustibles fósiles, que no es sostenible.

En el presente estudio, las proyecciones del aumento del nivel del mar (ANM) se han calculado considerando un incremento exponencial, a partir de los datos globales del IPCC (Tabla 3 y Tabla 4). En particular se utilizan los valores de ANM (Tabla 3) y las tasas de ANM (en mm/año, Tabla 4).

Las proyecciones indican que, para el peor de los escenarios estudiados, el aumento será, aproximadamente, de 1 m para el año 2100 (percentil 83 del escenario SSP5-8.5). En el mejor de los escenarios, el aumento es superior a 40 cm para el año 2100 (percentil 17 del escenario SSP2-4.5), el cual es más de dos veces superior al aumento considerado en las secciones anteriores (aumento lineal de 1.7 mm/año).

Se considera, además, un aumento de nivel del mar basado en los datos obtenidos de análisis de foraminíferos con sondeos realizados en los estuarios vascos (García-Artola et al., 2015), y se observa que el aumento es similar al aumento medio obtenido en el escenario SSP5-8.5 (Figura 10).

De acuerdo con los estudios previos (de Santiago et al., 2021), se considera que los cambios del nivel medio del mar son los más relevantes sobre la dinámica marina debido al cambio climático para el siglo XXI, al menos en la región del Atlántico Norte. En particular, predicen cambios mínimos en los valores medios de la altura de ola (Hs), período de pico (Tp), dirección de oleaje (Dir) y marea meteorológica (MM) en el futuro (Camus et al., 2017 y 2019). Por otra parte, a pesar de obtener tendencias positivas en el régimen extremal de oleaje, con los datos de boya en la zona de estudio (Chust et al., 2021; Garnier et al., 2021), los últimos estudios de proyecciones de oleaje extremal indican que no habrá un aumento significativo en el resto del siglo XXI (O'Grady et al., 2021).

Aumento del nivel del mar (ANM)	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Horizonte 2050	0.21 m (0.18 m - 0.26 m)	0.23 m (0.20 m - 0.30 m)
Horizonte 2100	0.56 m (0.44 m - 0.76 m)	0.77 m (0.63 m - 1.02 m)

Tabla 3. Aumento del nivel del mar (ANM, en metros) respecto al periodo de referencia 1995-2014 basado en los distintos escenarios de cambio climático definidos en el último informe del IPCC (AR6, Fox-Kemper et al., 2021). Se indican los valores medios, y, entre paréntesis, los valores inferiores y superiores del intervalo de confianza (17% - 83%).

Tasas de aumento de nivel del mar	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Horizonte 2050	5.9 mm/año (4.5 mm/año - 8.0 mm/año)	7.3 mm/año (5.7 mm/año - 9.8/año)
Horizonte 2100	7.8 mm/año (5.3 mm/año - 11.5 mm/año)	12.2 mm/año (8.8 mm/año - 17.7 mm/año)

Tabla 4. Tasas de aumento del nivel del mar (en mm/año) respecto al periodo de referencia 1995-2014 basado en los distintos escenarios de cambio climático definidos en el último informe del IPCC (AR6, Fox-Kemper et al., 2021). Se indican los valores medios, y, entre paréntesis, los valores inferiores y superiores del intervalo de confianza (17% - 83%).

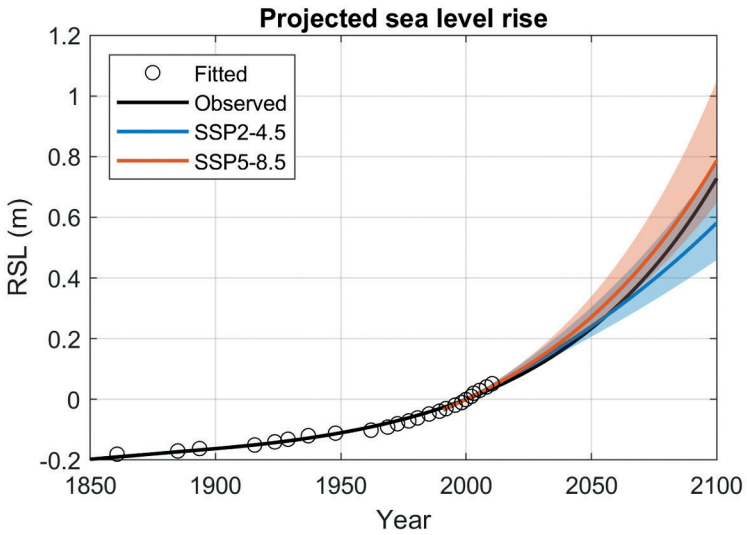

Figura 10. Proyecciones del aumento del nivel del mar (ANM) calculadas con el modelo exponencial de ASMITA. Los círculos negros representan los datos de ANM obtenidos a partir del análisis de foraminíferos de Garcia-Artola et al., 2015, y la línea negra representa el ajuste exponencial. Las líneas de color representan las proyecciones obtenidas con un ajuste exponencial de los resultados del último informe del IPCC para el escenario SSP2-4.5 (línea azul) y el escenario SSP5-8.5 (línea naranja). Las bandas claras representan el intervalo de confianza de 17%-83%.

4.2. Evolución del estuario

Los resultados del modelo muestran que se produce sedimentación en todos los elementos del estuario (Figura 11). Sin embargo, esta sedimentación no es suficiente para que el estuario se ajuste (adapte) al aumento del nivel del mar. Al contario que los resultados obtenidos con un aumento de nivel del mar lineal, la sedimentación no es suficiente para compensar el aumento del nivel del mar en todos los elementos del estuario, excepto en el delta de reflujo, donde la sedimentación será mayor.

En las marismas (Figura 12), los resultados indican que la profundidad aumenta, lo que es equivalente a un aumento del hidroperiodo (el tiempo de inundación de las marismas). Este desequilibrio puede tener una implicación en el desarrollo de las especies presentes y en la extensión horizontal de las marismas. Sin embargo, dado el alcance del estudio no se puede cuantificar; ya que sería necesario realizar un estudio de detalle de hábitats en la zona. Dicha extensión podría verse afectada también por la presencia de diques y munas que impiden la transgresión del estuario, este efecto requiere un estudio de detalle específico para poder cuantificar de manera precisa la superficie afectada.

Se han calculado las superficies inundadas bajo condiciones extremas para los distintos escenarios climáticos. La diferencia entre el escenario actual y el peor escenario considerado (SSP5-8.5, 83%) es de 16 ha, y el estuario actual se inundaría más frecuentemente (Figura 13). En estudios futuros y con objeto de determinar con mayor precisión las zonas inundadas, se podrán utilizar los resultados presentados aquí como forzamiento del modelo de inundación de del Campo et al. (2021). Esto permitiría incluir la sobreelevación de agua debida al oleaje en los estuarios para evaluar el riesgo futuro. Cabe señalar que, en este análisis, no están considerado los cambios morfológicos a futuro. Dado que los resultados obtenidos anteriormente muestran que se producirá sedimentación en la zona interna del estuario, se puede anticipar que los cambios de superficie observados serán menores.

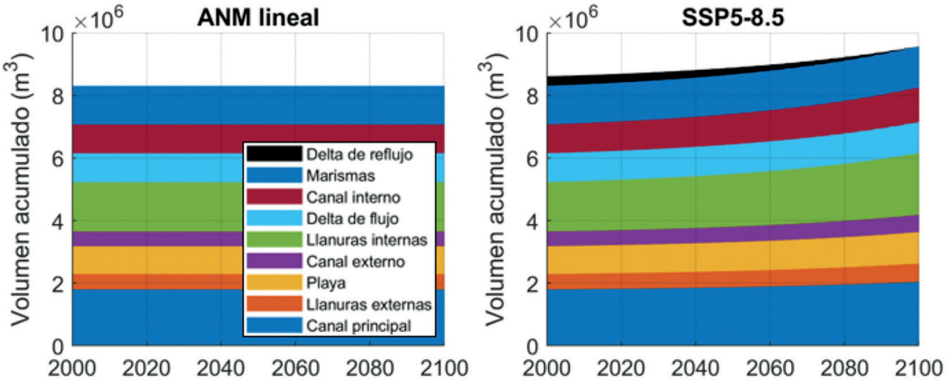

Figura 11. Balance sedimentario global de la respuesta del Oka a un aumento de nivel del mar lineal (izquierda) y exponencial basado en el escenario SSP5-8.5 (derecha). Evolución del volumen de agua de los elementos geomorfológicos hasta el año 2100.

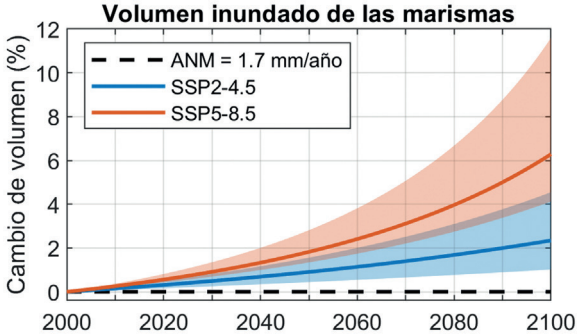

Figura 12. Respuesta de las marismas del Oka a un aumento de nivel del mar exponencial basado a dos escenarios del IPCC: el escenario SSP2-4.5 (líneas azules) y el escenario SSP5-8.5 (línea naranja). Las bandas claras representan el intervalo de confianza de 17%-83% de los escenarios del IPCC.

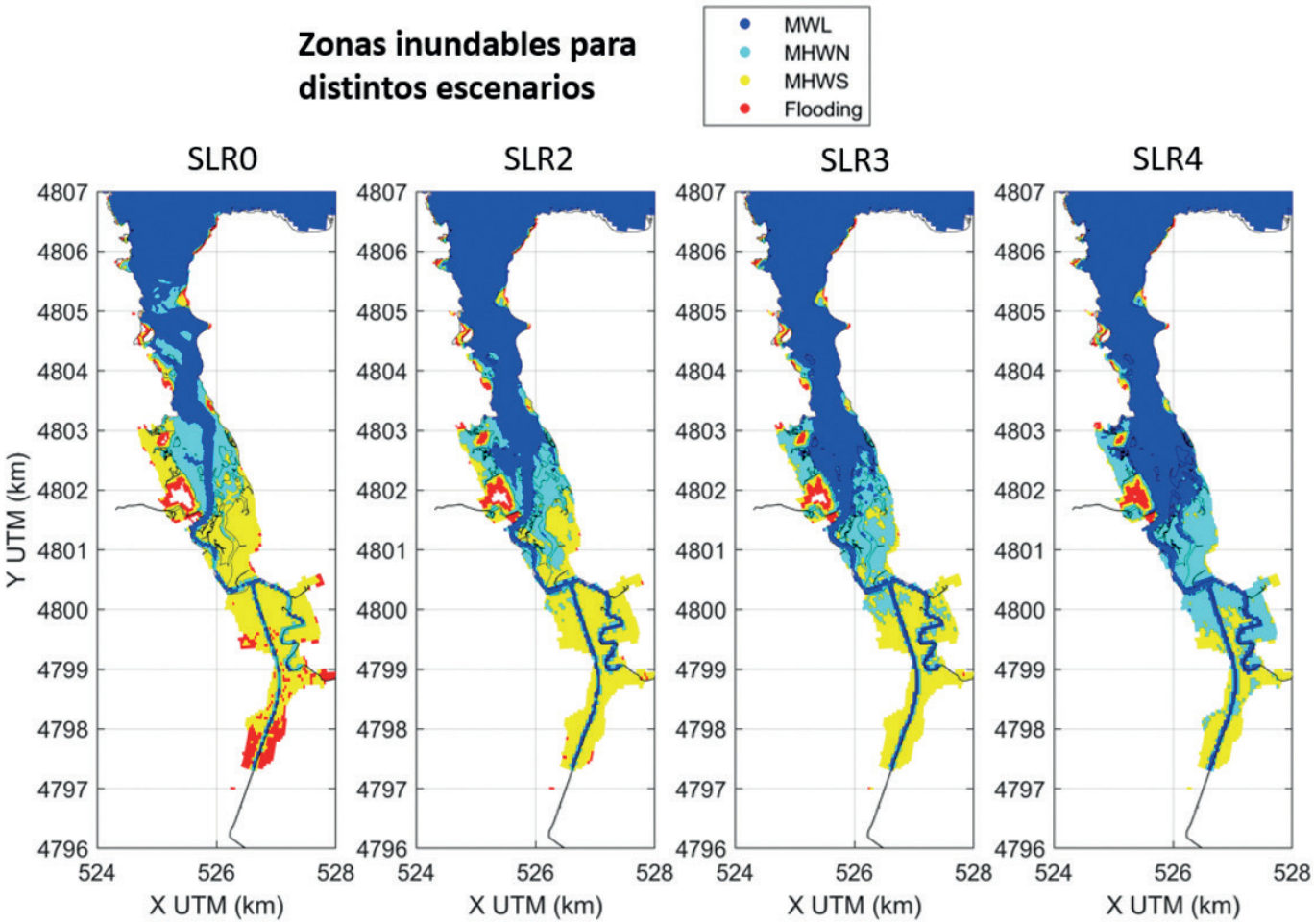

Figura 13. Zonas inundables en la situación actual y en 2100 para distintos escenarios de cambio climático (aumento de nivel del mar de SLR1=0.5 m, SLR2=0.7 m y SLR3=1 m). Los colores representan los niveles futuros (proyectados) de media marea (MWL, azul oscuro), de pleamares muertas (MHWN, azul claro), y de pleamares vivas (MHWS, amarillo).

05

Modelo de funcionamiento y resultados clave

La dinámica sedimentaria del Oka se caracteriza por intercambios sedimentarios entre sus elementos morfológicos (deltas, playas, canales, llanuras intermareales y marismas) y aportes externos de origen fluvial y marino (Figura 14). Los análisis sedimentológicos evidencian un relleno transgresivo del estuario inferior con sedimentos marinos desde el Holoceno y deposición de sedimentos fluviales muy finos en el estuario superior y en las marismas.

Se ha empleado un modelo numérico de procesos (Delft3D) que permite parametrizar el transporte litoral y mareal y analizar la inundación del estuario para distintos escenarios, y un modelo numérico morfológico de macro-escala (ASMITA) para determinar la evolución del volumen de los elementos morfológicos del estuario a largo plazo. El forzamiento principal del conjunto de modelos proviene de series históricas de oleaje, marea, y caudales, y de datos de ANM basado en reconstrucciones geológicas/ históricas y en proyecciones climáticas del IPCC. El modelo se ha utilizado para simular la respuesta del estuario ante el ANM en el pasado, validando los resultados con sondeos existentes, y para estudiar distintos escenarios climáticos futuros. Se han obtenido los siguientes resultados clave.

— **Los análisis sedimentológicos evidencian un relleno transgresivo del estuario. Las simulaciones numéricas realizadas en el presente estudio confirman este resultado.** En particular, se obtiene que, con una tasa de ANM representativa del aumento medio observado durante el siglo XX (1.7 mm/año), todos los elementos del estuario, incluyendo las marismas naturales, acrecen y ajustan su cota al ANM.

— **Considerando un ANM exponencial como es el caso de las últimas proyecciones climáticas del IPCC, los resultados del modelo indican que las tasas de sedimentación no serían suficientes para compensar el ANM, en ninguno de los escenarios estudiados.** Se han considerado los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5; dichos escenarios representan un nivel intermedio y alto de emisiones, respectivamente, y las tasas medias de ANM asociadas, para los años 2080-2100, son de 7.7 y 12.1 mm/año. El déficit de sedimento en el estuario reduciría la protección natural del sistema frente a la erosión e inundación costera, siendo mayor en los escenarios de emisiones altas.

— **En el caso de las marismas, estos resultados basados en las tasas de ANM que reflejan las proyecciones climáticas indican que su hidroperiodo, tiempo en que permanecen inundadas, se incrementaría.** Este desequilibrio en las marismas puede tener una implicación severa sobre la evolución y extensión de las especies presentes en las marismas del futuro. Además, el efecto de los muros que constriñen el estuario y frenan el desarrollo horizontal de las marismas, y factores externos, tales como el aumento de temperatura, amplificarían el desequilibrio.

— **Se ha demostrado asimismo de acuerdo con los resultados del proyecto el papel de unas marismas en buen estado para el equilibrio del estuario.** El modelo de marismas implementado tiene en cuenta los procesos de retención de sedimento, la bio-producción y las interacciones entre especies, y se ha calibrado a partir de datos de distribución de espe-

cies y de sondeos cortos. Asumiendo un escenario de marismas inactivas (degradación de las marismas por causas externas), la sedimentación en el estuario se reduciría aumentando, por lo tanto, el desequilibrio y reduciéndose la protección natural del sistema frente la inundación costera.

— **La reapertura y restauración de las marismas que han sido ocupadas o cerradas en el pasado, además de liberar espacio permitiendo la transgresión natural del estuario, contribuyen a una mayor sedimentación en el estuario, aumentando su resiliencia al cambio climático.** Se ha simulado un episodio de reapertura de marismas similar al ocurrido tras la desocupación del estuario en la segunda mitad del siglo XX. Las tasas de sedimentación obtenidas en las marismas en regeneración son hasta un orden de magnitud mayor que en las marismas naturales, lo cual guarda correspondencia con los datos obtenidos del análisis de los datos obtenidos en los sondeos.

— **Los resultados sugieren que las herramientas de modelización desarrolladas son adecuadas para determinar la respuesta del estuario ante el ANM y el efecto de actuaciones humanas de adaptación como la reapertura de marismas.** Por lo tanto, se puede utilizar para diseñar opciones de adaptación al cambio climático. La herramienta combina un modelo de proceso que permite evaluar con alta resolución los efectos del oleaje, de las corrientes, la inundación y el transporte de sedimento en una situación actual y futura, y un modelo morfológico macro-escala, que permite determinar la evolución del volumen de los distintos elementos del estuario bajo distintos escenarios climáticos y opciones de adaptación.

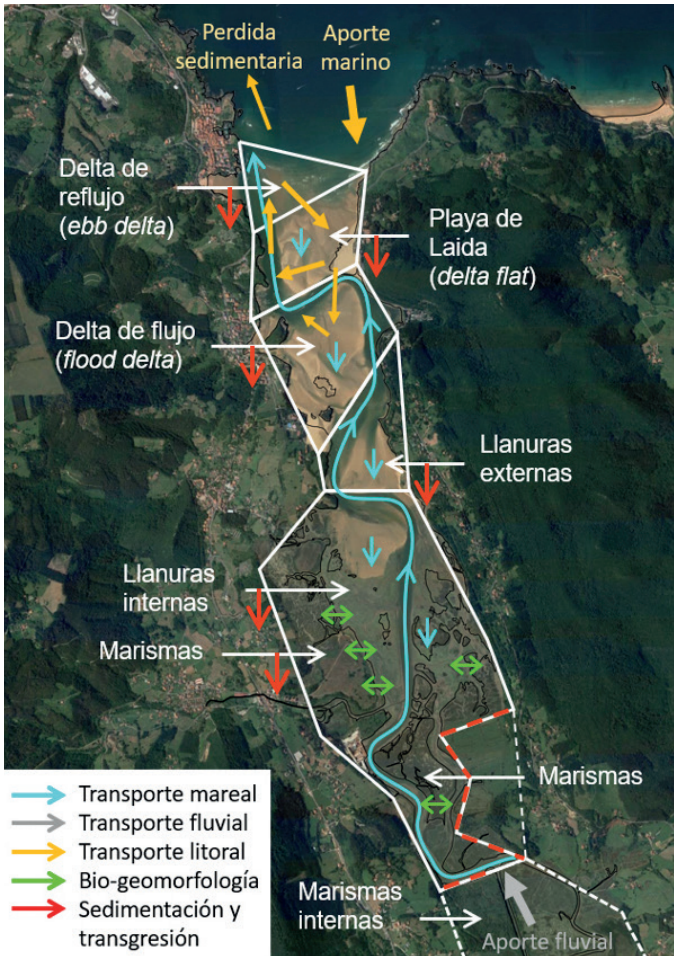

Figura 14. Modelo de funcionamiento del estuario del Oka y respuesta al cambio climático.

06

Líneas a seguir para definir las medidas de adaptación en los estuarios vascos

6.1. Programa de seguimiento: datos de observación y herramientas numéricas

Las herramientas desarrolladas permiten determinar la respuesta del estuario ante el ANM bajo distintos escenarios climáticos y analizar el efecto de actuaciones humanas. Por lo tanto, se puede utilizar para el diseño y el seguimiento de medidas de adaptación y es un soporte para la toma de decisión en cuanto a la gestión del estuario del Oka y de otros estuarios del País Vasco.

Se debe definir en primer lugar un programa de seguimiento de los estuarios, incluyendo la generación y el análisis de datos de observación. La información permitirá mejorar nuestro conocimiento del estado actual y la predictibilidad a futuro, utilizándose para contrastar y mejorar las simulaciones numéricas. En el caso del Oka, el programa de seguimiento debería incluir:

- el seguimiento de la desembocadura, a partir de la realización periódica de topo-batimetrías y de campañas hidro-sedimentarias, y un programa de seguimiento a partir de datos continuos de videometría KostaSystem (Liria et al., 2021).
- el seguimiento del estuario superior, y en particular de las marismas, enfocado en el medio-largo plazo, a partir de cartografías y datos topográficos, datos hidro-sedimentarios, y de la implementación de un sistema de seguimiento continuo de la elevación de las marismas (French y Burningham, 2003).

Los datos generados se deben combinar con el desarrollo de las herramientas numéricas para analizar el balance sedimentario en todo el estuario y mejorar las predicciones. En particular, en el Oka, los datos de sedimentación existentes obtenidos con sondeos y topo-batimetrías, y los datos que se van a generar, se pueden utilizar en combinación con el modelo presentado, para evaluar los cambios en el aporte de sedimento de origen fluvial y marino y su relación con la variabilidad y las tendencias en las variables meteo-oceánicas.

Los datos y las herramientas desarrollados permitirán obtener y reevaluar periódicamente mapas de riesgo de alta resolución de la situación actual y futura, para distintos escenarios climáticos, y las opciones de adaptación. La metodología desarrollada para el cálculo de riesgo en el marco KOSTAEGOKI (del Campo et al., 2021) se puede utilizar en combinación con las herramientas desarrolladas en este proyecto. La metodología seria, por lo tanto, mejorada, dado que la nueva herramienta tiene en cuenta el efecto del oleaje y los cambios morfológicos en la inundación del estuario. Por otra parte, la herramienta se puede utilizar también para ampliar el ámbito del análisis de KOSTAEGOKI al riesgo sobre los hábitats, utilizando la metodología de Valle et al., 2014. Es de notar que, para un estudio de riesgo de alta resolución, se tiene que considerar la presencia de los diques y las munas que impiden la transgresión del estuario y el desarrollo completo de las marismas.

6.2. Hacia las medidas de adaptación

Las medidas de adaptación al cambio climático son diversas y deben actuar de manera combinada a través de un plan específico para el área de interés, en este caso el estuario del Oka. La selección de las medidas más adecuadas es compleja debido a la incertidumbre en la evolución y acumulación de impactos debidos al cambio climático, tal y como apunta la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española (MAPAMA, 2016). Se presenta un catálogo provisional de medidas de adaptación basado en ejemplos internacionales, para el estuario del Oka con el objetivo de reducir el riesgo de erosión e inundación que aumenta con el ascenso de nivel del mar (Tabla 5).

La metodología para definir las medidas de adaptación para el Oka, válida también para otros estuarios vascos, se puede dividir en tres pasos, según el estudio de Haasnoot et al., 2021.

- Un **estudio de referencia** del estado inicial (es decir, sin medidas de adaptación), donde se evalúa el riesgo actual y futuro, y se definen arquetipos. Concretamente, se requiere de un **estudio de riesgo de alta resolución** a escala local.
- Un **análisis de alternativas de adaptación**, incluyendo la presentación de un catálogo de medidas de adaptación y de un método de evaluación. Se debe estudiar el efecto de las medidas seleccionadas y se puede mostrar los resultados a través de mapas de riesgo del estuario (comparando el riesgo con y sin la medida considerada).
- El estudio se debe compartir con los agentes implicados para poder definir un **plan de adaptación** (la ruta a seguir) y un sistema de ayuda a la decisión asociado a un sistema de indicadores y herramientas de control de la resiliencia del estuario.

Nº	MEDIDA	CATEGORÍA IPCC	SUB CATEGORÍA IPCC	OPCIÓN ESTRATÉGICA
1	Mantenimiento y regeneración de playas	FÍSICA	Ingeniería	Protección
2	Conservación y restauración de dunas	FÍSICA	Ingeniería Ecosistemas	Protección
3	Conservación y restauración de humedales y marismas	FÍSICA	Ecosistemas	Protección
4	Gestión de sedimentos	FÍSICA	Ingeniería Ecosistemas	Protección
5	Estructuras de protección para la defensa de la costa (muros y revestimientos)	FÍSICA	Ingeniería	Protección
6	Estructuras de protección para la estabilización de la costa (espigones y rompeolas)	FÍSICA	Ingeniería	Protección
7	Adecuación funcional y estructural de las infraestructuras y edificaciones existentes	FÍSICA	Ingeniería	Acomodación
8	Sistemas de alerta temprana	FÍSICA SOCIAL	Tecnología Información Comportamiento	Acomodación
9	Realineación de estructuras existentes en la línea de costa y favorecer la migración hacia el interior de humedales y marismas (retroceso controlado)	FÍSICA SOCIAL	Ingeniería Comportamiento	Retroceso
10	Diagnóstico y análisis de riesgos	FÍSICA SOCIAL	Tecnología Información	Medida transversal

Nº	MEDIDA	CATEGORÍA IPCC	SUB CATEGORÍA IPCC	OPCIÓN ESTRATÉGICA
11	Monitorización	FÍSICA SOCIAL	Tecnología Información	Medida transversal
12	Educación y concienciación	SOCIAL	Información	Medida transversal
13	Investigación	SOCIAL	Información	Medida transversal
14	Planificación y gobernanza	SOCIAL INSTITUCIONAL	Comportamiento Políticas y programas de la administración Leyes y regulaciones Economía	Medida transversal

Tabla 5. Catálogo provisional de medidas de adaptación al cambio climático para el estuario del Oka, clasificado según la categoría y subcategoría del IPCC (Noble et al., 2014), y la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española (MAPAMA, 2016).

6.3. Aplicabilidad del estudio a otros estuarios en el País Vasco

Las herramientas desarrolladas se pueden aplicar también en otros estuarios, y en particular a los otros estuarios en el País Vasco. Cabe señalar que el estuario del Oka cuenta con una cantidad de información y trabajos preliminares única y que la replicabilidad del estudio a otros estuarios vascos está condicionada a la información disponible en cada estuario. Disponer de datos topo-batimétricos, y de cartografías de las marismas recientes es el requisito mínimo para poder aplicar los modelos numéricos y para entender el funcionamiento del estuario. Pero, para calibrar y validar los modelos, se necesitan datos de evolución morfológica y de distribución de especie y de datos hidro-sedimentarios puntuales a lo largo de los estuarios.

A su vez, es necesario realizar un análisis específico para identificar con mayor precisión la información disponible en todos los estuarios vascos. En particular, el análisis de Monge-Ganuzas et al. (2019) se puede completar con la identificación de las campañas hidro-sedimentaras realizadas en cada estuario. Por otra parte, todos los estuarios no tienen la misma importancia ambiental, socio-económica, ni el mismo interés científico y no necesitan la misma información. El análisis especifico de los datos disponibles debe tener en cuenta qué información y qué estuario priorizar en función de un indicador que refleje el interés socio-económico y ambiental, con el fin de priorizar las acciones de monitorización de los estuarios.

Dichas acciones se deberían enmarcar en un programa de seguimiento de los estuarios del País Vasco que formase parte de las líneas a seguir para definir y monitorizar las medidas de adaptación al cambio climático y para evaluar y mejorar de forma continua la resiliencia de los estuarios del País Vasco.

07

Referencias

Booij, N., Holthuijsen, L. H., & Ris, R. C. (1997). The "SWAN" wave model for shallow water. In Coastal Engineering 1996 (pp. 668-676).

Camus, P., Losada, I. J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., & Pérez, J. (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. Earth's Future, 5(9), 918-933.

Camus P., Tomás A., Díaz-Hernández G., Rodríguez B., Izaguirre C., Losada I. (2019), Probabilistic assessment of port operation downtimes under climate change. Coastal Engineering. 147: p. 12-24.

Chust G, González M, Fontán A, Revilla M, Alvarez P, Santos M, Cotano U, Chifflet M, Borja A, Muxika I, Sagarminaga Y, Caballero A, de Santiago I, Epelde I, Liria P, Ibaibarriaga L, Garnier R, Franco J, Villarino E, Irigoien X, Fernandes-Salvador JA, Uriarte A, Esteban X, Orue-Echevarria D, Figueira T & Uriarte A (2021). Climate regime shifts and biodiversity redistribution in the Bay of Biscay. Science of The Total Environment, 803, 149622.

de Santiago, I., Camus, P., Gonzalez, M., Liria, P., Epelde, I., Chust, G., del Campo, A., Uriarte, A., (2021). Impact of climate change on beach erosion in the Basque Coast (NE Spain). Coastal Engineering, 167, 103916.

del Campo, A., González, M., Uriarte, A., Castillo, C. & de Santiago, I. (2021). A socio-economic assessment of the sea-level rise on the Basque Coast municipalities (NW coast of Spain) due to the climate change. Arias, A., Ríos, P., Paxton, H.,Sánchez, O., Acuña, J. L., Álvarez, A., Manjón-Cabeza, M. E. & Cristobo, J. (Eds). 2021. Proceedings of the XVII International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay (ISOBAY 17). University of Oviedo, 134 pp.

Fox-Kemper, B., H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, A. B. A. Slangen, Y. Yu (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: 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.

French, J. R., & Burningham, H. (2003). Tidal marsh sedimentation versus sea-level rise: a southeast England estuarine perspective. In Proceedings International Conference on Coastal Sediments 2003 (pp. 1-14). World Scientific Publishing and East Meets West Productions Corpus Christi.

García-Artola, A., Cearreta, A., & Leorri, E. (2015). Relative sea-level changes in the Basque coast (northern Spain, Bay of Biscay) during the Holocene and Anthropocene: The Urdaibai estuary case. Quaternary International, 364, 172-180.

García-Artola, A., Stéphan, P., Cearreta, A., Kopp, R. E., Khan, N. S., & Horton, B. P. (2018). Holocene sea-

level database from the Atlantic coast of Europe. Quaternary Science Reviews, 196, 177-192.

Garnier, R., de Santiago, I., Liria, P., Epelde, I. & Chust, G. (2021). Increase of extreme wave events and impact in beach erosion in the Basque coast. Arias, A., Ríos, P., Paxton, H., Sánchez, O., Acuña, J. L., Álvarez, A., Manjón-Cabeza, M. E. & Cristobo, J. (Eds). 2021. Proceedings of the XVII International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay (ISOBAY 17). University of Oviedo, 136 pp.

Garnier R, Townend I, Monge-Ganuzas M, de Santiago I, Liria P, Abalia A, Epelde I, del Campo A, Chust G, Valle M, González M, Mader J, Gómez M, Castillo C & Uriarte A (2022). Modelling the morphological response of the Oka estuary (SE Bay of Biscay) to climate change. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 108133. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108133.

Haasnoot, M., Brown, S., Scussolini, P., Jimenez, J. A., Vafeidis, A. T., & Nicholls, R. J. (2019). Generic adaptation pathways for coastal archetypes under uncertain sea-level rise. Environmental Research Communications, 1(7), 071006.

Liria, P., Garel, E., & Uriarte, A. (2009). The effects of dredging operations on the hydrodynamics of an ebb tidal delta: Oka Estuary, northern Spain. Continental Shelf Research, 29(16), 1983-1994.

Liria, P., Epelde, I., Santiago, I., Garnier, R., Abalia, A., & Mader, J. (2021). KOSTASystem, a coastal videometry technology: development and applications. Proceedings of the 9th EuroGOOS International Conference 'Advances in Operational Oceanography: Expanding Europe's Observing and Forecasting Capacity', 3-5 May 2021.

MAPAMA (2016). Estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española. 120 pp.

Monge-Ganuzas, M., Evans, G., & Cearreta, A. (2015). Sand-spit accumulations at the mouths of the eastern Cantabrian estuaries: The example of the Oka estuary (Urdaibai Biosphere Reserve). Quaternary International, 364, 206-216.

Monge-Ganuzas M, Gainza J, Liria P, Epelde I, Uriarte A, Garnier R, González M, Nuñez P, Jaramillo C & Medina R (2017). Morphodynamic evolution of Laida beach (Oka estuary, Urdaibai Biosphere Reserve, southeastern Bay of Biscay) in response to supratidal beach nourishment actions. Journal of Sea Research, 130, 85-95.

Noble, I.R., S. Huq, Y.A. Anokhin, J. Carmin, D. Goudou, F.P. Lansigan, B. Osman-Elasha, and A. Villamizar (2014). Adaptation needs and options. In: 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 [Field, C.B., 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, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 833-868.

O'Grady, J.G., Hemer, M.A., McInnes, K.L. et al. Projected incremental changes to extreme wind-driven wave heights for the twenty-first century. Sci Rep 11, 8826 (2021).

Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

Roelvink, J. A., & Van Banning, G. K. F. M. (1995). Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics. Oceanographic Literature Review, 11(42), 925.

Valle, M., Chust, G., del Campo, A., Wisz, M. S., Olsen, S. M., Garmendia, J. M., & Borja, Á. (2014). Projecting future distribution of the seagrass Zostera noltii under global warming and sea level rise. Biological Conservation, 170, 74-85.





www.ihobe.eus